

국가 해양 재해재난 대응기술 개발 - 연안재해위험 분석, 평가 및 저감

Development of Countermeasure Technologies for National
Ocean Disasters and Calamities

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

2
0
1
7
·
12

2017. 12. 31

국가 해양 재해재난 대응기술 개발
- 연안재해위험 분석, 평가 및 저감

Development of Countermeasure Technologies for National
Ocean Disasters and Calamities

2017. 12. 31

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “국가 해양 재해재난 대응 기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 12. 31.

총괄연구책임자 : 서 승 남

참 여 연 구 원 : 박 광 순, 전 기 천, 이 종 찬,
“ : 김 상 익, 권 재 일, 김 선 정,
“ : 허 기 영, 최 진 용, 최 복 경,
“ : 김 병 남, 김 응, 한 택 희,
“ : 오 상 호, 장 세 철, 조 홍 연,
“ : 권 영 연, 김 미 란, 김 성 원,
“ : 김 성 현, 김 호 진, 심 민 섭,
“ : 이 수 찬, 이 은 미, 이 주 연,
“ : 정 상 훈, 정 종 민, 지 호 윤,
“ : 최 영 광, 최 정 운, 홍 혜 민

위탁연구기관명 : University of Dundee

위탁연구책임자 : 박 용 성

보고서 초록

과제고유 번호	BSPE99524 -11528-2	연구기간	2015. 1. 1. - 2017. 12. 31.	단계 구분	-
연구사업명	중사업명	연안·항만관리 및 해양에너지 활용기술 개발 (안전한 바다 만들기)			
	세부사업명	기관 주요사업			
연구과제명	대과제명	국가사회현안대응과제			
	세부과제명	국가 해양 재해재난 대응기술 개발 - 연안재해위험 분석, 평가 및 저감			
연구책임자	서승남	해당단계 참여연구원수	총 : 32 명 내부: 16 명 외부: 16 명	해당단계 연구비	정부 : 582,000 천원 기업 : - 천원 계 : 582,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 48 명 내부: 21 명 외부: 27 명	총 연구비	정부 : 2,870,000 천원 기업 : - 천원 계 : 2,870,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 이사부호기반시설건설단 운용해양예보연구센터 해양방위연구센터 연안개발연구센터		참여기업명	-	
국제공동연구	-				
위탁연구	Theoretical & numerical analysis of permeable FLOWA				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	230
<p>1. 해양환경요소 통합지원 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 실시간 통합 해양환경정보 제공 시스템 ○ 고해상도 예측 시스템 ○ 유출유 및 표류체 이동 예측 시스템 <p>2. 연안·항만의 파랑 및 폭풍해일 재해 위험도 분석평가 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 파랑 및 폭풍 해일 모델 구축 및 개선 ○ 파랑 및 폭풍 해일 장기예측 <p>3. 극한환경극복 대응기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 수중 생존자 탐지형 청음시스템 ○ 신속 설치형 부유식 파랑저감 구조물 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	해양재해, 해양환경통합시스템, 실시간 해양환경 관측, 해양환경 예측, 수중 생존자 탐지형 청음시스템, 부유식 파랑저감구조물			
	영 어	Marine disaster, Marine environment integrated system, Real-time ocean environment observation, Ocean environment forecasting, Underwater acoustic listening system, Floating wave attenuator			

요 약 문

I. 제 목

국가 해양 재해재난 대응기술 개발 - 연안재해위험 분석, 평가 및 저감

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 빈번히 발생하는 해양사고로 인하여 많은 인명피해가 발생하고 있으며, 우리나라는 수입원유의 전량이 해로를 통하여 들어오기 때문에 유류유출 사고의 위험에 노출되어 있다. 따라서 유류, 유해물질 유출사고 발생 시 유해물질의 이동, 확산 예측을 할 수 있는 시스템을 필요로 하며, 해난 사고 발생 시 표류자 및 표류체 이동을 신속하게 예측할 수 있는 실시간 예측정보제공시스템의 개발을 필요로 한다.

또한 해난사고 발생 시에는 선체 내부의 생존자 탐지가 구조 활동의 성패를 좌우하는 주요 인자가 된다. 생존자 탐지를 위하여 선체 외벽에 수중청음기를 부착하여 내부에서 발생하는 생존자의 소리를 청음함으로써 생존여부 및 생존자의 위치를 확인하고 신속한 구조활동을 지원할 수 있는 수중 생존자 탐지형 청음시스템의 개발이 필요하다.

지구온난화 등의 기후변화에 의한 해수면의 상승과 이상파랑의 발생 등으로 우리나라 연안에서 자연재해가 증가하는 추세이다. 기후변화가 우리나라 연안에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 미흡한데, 해양기인 재해요소 가운데 가장 영향이 큰 파랑 및 폭풍해일에 대한 정밀 해상도의 예측시스템 개발을 필요로 하고 있다. 특히 연안에서는 파랑 변형의 비선형성이 크게 나타나므로 비선형성이 고려된 파랑-흐름-해일 등을 모의할 수 있는 복합적인 해석 모델의 구축이 필요하다.

해상에서의 파고를 크게 저감시킬 수 있는 신속 설치형 파랑저감 장치를 개발하여 해상 위급상황 등의 짧은 시간 내에 파랑에너지를 효율적으로 저감시킬 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구개발 과제의 연구 내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 해양환경요소 통합지원 기술 개발

- 해양관측 및 해양예측자료 실시간 수집체계 구축
- 자료 DB 구축 및 GIS 기반 사용자연동 UI 개발
- 사용자 중심의 최적 표출방안 및 자료배포 환경 제작
- 해양환경 요소의 고해상도 연안해역 예측시스템 구축
- 연안해역 예측모델 최적화 연구
- KOOS와 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 부산항 내에서의 파랑예측시스템 개발
- 항만 내 고해상도 격자시스템을 이용한 파랑 및 폭풍해일 모델의 구축
- 비구조 격자 적용 예측 시스템의 개선

- 과거 태풍에 대하여 비구조 격자를 이용한 폭풍해일 모델 시스템의 구축
 - 표류체 이동 예측기술 고도화 및 표출기술 개발
 - 오염물 분류/요소별 인자값 DB 구축
2. 연안·항만의 파랑 및 폭풍해일 재해 위험도 분석평가 기술 개발
- FUNWAVE-TVD 모형의 개선
 - FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 천해설계파 산출 및 스펙트럼 모형 결과와 비교
 - FUNWAVE-TVD 모형과 SWAN 모형을 이용한 반폐쇄 내만에서의 설계파 실험
 - FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 부산 해운대 해역의 이안류 수치모의
 - 이동하는 대기압의 영향을 고려한 파랑의 전파, 변형 모의
 - 파랑 및 폭풍해일의 장기예측
 - 파랑 재해위험도 평가
3. 극한환경극복 대응기술 개발
- 수중 생존자 탐지형 청음시스템
 - 생존자 탐지형 청음시스템 모듈 설계 및 수치모델 구축
 - 수중청음시스템 시제품 제작, 해상시험 및 검증
 - 신속 설치형 부유식 파랑저감 구조물
 - 개발 장치의 개념 디자인 도출
 - 개발 장치 성능 평가를 위한 CFD 및 수리실험 수행

IV. 연구개발결과

1. 해양환경요소 통합지원 기술 개발
- 실시간 통합 해양환경정보 제공 시스템

해양재해재난 요소에 대한 고해상도 예측 수치모델링 시스템인 운용해양예보시스템(KOOS)의 산출 데이터를 활용하여 사용자들이 직관적으로 정보를 활용 할 수 있는 시스템을 구축하였다. 시스템 운영을 위한 인프라 환경을 구축하여 DBMS, Web 서버, WAS 서버, DATA 서버를 외부의 데이터센터에 설치하여 보안성 및 서비스 기능을 강화하였다. 이러한 인프라를 활용하여 기상청, 해양조사원에서 관측하는 종관기상관측망, 부이관측, 조위관측소, 종합해양과학기지의 자료를 모두 실시간으로 수집하여 처리하고, KOOS의 예측자료 또한 실시간으로 수집, 처리한다. 처리된 자료를 활용하여 사용자가 어디에서도 이용하기 쉽게 Web기반의 표출시스템을 구축 하였다. Web기반의 표출시스템에서는 예측자료의 경우에는 공간분포도 형태로 표출하고 관측자료는 지도상의 지점에서 텍스트 및 그래프로 직관적으로 확인 할 수 있도록 표출하였으며, 각 자료는 자료의 특성에 따라 조회 및 다운로드가 가능하게 구현하였다. 본 연구의 목적에 부합하도록 수색구조 예측자료를 표출 할 수 있도록 하였는데, 사고위치와 시간, 표류체 형태 등 초기자료를 입력하면 입자추적모델의 입력 자료를 자동으로 생성하여 수

행되도록 구축하였고, 유류유출에 대비한 유류유출 확산예측 시스템 또한 구축하여 발생위치, 유출형태 및 지속시간, 바람확산계수 및 입자수를 입력하면 확산모델의 입력 자료를 생성하여 수행되도록 구축하였다.

○ 고해상도 예측 시스템

우리나라 남해안은 작은 섬들이 많고, 해안선이 복잡하다. 게다가 유속이 빨라 수치 모델로 연안의 흐름을 재현하려면 수치모델 계산 시 고해상도의 격자시스템을 사용해야 한다. 하지만 예측 시에는 정확성 뿐 아니라 계산 속도도 고려해야하기 때문에 한정된 계산 자원과 시간에 최대한의 정확도를 낼 수 있는 격자 크기의 선택이 필요하다. 이에, 본 연구에서는 연안 300 m 해상도의 격자를 최적의 해상도로 설정하고 연안 예측 시스템을 계획하였고, 전 연안 300m 해상도의 순환·파랑 예측 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 매일 72시간 예측을 수행하고 유류확산예측 시스템 및 수색구조를 위한 표류예측 시스템 등에 적용된다. 또한, 네스팅 과정에서 발생하는 수치적 오류와 연안 격자의 효율적인 공간 사용을 위해 비구조 격자를 활용한 예측 시스템을 시범 적용해 보았고, 폭풍해일 시스템을 구축하여 예측 시스템에 적용하였다.

한편, 파랑의 경우 스펙트럼 모델에서의 회절과 반사 계산의 한계를 보완하기 위하여 개선된 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 부산항에서의 고해상도 파랑예측 시스템을 개발하였다. 부산항 외측의 수심이 깊은 해역은 300 m 해상도의 SWAN을 이용하여 파랑 모의를 하였으며, FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역 경계에서 매시간 계산되어지는 SWAN의 결과를 이용하여 부산항 내측에서 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 파랑 모의를 수행하였다. FUNWAVE-TVD 모형에서는 불규칙파를 조파할 때 최단파의 적절한 재현을 위하여 2 m 간격의 고해상도 격자를 사용하였다. 개발된 파랑예측 시스템의 검증은 위하여 부산항 내측의 세 정점에서 파랑 관측을 수행하였으며, 관측치를 상당부분 재현하는 결과를 보였다.

○ 유출유 및 표류체 이동 예측 시스템

고해상도 연안예측 시스템과 연계한 고해상도 유류확산 및 표류 예측 시스템을 구축하여 해상사고 발생 시 수시로 계산 결과를 해경 등의 유관기관에 제공하였다. 고도화를 위해 현장 표류실험을 진행하여 모델 검증을 위한 자료로 사용하였고, 역추적 기법 개발, 방제효과 고려 등 표류예측 시 유용하게 사용될 수 있는 옵션 요소들을 개발하여 실제 상황에 적용하였다. 또한 현장 관측 실험을 통해 표류예측 모델의 바람, 수층별 민감도 테스트를 수행하였고, 실시간 HF-Radar 와 연계한 표류예측 방법에 대해 검토해 보았다. 이렇게 구축된 시스템은 웹페이지를 통해 일반 사용자도 간단하게 계산할 수 있도록 하였다.

2. 연안·항만의 파랑 및 폭풍해일 재해 위험도 분석평가 기술 개발

○ 파랑 및 폭풍 해일 모델 구축 및 개선

Shi et al. (2012)의 FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1의 부산항 관련 식에서 나타

난 수식의 오류를 수정하였고, Yamamoto and Daiguji (1993)가 제안한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법에서 나타나는 수치적인 불안정성을 보완하기 위하여 Erduran et al. (2005)의 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 적용하였다. 개선된 모형을 Vincent and Briggs (1989)의 수리실험 관측치와 비교하여 검증하였으며, 관측치와 상당부분 일치하는 결과를 보였다. 개선된 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 부산항에서의 설계파를 모의하였으며, SWAN 모형의 결과와 비교하였다. SWAN 모형의 결과에서는 파랑의 회절 현상이 제대로 재현되지 않았지만, FUNWAVE-TVD 모형의 경우 회절 현상이 재현되는 결과를 보였다. 개선된 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 부산 해운대에서 빈번히 발생하는 이안류 수치실험을 수행하였다. 부산 해운대 인근 해역의 지형 변화에 의한 파랑 변형을 고려하기 위하여 기존에 수행되었던 실험영역에 비하여 넓은 영역에서의 수치실험을 수행하였다. 다양한 주기를 이용하여 실험을 수행하였으며, 이안류가 발생한 당시의 관측된 주기에서도 이안류가 재현됨을 확인하였다.

○ 파랑 및 폭풍 해일 장기예측

역학적 규모축소법을 적용하여 10km 격자의 정밀해상도로 1979~2013년의 35년간의 기상자료를 생산하였으며, 이를 사용하여 1/12도 격자의 35년간 장기파랑자료를 생산하였다. 기상자료는 ECMWF Interim 전지구 자료를 경계조건으로 WRF모형을 사용하여 산출하였으며, 파랑자료는 WaveWatch III모형을 사용하였다. 태풍시에는 1951~2013년의 63년간 277개 태풍에 대해 태풍해상풍 모델에 의한 바람장을 사용하여 태풍시 파랑자료를 생산하였다. 생산된 기상자료와 파랑자료는 기상청 및 국립해양조사원의 기상 관측자료와 파랑관측자료를 활용하여 비교, 검증하였다. 장기파랑산출자료를 활용하여 태풍시 및 비태풍시의 파향별 최대파랑을 비교 분석하였으며, 기후변화에 따른 년 최대파랑의 년변화와 분석기간에 따른 설계파랑의 변동성을 비교, 분석하였다.

3. 극한환경극복 대응기술 개발

○ 수중 생존자 탐지형 청음시스템

수중 생존자 탐지형 청음시스템의 운용 개념은 먼저 침몰선에 수중생존자 탐지형 청음센서를 부착하고, 청음센서에서 획득한 음향자료를 수중통신으로 송신하고, 수신부에서 수신한다. 침몰선 주변에 설치한 부이에서 Wi-Fi 통신을 이용하여 구조선으로 실시간 신호를 전송한다. 최종적으로 주변의 구조선에서 음향신호를 확인하여 생존자 유무를 판단한다.

본 연구에서 개발한 수중 생존자 탐지형 청음시스템은 국내에서 유일하게 개발한 제품이다. 1차년~2차년에 걸쳐 청음시스템을 구동하기 위한 알고리즘, 기구부 등에 대한 설계와 프로토타입 시제품을 개발하여 테스트하였다. 3차년에는 1~2차년도에서 수행한 프로토타입 시제품의 단점을 보완하여 최종 시제품 개발을 완료하였다.

시제품 테스트를 위하여 현장실험용 기구를 설계하여 제작하였고 해상시험 전에 KIOST 수조에서 시험을 수행하였다. 시험 결과 기구부 외부에서 수신한 음원이 송신 신호보다 해상도는 낮았으나, 음성구분은 가능하였다.

3차년도에 제작한 수중 생존자 탐지형 청음시스템 시제품의 해상시험을 수행하였다. 해상시험은 경상북도 울진군 죽변항 인근해역(수심 10 ~ 40 m)에서 수행하였다. 해상 시험에서 현장시험용 기구 내에 스피커를 부착하고, 2개의 음향 신호(음성“살려주세요”, 선체내부 타격음)를 구동하여 실험하였다. 내부의 소리를 부착형 청음시스템 시제품에서 획득하고, 획득한 신호를 수중통신모뎀을 이용하여 송신, 부이부 수중모뎀에서는 신호를 수신하여 부이부 모듈에서 신호처리후 WiFi 안테나를 통해 선박으로 신호를 전송하였다. 청음시스템에서 획득한 신호가 선박으로 실시간 전송되는 것을 확인하였다.

수신된 2개의 음향 신호 분석결과 음성 “살려주세요” 수신음 신호는 청음시스템의 표본화주파수로 인해 원음에서 나타나는 3 kHz 이상 주파수대역의 특성을 파악할 수 없었으나, 실시간 전송 및 분석을 통해 생존자의 음성을 확인할 수 있었다. 선체내부 타격음의 수신음 신호 분석 결과 3 kHz 이하 주파수에서 타격음의 주기성을 확실하게 파악할 수 있었다. 수중생존자 탐지형 청음시스템을 이용한 실시간 수중생존자 탐지 가능성을 확인하였다.

본 실험에서 수중모뎀 간 거리가 100 m 이상인 경우, 수표면 및 바닥면에서 발생하는 반사로 인하여 수중통신에 제한이 발생하며 실험결과 도출에 어려움이 있었다. 향후 시스템 개발에서는 수중통신 체계 보다는 유선으로 활용하는 것이 현장적용에 적합하다고 판단된다.

○ 신속 설치형 부유식 파랑저감 구조물

미국 육군공병단(USACE)에서 수행된 신속설치방파제(RIB) 실험자료를 이용하여 공개 소프트웨어인 OpenFOAM 기반의 부유식 파랑저감장치 수치모형을 구축하였다. 또한 고강도섬유(UHMWPE) 소재를 이용하여 RIB와 차별화되는 부유식 파랑저감장치 형식을 제안하고 수리실험을 통해 수리적 특성을 평가하였다. 수치모델링 및 실험 결과로부터 주기가 짧은($T < 4$ s) 경우에만 부유식 파랑저감장치의 실질적 적용이 가능함을 확인하였다. 이러한 점을 고려하여 고강도섬유를 사용한 오탕방지막에 대한 개념 설계를 수행하고, 구조적 안정성 및 경제적 효율성을 평가하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 해양예보기술 실용화로 현업기관의 상시 운영 및 해양예보에 활용.
 - 재난사고 발생 시 즉각적인 현장관측/예측자료 지원.
 - 유류오염/실종자 발생 시 신속한 방제/구난 활동의 의사결정 지원.
 - 연안재해 사전예측 정보의 적시 제공.
- 본 연구과제를 통하여 수정, 개선된 FUNWAVE-TVD 모형은 Delaware 대학의 모델 개발팀과 공유하였으며, 현재 공개되어 있음.
(<https://fengyanshi.github.io/build/html/index.html>)
- 개선된 FUNWAVE-TVD 모형과 KOOS를 연계하여 부산항 내에서의 파고를 예측할 수 있는 시스템에 추가적인 개선과 보완을 통하여 부산항 외에 다른 항에도 적용할

계획임.

- 수중생존자 탐지형 청음시스템
 - 침몰 선박에 초기 생존자 확인 및 구축 계획에 지원.
 - 실시간 음성신호 복조 기술 확보로 수중통신 기술에 활용.
- 본 연구를 통하여 개발된 부유식 파랑저감장치는 해상공사에서 긴급한 설치를 통해 파랑저감효과를 거두고자 할 경우에 활용이 가능.

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경 및 필요성	1
제 2 절 연구목적 및 범위	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	7
제 1 절 국내 현황	7
제 2 절 국외 현황	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제 1 절 해양환경요소 통합지원 기술 개발	15
1. 실시간 통합해양환경 정보제공 시스템	15
2. 고해상도 예측 시스템	29
3. 유출유 및 표류체 이동 예측 시스템	69
제 2 절 연안·항만 파랑 및 폭풍해일재해 위험도 분석평가 기술 개발	89
1. 파랑 및 폭풍 해일 모델 구축 및 개선	89
2. 파랑 및 폭풍해일 장기예측	124
제 3 절 극한환경극복 대응기술 개발	167
1. 수중 생존자 탐지형 청음시스템	167
2. 신속 설치형 부유식 파랑저감 구조물	181
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	221
제 1 절 연구개발목표 달성도	221
제 2 절 대외기여도	222

제 5 장 연구개발결과의 활용계획	224
제 6 장 참고문헌	226

그 립 목 차

그림 2.2.1 미국 NOAA의 nowCOAST	10
그림 2.2.2 RIB의 개념도 및 실험실 실험 모습	14
그림 3.1.1 기상청 종관관측 현황	19
그림 3.1.2 관측자료 처리 프로세스	20
그림 3.1.3 예측자료 처리 프로세스	22
그림 3.1.4 Web 기반 표출 시스템 구축 개념도	22
그림 3.1.5 실시간 관측 및 예측자료 처리 프로세스 개요	23
그림 3.1.6 웹 표출 체계 개요	23
그림 3.1.7 실시간 해양환경정보제공시스템 사용자 화면	24
그림 3.1.8 관측자료 표출화면	24
그림 3.1.9 수온 및 해류 예측자료 표출화면	25
그림 3.1.10 지점별 예측자료 표출화면	25
그림 3.1.11 수색계획 수립지원 시스템 수립 모식도	26
그림 3.1.12 (a) 실시간 해양환경정보제공시스템과 방제 및 수색구조 수립 지원시스템의 연동, (b) 사용자 연동 표류체 이동예측 시물레이션	27
그림 3.1.13 표류물의 종류 선택 옵션	27
그림 3.1.14 표류예측 모델의 종류 및 기타 선택 옵션	28
그림 3.1.15 방제계획 수립 지원시스템의 사용자 연동 메뉴	28
그림 3.1.16 방제계획 수립 지원시스템의 사용자 입력 정보 메뉴	28
그림 3.1.17 KOOS 예측 모델 모식도	29
그림 3.1.18 KOOS 연안 예측 시스템(MOHID)의 개요도	30
그림 3.1.19 사고 위치 및 관측 위치	31
그림 3.1.20 Buoy (a)와 ADCP (b)의 표층 유속 scatter plot	31
그림 3.1.21 격자 해상도에 따른 모의영역	33
그림 3.1.22 조위 검증 결과	33
그림 3.1.23 300 m 해상도의 낙조시 조류 결과	34

그림 3.1.24	사고해역에서의 해상도에 따른 모델 결과의 비교	35
그림 3.1.25	MOHID 모듈에 대한 동수역학 모듈 모식도	37
그림 3.1.26	고해상도 연안순환예측 시스템의 개념도 (L1 - L4)	43
그림 3.1.27	남해안 300m 격자의 조위 및 유속, 유향 예측 결과의 예	44
그림 3.1.28	남해안 300m 격자의 수온 및 유속, 유향 예측 결과의 예	44
그림 3.1.29	남해안 300m 격자의 염분 및 유속, 유향 예측 결과의 예	45
그림 3.1.30	전 연안 300m 해상도 파랑 예측 시스템 영역 및 결과	45
그림 3.1.31	부산항 인근 고해상도 예측 시스템 격자 영역	46
그림 3.1.32	부산항 인근 고해상도 예측 시스템 결과	47
그림 3.1.33	FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역(□)과 수심도	47
그림 3.1.34	SWAN 모형의 계산영역과 수심도	48
그림 3.1.35	K1 정점에서 SWAN 모형 결과와 관측치 비교	49
그림 3.1.36	FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 불규칙파 모의 결과	50
그림 3.1.37	부산항 내측의 관측정점	50
그림 3.1.38	부산항 내측의 세 정점에서 관측치와 비교한 결과	52
그림 3.1.39	장목항 인근 고해상도 예측 시스템 격자 영역	53
그림 3.1.40	장목항 인근 조위 검증 결과 예	53
그림 3.1.41	장목항 인근 조류 검증 결과 예	53
그림 3.1.42	태풍 차바의 경로(좌)와 우리나라 통과시 위성사진(우)	54
그림 3.1.43	태풍 차바 모의시 모의 영역	55
그림 3.1.44	태풍 차바 분석에 사용된 관측정점 위치	55
그림 3.1.45	태풍 차바시 거문도, 거제도, KOGA S02, 포항에서의 관측 결과(유의과고)	56
그림 3.1.46	태풍 차바시 거문도, 거제도, KOGA S02에서의 관측과 모델결과 비교(유의과고)	56
그림 3.1.47	태풍 차바 통과시 감천항, 다대포항 인근에서의 파랑 모의 결과(유의과고)	57
그림 3.1.48	파랑모델과 순환모델 연계 개요도	58
그림 3.1.49	KOOS 시스템의 300 m 격자도와 구축한 비구조 격자 예	59

그림 3.1.50 바람의 정의	62
그림 3.1.51 Flexible mesh 생성 예	63
그림 3.1.52 기존 부산항 예측 시스템의 정방격자와 Flexible mesh	64
그림 3.1.53 유동모델 결과 (유속, 유향)	64
그림 3.1.54 D-flow 격자망도	65
그림 3.1.55 조위 검증 시계열	66
그림 3.1.56 관측치와 모델치 일대일 분포	66
그림 3.1.57 조위 검증 결과	67
그림 3.1.58 (a) WRF 모델 바람의 예(2016. 10. 5. 6시), (b) WRF 모델 기압의 예(2016. 10. 5. 6시)	67
그림 3.1.59 DFLOW-FM 모형 기압 적용의 예 (2016. 10. 5. 6시)	68
그림 3.1.60 실험안 별 수위 예측 예(부산항 검조소)	68
그림 3.1.61 마린시티 침수구역 범위	69
그림 3.1.62 국립해양조사원 S02 정점에서의 모델결과와 관측결과의 시계열(좌)과 조화상수(우) 비교(8월)	70
그림 3.1.63 국립해양조사원 S02 정점에서의 모델결과와 관측결과의 시계열(좌)과 조화상수(우) 비교(1월)	70
그림 3.1.64 유동모델 결과(유속), 2016년 9월 1일 10시(좌), 2016년 9월 14일(우)	72
그림 3.1.65 기상모델 결과(바람), 2016년 9월 1일 10시(좌), 2016년 9월 14일(우)	72
그림 3.1.66 2016년 9월 14일 소돌 해변부터 9월 1일까지의 역추적 결과	73
그림 3.1.67 방제활동에 따른 유류확산 예측	74
그림 3.1.68 연포 정점에서부터 1개월 역추적 결과	75
그림 3.1.69 입자경로와 바람장 (7월 1일(좌), 7월 6일(우))	76
그림 3.1.70 마검포, 만리포, 기지포, 연포에서 타르볼 발견 시점부터 6월 18일 15시 까지의 역추적 결과	76
그림 3.1.71 실험에 사용된 부이(좌) 및 드로그(우)	78
그림 3.1.72 표류부이 투하 시 및 투하 후 표류 모습	78

그림 3.1.73	표류부이 이동경로 (2015년 6월 17일 - 11월 3일)·····	79
그림 3.1.74	부이 표류 모습, AWAC 사진 및 설치 위치·····	80
그림 3.1.75	표류부이 이동경로 (2015년 10월 16일 ~ 11월 3일)·····	80
그림 3.1.76	부이 모양 및 투하 모습·····	81
그림 3.1.77	부이 투하 위치(좌)와 이동경로(우)·····	82
그림 3.1.78	표류부이 이동 경로·····	83
그림 3.1.79	기상 모델 검증 결과·····	83
그림 3.1.80	표류부이에 대한 모델(파란색)과 실험(자주색) 결과의 비교·····	84
그림 3.1.81	L31 부이에 대한 모델(파란색)과 실험(자주색) 결과의 비교·····	84
그림 3.1.82	L32 부이에 대한 모델(파란색)과 실험(자주색) 결과의 비교·····	85
그림 3.1.83	현장실험 결과를 이용한 예측모델의 비교 검증의 예·····	85
그림 3.1.84	aqua drift buoy의 궤적·····	86
그림 3.1.85	표층 두께에 따른 바람계수 차등적용 결과 비교·····	87
그림 3.1.86	모델자료와 HF Radar 유속자료를 결합한 표류예측결과 정확도 향상···	88
그림 3.2.1	수심도·····	94
그림 3.2.2	수리실험 관측치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 수치해와 비교(case M3)·····	95
그림 3.2.3	개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 36.4 s 간격으로 계산된 무차원 파고 분포·····	96
그림 3.2.4	개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 36.4 s 간격으로 계산된 wave-induced currents·····	96
그림 3.2.5	FUNWAVE-TVD 버전 2.1 모형의 36.4s 간격으로 계산된 wave-induced currents·····	97
그림 3.2.6	수리실험 관측치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 수치해와 비교(case N5)·····	98
그림 3.2.7	개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 260 (s) 동안의 계산된 무차원된 파고와 wave-induced currents 분포(case N5)·····	98
그림 3.2.8	Luth et al.의 실험·····	99
그림 3.2.9	Case A에 대한 수리모형 실험치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 비교	

.....	100
그림 3.2.10 Case C에 대한 수리모형 실험치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 비교	101
그림 3.2.11 Thacker의 정확해에 의한 초기조건.....	102
그림 3.2.12 Thacker의 정확해와 수치해의 비교 결과.....	103
그림 3.2.13 수면변위의 초기조건.....	104
그림 3.2.14 Nesting 기법을 사용하였을 때 시간에 따른 수면변위 결과.....	104
그림 3.2.15 수심분포와 nested domain을 이용한 실험안.....	105
그림 3.2.16 Nested domain과 함께 내부조파 방법을 이용한 파랑 전파 모의.....	105
그림 3.2.17 FUNWAVE-TVD 모형의 모의영역(□) 및 수심도, 074124 격자점의 위치	106
그림 3.2.18 SWAN 모형과 FUNWAVE-TVD 모형 결과의 비교.....	107
그림 3.2.19 부산항 내측의 세 정점에서 관측치와 비교한 결과.....	108
그림 3.2.20 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 불규칙파 모의 결과.....	109
그림 3.2.21 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 유의파고 계산 결과.....	109
그림 3.2.22 부산 해운대 해역의 국립해양조사원 부이 위치와 관측치.....	110
그림 3.2.23 FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역(□)과 수심도.....	111
그림 3.2.24 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포.....	112
그림 3.2.25 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m, T_{peak} = 6s, \theta_{peak} = 190^\circ$).....	113
그림 3.2.26 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m, T_{peak} = 13s, \theta_{peak} = 190^\circ$).....	113
그림 3.2.27 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m, T_{peak} = 6s, \theta_{peak} = 180^\circ$).....	114
그림 3.2.28 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m, T_{peak} = 13s, \theta_{peak} = 180^\circ$).....	114
그림 3.2.29 제주 월정리 해역의 파고, 주기, 파향의 관측위치 (P1).....	115
그림 3.2.30 제주 월정리 해역 P1 지점에서의 파랑 관측치.....	115

그림 3.2.31 제주 월정리 해역의 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 수면변위 결과	116
그림 3.2.32 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 계산된 유의파고(좌)와 연안류(우)	117
.....	
그림 3.2.33 Shock capturing scheme을 이용한 shallow water equations 결과와 Thacker의 정확해와 비교	118
그림 3.2.34 고립파의 Run-up과 run-down 실험	120
그림 3.2.35 Forced wave와 free wave의 전파, 변형 과정	121
그림 3.2.36 $x=2500$ m를 통과하는 파랑의 단면 비교	121
그림 3.2.37 경사수심에서 대기압의 이동속도에 따른 파랑의 전파 변형과정 비교	122
그림 3.2.38 증폭된 파랑의 run-up 비교	123
그림 3.2.39 Froude number에 따른 최대 run-up 비교	123
그림 3.2.40 기간에 따른 ECMWF 자료의 격자망	126
그림 3.2.41 일본기상청 태풍자료(RSMC)와 수치기상모델(ECMWF)의 태풍중심기압의 비교	128
그림 3.2.42 10km 해상도의 자료 생산 영역 및 지형 고도(m)	131
그림 3.2.43 자료동화에 사용된 지상관측자료 station 위치 예. 고층기상관측(좌), 지상기상관측(중간), 부이기상관측(우)	132
그림 3.2.44 자료동화에 사용된 12.5 km 해상도의 ASCAT 위성 해상풍 관측지점. 낮 시간(좌), 밤시간(우)	132
그림 3.2.45 3DVAR 자료동화 방법에 대한 개요	133
그림 3.2.46 역학적 규모축소법 및 자료동화 시스템의 적용	134
그림 3.2.47 기상청 해양기상부이의 위치도	135
그림 3.2.48 Nested Grid System	137
그림 3.2.49 태풍 해상풍 모델의 결과 예 (2012년 태풍 볼라벤 시)	138
그림 3.2.50 1/12도의 파랑모델 격자망	141
그림 3.2.51 격자해상도에 따른 결과 비교를 수행한 격자점	146
그림 3.2.52 연안격자점에서의 격자해상도에 따른 산출결과의 비교	146
그림 3.2.53 제주도 주변 격자점에서의 1/6도, 1/12도 격자간격의 결과 비교	147
그림 3.2.54 대마도 주변 격자점에서의 1/6도, 1/12도 격자간격의 결과 비교	147

그림 3.2.55 한반도 주변의 ECMWF모델과 WRF모델의 바람장 비교	148
그림 3.2.56 동해부이 관측 자료와 기상모델 결과 비교	149
그림 3.2.57 묵호에서의 파랑모델 결과 비교	150
그림 3.2.58 ECMWF와 WRF모델결과의 관측자료와의 비교 (2013년 12월)	152
그림 3.2.59 ECMWF와 WRF모델결과의 관측자료와의 시간별 비교	156
그림 3.2.60 16개 방향별 비태풍시(왼쪽)과 태풍시(오른쪽) 최대파랑의 비교	158
그림 3.2.61 16개 방향별 태풍시와 비태풍시 최대파랑의 차이	162
그림 3.2.62 년 최대파랑의 년변화율(cm/year)	164
그림 3.2.63 년 최대파랑의 년변화율 (a) 비태풍시, (b) 태풍시	165
그림 3.3.1 수중 생존자 탐지형 청음 시스템 개념도	167
그림 3.3.2 부착형 수중청음센서와 수중통신모뎀 장치 구성도	167
그림 3.3.3 부착형 수중청음기(상), 수중통신모뎀장치(하) 실물 사진 및 장치 사양	168
그림 3.3.4 장비 구동방법 diagram	169
그림 3.3.5 부착형 수중청음 가시화 프로그램	170
그림 3.3.6 수중 음향 통신 시험장치 가시화 프로그램	170
그림 3.3.7 시제품 시험 결과	171
그림 3.3.8 수중 생존자 청음시스템 운용 개념	172
그림 3.3.9 부착형 수중청음기 기구물 형상	173
그림 3.3.10 청음시스템 Block Diagram	173
그림 3.3.11 수중통신부이 Block Diagram	174
그림 3.3.12 신호정보처리기 성능 및 실험 사진	174
그림 3.3.13 청음시스템 음성 복조 시험 결과	175
그림 3.3.14 수중청음시스템 시제품 개발 완료	175
그림 3.3.15 수중청음시스템 시제품 현장실험용 기구 설계 및 제작	176
그림 3.3.16 음향 신호 수조실험 전경	177
그림 3.3.17 “살려주세요” 음향 신호 수조실험 결과	177
그림 3.3.18 타격음 신호의 수조실험 결과	178
그림 3.3.19 현장 실험 모식도	178
그림 3.3.20 수중청음시스템 시제품 현장 해상실험 해역 및 현장 사진	179

그림 3.3.21 “살려주세요” 음향 신호 해상실험 결과	180
그림 3.3.22 타격음 신호의 해상실험 결과	180
그림 3.3.23 해상 군사작전을 위한 RIB 개발	182
그림 3.3.24 RIB의 개념도	182
그림 3.3.25 RIB 실험역 실험 전경	182
그림 3.3.26 평면수조에서의 RIB 실험 모습	183
그림 3.3.27 XM99 모형의 실험역 실험	183
그림 3.3.28 Hydro RIB 모형	184
그림 3.3.29 Hydro RIB 실험역 설치 모습	184
그림 3.3.30 XM2000 모형의 실험역 실험에 의한 파랑저감 효과	184
그림 3.3.31 XM2001 모형의 설치 장면	185
그림 3.3.32 XM2001 모형의 이송 방법	185
그림 3.3.33 XM2001 모형의 해수 펌프 밸브 구조	185
그림 3.3.34 OpenFOAM 기능 구성	188
그림 3.3.35 2차원 조파 테스트 해석 영역	189
그림 3.3.36 소파구간(relaxation zone) 설정 및 조파 결과	189
그림 3.3.37 조파된 파고 비교	190
그림 3.3.38 2차원 조파 테스트 해석 영역 설정	190
그림 3.3.39 감쇠계수 분포	191
그림 3.3.40 자유수면 분포	191
그림 3.3.41 RIB 수리실험 개념도	192
그림 3.3.42 RIB 수치해석 영역 개념도	193
그림 3.3.43 RIB 수치해석에 의한 수면변위 모습	193
그림 3.3.44 RIB 구조물 전면에서의 정수압 분포	193
그림 3.3.45 RIB 구조물 전면에서의 동수압 분포	194
그림 3.3.46 Briggs et al. (2001) 실험자료와 비교 결과	194
그림 3.3.47 Briggs et al. (2001) 실험자료 및 WAMIT과 전달률 비교	195
그림 3.3.48 RIB 계류 라인 구성	196
그림 3.3.49 해석영역 격자 구성	197

그림 3.3.50 RIB 운동해석에 따른 파고 비교	197
그림 3.3.51 RIB 운동해석에 따른 3축 방향 운동량 비교	198
그림 3.3.52 투과성 특성 변화에 따른 파고 비교	198
그림 3.3.53 투과성 특성 변화에 따른 수면변위 비교	199
그림 3.3.54 고강도섬유를 이용한 부유식 파랑저감장치 개념도	200
그림 3.3.55 수리실험에 사용된 고강도섬유 막체 및 부력통 모습	201
그림 3.3.56 단면 조파수조 내 실험모형 설치 모습	202
그림 3.3.57 실험과 주기에 따른 파랑저감장치 전달율	203
그림 3.3.58 오탉방지막의 개념도	205
그림 3.3.59 오탉방지막 변형 개념도	213
그림 3.3.60 이중 오탉방지막 구조	213
그림 3.3.61 신형식 부유식 다중 오탉방지막 구조도	214
그림 3.3.62 부유식 다중 오탉방지막 장치 Joint Bracket 정면도	214
그림 3.3.63 부유식 다중 오탉방지막 장치 상세도	218

표 목 차

표 1.2.1 연차별 연구목표 및 주요 내용.....	3
표 3.1.1 관측자료 일람.....	15
표 3.1.2 국립해양조사원의 조위관측소 목록.....	16
표 3.1.3 조위 관측 요소별 단위.....	17
표 3.1.4 국립해양조사원 - 해양관측부이 지점목록.....	18
표 3.1.5 기상청 부이 지점 정보.....	20
표 3.1.6 수집 예측자료 일람.....	21
표 3.1.7 FUNWAVE-TVD 모형의 실험안.....	49
표 3.1.8 순환 모델과 파랑 모델 상호작용 모듈 흐름 순서.....	58
표 3.1.9 시나리오 상세 내용.....	74
표 3.1.10 부이 사양.....	78
표 3.1.11 부이 사양.....	81
표 3.1.12 표류부이 투하 위치.....	82
표 3.2.1 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 검증에 사용한 Vincent and Briggs 실험안	94
표 3.2.2 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 검증에 사용한 Luth et al.의 실험안.....	99
표 3.2.3 SWAN 모형과 FUNWAVE-TVD 모형에서 계산된 파고 결과 비교.....	107
표 3.2.4 FUNWAVE-TVD 모형의 실험안.....	111
표 3.2.5 ECMWF 재분석 자료의 기간별 해상도.....	127
표 3.2.6 해역별 격자점에서의 기상모델 자료에 따른 년최대풍속의 년변화율.....	129
표 3.2.7 역학적 규모축소법에 사용된 WRF 모델의 개요.....	131
표 3.2.8 2014년 상세 과거 기후 자료와 관측자료의 비교 분석 결과.....	135
표 3.2.9 ECMWF Interim 파랑자료의 년별 지점별 CF 값.....	145
표 3.2.10 ECMWF와 고해상도 바람 자료의 비교.....	150
표 3.2.11 파랑모델 결과의 오차 비교.....	150
표 3.2.12 ECMWF와 WRF 모델결과의 관측치와의 비교 (전체 자료).....	154

표 3.2.13 ECMWF와 WRF 모델결과의 관측치와의 비교 (최고풍속시).....	154
표 3.2.14 WRF 모델결과에 의한 파랑산출 결과와 관측치와의 비교 (최고파랑시).....	157
표 3.3.1 Sea State의 정의.....	181
표 3.3.2 실험과 조건.....	202
표 3.3.3 실험파별 전달율 평가 결과.....	203
표 3.3.4 오탉방지막 앵커 형식.....	206
표 3.3.5 오탉방지막 막체 시방서 기준.....	207
표 3.3.6 오탉방지막 막체 품질기준 사례.....	207
표 3.3.7 해역별 오탉방지막 설치사례 분석 결과.....	211
표 3.3.8 파랑별 오탉방지막 구조성능 및 경제성 검토.....	212
표 3.3.9 부유식 다중 오탉방지막 표준 규격.....	217
표 4.1.1 연구개발목표 달성도.....	221

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경 및 필요성

1. 배경 및 필요성

국가는 경제 및 공공안전과 환경에 대한 국가적 책임을 강화해야하는 시대적 흐름에 직면하고 있다. 태풍, 해일 등의 자연재해, 선박침몰 사고와 같은 대형 해양 재해재난 발생 시 신속하고 체계적인 대응체계 마련은 필수적이다. 또한 우리나라는 수입원유의 전량이 해로를 통하여 들어오기 때문에 상시 유류유출 사고 위험에 노출되어 있다. 따라서 유류 또는 유해물질 유출사고 발생 시 유해물질 이동·확산의 예측 수행과 함께 최적의 방제계획을 수립 지원을 할 수 있는 시스템을 필요로 하며, 해난사고 발생 시 표류자 및 표류체 이동을 신속하게 예측하고, 수색구조 계획을 수립할 수 있는 실시간 예측정보제공시스템의 개발을 필요로 한다. 이를 위해선 해양재해 요소에 대한 고해상도 예측 수치모델링 시스템을 도입하여 실시간 해양 관측망, 원격탐사 등과 연계된 해양환경 현황 및 과학적 예측정보를 적시적소에 제공할 수 있는 체계적인 해양 재해재난 현장지원시스템이 필요하다.

또한 우리나라의 유류유출 사고는 최근 10년간 연평균 약 390건이며, 대부분의 사고들이 중소형 규모이지만, 유류사용의 증가와 운반의 대형화로 인하여 허베이스피리트호와 같은 대형 유류사고의 발생가능성이 높아지고 있기 때문에 정확한 유류확산 예측은 해양환경오염 사고 발생시 2차적인 피해를 최소화하기 위해 반드시 필요하며 이는 대형사고 위험성이 점차 증가되어가고 있는 현시점에서 그 중요성이 크게 대두되고 있다. 특히 최근 10년간 우리나라 해역 내에서 발생한 해양사고 중 선박사고는 연평균 약 1,600건, 인명사고는 약 11,000건으로 이 중 매년 100여명이 실종 또는 사망하고 있다. 이러한 선박사고 시 촌각을 다투는 수색구조 작업이 필요하므로 수색 및 구조에 필요한 정확한 위치 파악 및 작업 기준이 필요하기 때문에 사고 해역에 대한 관측 및 예측자료의 통합지원시스템은 반드시 필요하다.

이를 위하여 우리나라 전 해역의 실시간 해양관측자료 중 선박의 안전운항과 관련된 모든 요소의 실시간 수집, 사용자별 목적에 적합한 자료표출 및 전달시스템을 개발하여 선박의 안전운항 및 선박사고 발생 시 즉각 지원이 가능한 실시간 해양환경 통합관측시

시스템 및 고해상도 예측시스템을 구축할 필요가 있다.

또한, 해난 사고 발생 시, 선체 내부의 생존자 탐지는 구조 활동의 성패를 좌우하는 주요 인자가 된다. 생존자 탐지를 위하여 선체 외벽에 수중청음기를 부착하여 내부에서 발생하는 생존자의 소리를 청음함으로써 생존여부 및 생존자의 위치를 확인하고 신속한 구조활동을 지원할 수 있는 수중 생존자 탐지형 청음시스템의 개발이 필요하다.

최근 지구온난화 등 기후변화에 의한 해수면의 상승과 태풍의 강도변화 및 이상파랑의 발생 등으로 우리나라 연안에서 자연재해가 증가하는 추세이다. IPCC 5차 보고서에 따르면 전 지구 평균 해수면 상승이 점차 증가하고 있으며, 전 지구 해양에서 관측된 파고의 변화 경향이 북반구에서 증가 추세를 보이고 있다. 전 지구적인 기후변화 재해요인에 대한 연구는 많이 수행되어 왔지만, 기후변화가 우리나라 연안에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다. 이에 대응하기 위하여 해양기인 재해요소 가운데 가장 영향이 큰 파랑 및 폭풍해일에 대한 정밀 해상도의 예측시스템의 개발을 필요로 하고 있다. 또한 태풍 등 이상파랑에 의한 단기적인 재해요인과 기후변화에 의한 장기적인 재해요인의 예측을 통해, 시·공간적 재해위험도를 평가함으로써 과학적이고 체계적으로 대처할 수 있는 해양재해 예측 및 관리 시스템 개발도 절실히 요구된다.

연안 및 항만에서의 파랑은 복잡한 지형과 연안구조물의 영향을 받기 때문에 해양 재해 요소에 대한 수십 m 정밀격자에서의 예측기술을 필요로 한다. 또한 정밀격자에서의 파랑예측을 기반으로 하여 최적 설계에 의한 항만 공사비의 절감과 방파제 등의 연안 구조물의 피해를 저감시킬 수 있다. 연안에서는 파랑의 비선형성이 크게 나타나므로 이러한 비선형성을 고려한 파랑-흐름-해일 등의 복합적 해석이 가능한 모델의 구축을 필요로 한다. 최근에는 해수면의 상승 등으로 인하여 방파제에서 발생하는 처오름과 월파에 의한 인명사고가 빈번히 나타나는데, 이러한 사고를 줄이기 위하여 입사파랑에 따른 처오름과 월파의 정확한 예측을 요구한다.

해상에서의 파고를 크게 저감할 수 있는 신속 설치형 파랑저감 장치를 개발함으로써 선박 사고 등 해상 위급상황 및 해상 군사작전의 대응능력을 높이고 다양한 용도로 활용할 수 있다. 특히, 해상재난이 발생한 현장의 극한조건에서도 인명구조의 시도는 이루어져야하기 때문에 짧은 시간 내에 신속하게 설치하여 파랑에너지를 효율적으로 저감할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

제 2 절 연구목적 및 범위

본 과제는 국가 해양 재해재난 방지를 위한 실시간 해양환경 관측, 예측정보 산출 및 극한환경 극복 대응 기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 2015년 1월에 착수하여 2017년 12월까지 3년간 수행되었으며, 연차별 연구목표 및 주요 내용은 표 1.2.1과 같다.

표 1.2.1 연차별 연구목표 및 주요 내용

구 분	연구목표	연구내용
1차년도	해양환경요소 통합지원 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실시간 통합 해양환경정보제공 시스템 개발 - 해양관측 및 해양예측자료 실시간 수집체계 구축 - 자료 DB 구축 및 GIS기반 사용자연동 UI 개발 ○ 고해상도 연안해역 예측시스템 구축 및 개선 - 해양환경 요소의 고해상도(2km) 연안해역 예측시스템 구축 - 연안해역 예측모델 최적화 연구 ○ 유류유출 이동확산 예측 및 표류체 이동 예측 기술 개발 - 예측 모델의 검증 및 개선 - 현장 실험 5회 수행
	연안·항만의 파랑 및 폭풍 해일 재해 위험도 분석 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 파랑 및 폭풍해일 모델 구축 - 항만 내 고해상도 격자시스템 구축 ○ 비선형 천해파랑 변형모형 구축 - FUNWAVE-TVD 모형의 개선 - FUNWAVE-TVD 모형과 SWAN 모형과의 연계
	극한 환경 극복 대응 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생존자 탐지형 청음시스템 - 국내외 관련 기술 및 연구동향 파악 - 생존자 탐지형 청음시스템 모듈 설계 및 수치모델 구축 ○ 신속설치형 부유식 파랑저감 장치 개발 - 개발 장치의 개념 디자인 도출 및 예비 모델링 수행

구 분	연구목표	연구내용
2차년도	해양환경요소 통합지원 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실시간 통합 해양환경정보제공 시스템 개발 - 사용자 중심 최적 표출방안 및 자료배포 환경 제작 - 표류체 이동 예측기술 고도화 - 해양환경정보제공 시스템 서비스 체계 구축 (외부 IDC 센터에 서버 구축) - 축기지 해양물리환경 관측 ○ 고해상도 연안해역 예측시스템 개선 및 고도화 - 남해안 300 m 순환 예측 시스템 구축 - 계산속도 향상 및 정확도 향상 - 남해안 이상고온 현상 재현 ○ 유류유출 이동확산 예측 및 표류체 이동 예측 기술 고도화 - 오염물 분류/요소별 인자값 DB 구축 - 현장(부표) 실험 7회 수행 - 바람 세기에 따른 바람계수 식 산정 - 제주 원목 유실 사고 등 표류 예측 및 유류확산예측 지원 - 북한 홍수 피해로 인한 쓰레기 이동 경로 역추적
	연안·항만의 파랑 및 폭풍 해일 재해 위험도 분석 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 파랑 및 폭풍해일 모델 개선 - 전 연안 300m 해상도 파랑예측 시스템 구축 - 부산항 인근 고해상도 폭풍해일 예측 시스템 구축 - 태풍 차바시 태풍 파랑 및 폭풍해일 계산 ○ 항만구조물 설계기준 산출기술 개발 - FUNWAVE-TVD 모델의 개선 - FUNWAVE-TVD 모델을 이용한 천해설계파 산출 및 스펙트럼모델의 결과와 비교 - FUNWAVE-TVD 모델을 이용한 제주 월정리 해역의 파랑 전파, 변형 및 연안류 모의 - 대기압의 영향을 고려한 파랑의 전파, 변형 모의

구 분	연구목표	연구내용
2차년도	극한 환경 극복 대응 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수중 생존자 탐지형 청음 시스템 <ul style="list-style-type: none"> - 청음시스템의 구성요소별 회로설계 개선완료 - 수중청음시스템 가시화 S/W 제작 완료 - 수중청음시스템 구성요소 업그레이드 및 통신부이 설계 및 제작 완료 ○ 신속설치형 부유식 파랑저감 장치 최적설계 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 개발 장치 성능 평가를 위한 CFD 및 수리실험 수행

구 분	연구목표	연구내용
3차년도	해양환경요소 통합지원 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고해상도 연안해역 예측 시스템 시범운영 및 고도화 - 고해상도 연안해역 예측시스템 성능 평가 및 정확도 개선 - 비구조 격자 적용 연안 정확도 향상 검토 ○ KOOS와 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 부산항의 파랑 예측 시스템 개발 ○ 해난사고 (유류유출/수색구조)시 방제·수색구조 수립 지원 시스템 구축 - 전 연안 300 m 예측 시스템 연동된 유출유 이동확산 예측 - 표류체 이동예측 시뮬레이션 및 표출기술 개발
	연안·항만의 파랑 및 폭풍 해일 재해 위험도 분석 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과거 및 기후예측자료에 기반한 장기 예측 - 과거 태풍에 대하여 비구조 격자를 이용한 폭풍해일 모델 시스템 구축 ○ 파랑 재해위험도 평가 ○ SWAN, FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 적용 - 반폐쇄 내만에서의 설계파 실험 ○ FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 해운대 이안류 수치모의 ○ FUNWAVE-TVD 모형의 개선 : Nesting 방법의 적용
	극한 환경 극복 대응 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수중 생존자 탐지형 청음시스템 - 수중청음시스템 시제품 제작 완료 - 수중청음시스템 해상시험 및 검증 완료 ○ 신속설치형 부유식 파랑저감 장치 개발 - 개발 장치 성능 평가를 위한 CFD 및 수리실험 추가 수행

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 현황

한국해양과학기술원에서는 해양관련 국가기관, 산업체 등에서 요구하는 각종 해양활동 및 연안재해 등의 해양에서 발생하는 현안문제 해결을 위하여 해양현황과 예측정보를 생산·제공하는 시스템인 운용해양예보시스템의 1단계 연구(2009-2013)를 수행하였다. 그 성과로 우리나라 연안과 주변 해역에 대한 해양환경 현황과 72시간 예측정보 생산시스템 KOOS (Korea Operational Oceanographic System)을 개발·운영하게 되었으며, 현재 2단계 연구(2013-2018)에서 운용해양예보시스템의 고도화 연구가 진행 중에 있다.

운용해양예보시스템을 이용하여 대형 해난사고 및 연안재해 등 국가 현안문제 발생 시 적시에 해양예측정보를 제공할 수 있으며, 천안함 침몰 사건(2010. 3) 및 링스헬기 추락 사고(2010. 4), 금양호 사고(2010. 4), 통영 욱지도 해상 어선 침몰사고(2011. 1), 발해만 유류유출 사고(2011. 7), 아시아나 화물항공기 추락사고(2011. 8), 전남 신안 만재도 어선 침몰사고(2011. 12), 울산 간절곶 어선 침몰사고(2011. 12), 인천 자월도 유류운반선 폭발 사고(2012. 1) 등 수색구조 작업을 위한 해양예측 정보 및 표류체 위치 예측정보를 해양경찰청을 포함한 유관기관에 제공한 바 있다.

특히 2014년 4월 16일 여객선 세월호 침몰사고 발생 이후 운용해양예보시스템을 이용하여 사고현장해역의 해상상태 현황 및 예측정보를 생산, 제공하였으며, 희생자의 수색구조를 위한 표류위치 예측정보를 생산하여 범정부 사고대책본부 등 관련 기관에 지속적으로 제공, 지원한 바 있다.

한국해양과학기술원에서는 항만구조물 설계자동화 시스템 개발연구(2000-2005), 해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산(2006-2010), 국가어항 외곽시설(방파제 등) 설계과 검토 및 안정성 평가(2009-2012), 전국 심해설계과 산출 연구(2013-2015) 등을 수행하였으며, 추산된 심해설계과의 결과를 이용하여 전국 무역항 및 연안항과 국가어항에 대한 불규칙 천해파를 산출한 바 있다.

또한 1987-1991년에 부이식 파랑파고계를 기반으로 하는 표준파랑관측소와 수압식 파고계를 기반으로 한 보조파랑관측소를 구축하였고, 1991-2004년에는 파랑관측시스템을 운영하고 파랑모델을 수립하고 관측자료를 활용한 검증 및 개선 연구를 수행하였다. 이러한 연구를 바탕으로 25년간의 연속된 모델 산출과 52년간의 태풍파랑 산출을 수행하여,

2005년에 전국 해역 심해설계파를 산출한 바 있으며, 2013-2015년에는 비정상 극치분석을 통해 기후변화를 고려하는 설계파를 산출하는 연구를 수행하고 있다.

2003-2005년에 기상청 연구사업인 “국지연안파랑 예측시스템 시범구축”을 수행하여 WaveWatch III 모델을 기반으로 우리나라 주변해역과 연안에서 각각 1/12도와 1/120도의 격자로 파랑예측시스템을 수립함으로써 기상청의 파랑수치예보를 현업화하는 데 기여하였다. 2007-2009년에는 “연안 국지해일 정밀예보 지원체제 현업화 기술”을 수행하면서 폭풍해일모델을 독자적으로 개발하였으며, 우리나라 연안에서 300m의 정밀격자로 폭풍해일을 예측하는 시스템을 수립하여 국립해양조사원에서 폭풍해일 예보를 현업화하는 데 기여하였다.

“해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산”(2006-2010)과 “국가어항 외곽시설 설계파 검토 및 안정성 평가”(2009-2012)에서는 2005년에 산출된 심해설계파를 기준으로 무역항과 연안항 및 국가어항에서의 천해설계파를 산출하여 안정성을 검토하는 사업을 수행하였으며, SWAN모델을 이용한 천해설계파를 산출하면서 모델의 경계에서 16개 방향의 심해설계파를 격자점에 따라 다르게 주어지도록 하는 방법을 최초로 시도하였다. 또한 어항의 천해설계파 산출시에는 반폐쇄만의 경우에 대해서 심해설계파를 천해변환하여 천해설계파를 산출하는 방법 이외에 극치를 나타내는 사상에 대해 천해파를 산출하여 이를 극치분석하여 천해설계파를 산출하는 방법을 최초로 시도하였다.

태풍파랑 및 이상고파랑에 대한 예측기술과 천해에서의 파랑변형 및 월파의 현장관측과 예측기술의 개발에 대한 연구가 다양하게 시도되어 왔는데, 한국해양과학기술원은 2013-2014년에 “재해성 파랑의 특성분석 및 예측기술 연구”를 통해 태풍파랑과 동해안 이상파랑 등 재해 위험도가 높은 현상에 대한 이해와 예측기술 향상을 목표로 연구를 수행한 바 있으며, 태풍시와 같이 강한 풍속하에서 파랑모델의 파고의 과다산정 경향을 해결하기 위해 마찰계수가 풍속에 비례하여 무한히 커지는 기존 방정식을 사용하지 않고 제한된 마찰계수를 갖도록 조정함으로써 태풍시의 파랑산출을 개선하였다.

천해에서의 파랑변형은 스펙트럼 모델인 SWAN모델을 주로 사용하고 있으나 복잡한 지형이나 구조물 등의 영향을 고려하기 위해 FUNWAVE, CADMAS-SURF 및 SWASH 모델 등과 같은 해수면 변동에 대한 시간적인 변동을 계산하는 모델을 적용하는 연구가 시도되고 있다.

한국해양과학기술원은 CCTV를 이용한 월파의 현장관측을 최초로 시도하여 CCTV의

영상자료를 여러 이미지 변환을 통해 월파를 정량적으로 산출할 수 있는 프로그램을 개발하여, 현재 동해안 3개 지점에서 취득된 자료를 기반으로 지속적으로 개선작업을 수행하고 있다.

한국해양과학기술원에서는 수중음향 통신과 관련하여 1999년부터 2003년까지 산업자원부의 민군겸용사업으로 「초음파를 이용한 수중 영상정보 전송기술 개발」 과제를 수행하여 수중음향 통신에 필요한 광대역 수중음향 트랜스듀서 설계·구현 기술, 고속 신호처리 기술 및 배열 신호처리 기술에 대한 연구를 수행하였으며 이를 통해 수중음향 통신을 이용한 영상전송 시스템을 개발하였다.

또한 2004년부터 해양수산부의 지원을 받아 해양공간자원 개발사업으로 「수중 무선통신 시스템 개발」 과제를 수행 중에 있다. 본 과제를 통하여 수중 초음파 통신에 필요한 광대역 수중음향 트랜스듀서 설계 기술을 고도화하고 있으며, 새로운 복합소재를 이용하여 고성능 초음파 센서와 이의 구동을 위한 송·수신 증폭기 설계 기술, 수중음향 채널에서 발생하는 왜곡을 보상하기 위한 기술, 고속 배열 신호처리를 위한 기술에 관한 연구를 수행하였다. 결과물로 2005년도에는 4km, 10kbps의 수중통신 모뎀, 2006년도에는 7.4km, 10kbps의 수중통신 모뎀, 2007년도에는 10km, 10kbps의 양방향 수중통신 모뎀을 개발하였으며, 2008년도에는 5kbps의 장거리 모뎀(통신거리: 16 km)과 네트워크 구성을 위한 무지향성 양방향 모뎀(통신거리: 5km)을 개발하였다. 2009년도 이후에는 Ad-hoc 통신망 개발을 위한 연구를 진행하고 있다.

국방과학연구소의 지원으로 2007년부터 ‘수중음향 통신 및 탐지 특화센터’가 경북대학교에 설치되어 경북대학교를 비롯한 학계를 중심으로 수중음향 통신 및 수중음향 탐지 알고리즘에 대한 연구가 진행 중에 있다.

신속설치형 부유식 파랑저감 장치 개발과 관련하여 국내에서는 소규모의 부유식 항만 구조물이 원전항 및 통영항에 시공된 사례가 있으며, 모바일하버(Mobile harbor) 사업의 일환으로 가동식 파랑제어시스템 개발에 관련된 연구가 수행된 바 있다. 황천 시 선박 및 시설물 피해발생을 줄이고, 낚시와 관광객의 편의시설 부족을 해결하며, 기반시설 확충으로 인한 지역주민의 소득을 증대시킬 목적으로 경남 마산시 구산면 원전항 동방파제 755m 구간에 부유식 방파제가 설치되었다.

제 2 절 국외 현황

미국(NOAA nowCOAST, HYCOM), 유럽(MyOcean, BOOS, NOOS 등), 프랑스(MERCATOR), 영국(FOAM), 호주(BLUElink), 일본(COMEINS Web) 등 선진국에서는 실시간 해양관측, 위성원격탐사기술, 해양수치모델링, 자료동화 등을 통합한 운용해양예보시스템 (Operational Oceanographic System)을 구축하여 해양재해·재난 시 현장 지원 및 연안재해 위험도 평가, 다양한 해상활동 지원 등에 활용하고 있다.

미국, 유럽 등의 선진국에서는 웹GIS기반 플랫폼을 이용하여 실시간으로 관측 및 수치모델의 예측결과, 원격탐사 등의 내용을 서비스하고 있으며, 해양예측시스템의 개발을 위하여 중앙정부, 지자체, 대학, 산업 등 유관기관이 모두 모여 개발에 참여하고 있다.

미국의 nowCOAST는 NOAA에서 미국 연안의 수천개의 실시간 관측소로부터의 관측정보와 해양예보정보를 ‘one-stop shopping’ 형태로 제공하는 web mapping portal이며, 사용자는 수천 개의 실시간 연안관측소에서의 실시간 정보와 NOAA의 예보정보를 빠르게 취득할 수 있다.

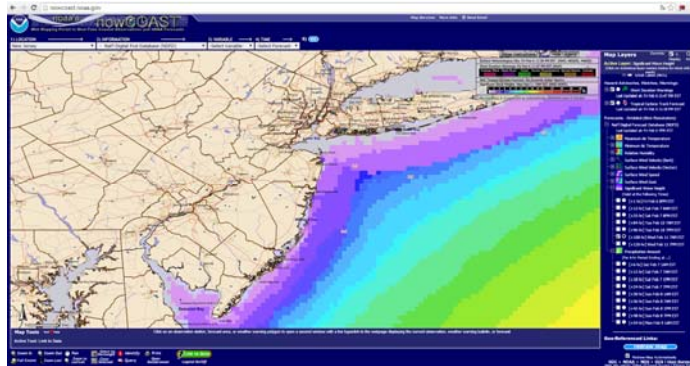


그림 2.2.1 미국 NOAA의 nowCOAST

NOAA/NOS에서 미국의 주요항만에서 선박의 안전항해 및 해양수송의 효율성을 제고하기 위하여 해수면, 조류, 염분, 기상 (풍향, 풍속, 대기압, 수온)을 실시간으로 관측하고 이와 함께 예측 정보를 제공하는 실시간 물리해양정보시스템 (PORTS®)을 운영 중에 있다. 현재 Narragansett Bay, Los Angeles/Long Beach 항 등 13개 지역에서 운영 중에 있으며, 향후 150개 지역으로 확대할 계획으로 알려져 있다.

미국 NOAA의 NWS(National Weather Service)에서는 자체 연구 개발한 SLOSH 해일

예보 모형을 전국 연안에 걸쳐 20여개의 영역으로 나누어서 현업 예보에 활용하고, 또한 이 예보 모형을 근간으로 작성된 재해도 (Hazard Map)를 이용하여 지방정부 및 지자체는 허리케인 내습시 예·경보 및 피난처 대피 등 재해저감 및 방재에 활용하고 있다.

미국의 해안경비대(U.S. Coast Guard)에서는 미해양대기청(NOAA)의 통합해양 환경정보제공시스템과 연계하여 수색구조 최적예측시스템 및 유류오염 이동, 확산, 방제계획 수립 지원시스템을 구축하여 운용 중에 있다. Leeway 모델과 고주파 레이다(high frequency radar) 관측 유속자료를 활용하여 수색구조최적예측시스템(Search and Rescue Optimal Planning System: SAROPS)을 구축 및 운용 중에 있다. Leeway 모델은 현재 미국의 해양 경찰청과 노르웨이 기상청에서 운용 중인 모델로 몬테카를로 (Monte Carlo) 기법을 이용한 앙상블 기반의 추적 모델이다. 몬테카를로 기법을 이용한 앙상블 기반으로 다수의 입자를 이용하여 모델의 불확실성 예측이 가능하다. Allen and Plourde (1999)에서 언급한 63가지의 표류체 유형(모양, 크기, 잠김정도 등)에 따라 다른 바람영향 계수를 적용할 수 있으며, 사용자 편의에 따라 외력 입력이 자유롭다. 즉 다수의 모델로부터 생산된 예측 바람, 예측 유속, 그리고 관측 바람, 관측 유속 등 다양한 형태의 외력 입력이 가능하다.

EU의 발틱해 운용해양시스템인 BOOS는 발틱해의 9개국(덴마크, 에스토니아, 핀란드, 독일, 라트비아, 리투아니아, 폴란드, 러시아, 스웨덴)의 19개 기관이 공동으로 개발·운영되는 운용해양시스템으로 수많은 관측소에서 실시간으로 해양자료를 수집하며, 자료는 각국의 국가 웹페이지를 통해 제공한다.

북미와 유럽연합 국가 차원에서 2-3년 주기적으로 수색구조 기술에 대한 국제학술회의(International Workshop on Technologies for Search and Rescue and other Emergency Marine Operations)를 개최하여 수색구조 예측 기술 및 관련 장비 연구의 수행. 북대서양을 중심으로 미국, 캐나다, 영국, 프랑스, 노르웨이, 스페인, 폴란드 등이 서로 협력하여 연구를 주도해 나가고 있다.

지중해를 중심으로 한 유럽국가들이 유류확산 모델 및 표출시스템을 운용 중에 있다(MOTHY, MEDSLIK, PORTico-MEDSLIK, MEDSLIK-II, POSEIDON-OSM 등). 주요 참여국가로는 프랑스, 스페인, 포르투갈, 키프로스, 이탈리아, 그리스, 말타 등이며 ‘해양안전을 위한 지중해결정지원시스템’(Mediterranean Decision Support System for Marine Safety: MEDESS-4MS, www.medess4ms.eu) 사업을 통해 국가 간의 상호 협력 연구를

하고 있다.

북미 멕시코만을 중심으로 연안관측시스템 (Gulf of Mexico Coastal Ocean Observing System)을 통하여 유류유출확산 관측 및 예측 정보를 생산하고 있다. 미국 해양대기청 (NOAA), 텍사스 대학, 텍사스 대학, 루이지애나 대학, 마이애미 대학 등이 연구에 참여하고 있으며 'Deepwater Horizon Oil Spill' 과 같은 대형 유류유출 사고를 대비하여 표층 유출이 아닌 깊은 수심에서의 유출된 유류 확산을 모의한다.

최근 표류예측 (수색구조 예측)과 관련하여 다양한 방법으로 현장실험 및 수치 모델을 통한 표류 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어, Allen and Plourde (1999)는 조난된 물체들 (사람, 구명보트, 선박 등)의 궤적과 자료를 바탕으로 표류 물체의 leeway와 바람사이의 관계를 연구하였고, Breivik and Allen (2008)은 현재 U.S. Coast Guard (USCG)와 노르웨이 기상청에서 수색구조 예측에 사용되고 있는 leeway 표류 모델을 개발하는데 기여하였다.

Ullman et al. (2006)은 고주파 레이더 (High-Frequency radar) 관측 표층해류를 이용하여 몬테카를로(Monte Carlo)식 표류체 추적 모델을 개발하고 검증하였다. 표류 모델 평가 방법에 대한 연구도 다양한 방법으로 수행되어 왔는데, 대표적인 예로 스파게티 다이어그램 (Spaghetti Diagram)을 이용한 연구 (Toner et al., 2001), 통계적 분리법 (statistical separation)을 이용한 연구 (Thompson et al., 2003), 그리고 최근에 원형 평가법 (circle assessment)을 이용한 연구 (Furnans et al., 2005)가 있다.

일본 기상청과 항만공항 기술연구소 공동으로 "연안 개발기술 회사(CDIT)를 설립하여 사용자에게 사용료를 받고 연안 환경 현황 및 예보 지원 체제를 구축, 운영 중에 있다. 기상, 해상 등에 관한 실황, 예측정보를 실시간으로 제공하는 시스템이며, 2004년부터 인터넷을 통해 정보제공을 시작하고 있다.

2004년 일본의 방재를 담당하는 내각부는 농림수산성, 국토교통성과 공동으로 폭풍해일, 지진해일의 피해를 경감하고 종래의 해안보전시설을 정비하기 위해 위험도 정보제공 정책을 실시하고 있다. 해일방재도의 작성은 해일방재도연구회를 설치하여 지방자치단체가 해일방재도를 작성, 활용하도록 지원하는데 필요한 여러 과제를 검토하여 해일방재도 매뉴얼을 작성하였다.

Spectral 파랑모형 SWAN은 1999년 프로그램 공개이후 많은 국가의 협동 연구그룹 형성과 사용자를 확보하였다. 흐름을 고려한 파랑에너지 보존을 지배방정식으로 사용하여

넓은 구역에 대한 파랑을 빠르고 쉽게 계산하며, spectral energy balance 이론에 근거하여 파랑의 성장과 변형을 계산할 수 있으나, 구조물에 의한 회절과 천해에서 비선형성이 강한 조건에서는 적용이 제한적이다. 하지만, 일부 제약에도 불구하고 넓은 지역에 대한 파랑추정이 용이하여 활용도가 매우 높다.

비선형 천해파랑 변형모형 Boussinesq wave model (FUNWAVE)은 지난 20년간의 지속적인 연구에 의하여 파랑변형 계산의 유용한 도구로 검증되었다. 주기와 파고에 의한 파랑 분산을 적절히 재현, 쇄파대 내의 파고감쇄 기법을 도입하고 해안선에서 이동 경계 기법 사용과 파랑의 급변화를 다루기 위한 곡선좌표계로 확장하는 연구를 수행한 바 있다. 수치 안정화를 위하여 경계조건의 개선, staggered 격자방법, 이동 경계기법의 개선 등 다양한 방법을 도입하고 있으며, 연안 범람과 쇄파 재현의 정도를 높이기 위하여 안정적인 shock-capturing 기법을 도입하였다. 가변 시간차분법에 의한 계산시간 단축과 안정적인 쇄파재현을 위한 Total Variation Diminishing 기법을 사용하였고, 계산에 요구되는 작은 격자로 인하여 상당한 계산시간이 소요되나 이를 극복하기 위하여 최근 병렬계산법을 도입하였다.

처오름 및 월파에 대한 연구는 대부분 수리모형 실험을 통해 행해졌으며, 이를 통해 처오름 높이 및 월파량을 산정하는 실험식을 제시하는 형태로 행해졌다 (Kobayashi et al. 1987; Ahrens and Heimbaugh 1988; de Wall and van der Meer 1992; Hedges and Reis 1998; Mori and Cox 2003 among others). 2000년도에는 유럽의 CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structure and Hazard Analysis)를 중심으로 하여 처오름 높이 및 월파에 대한 실험자료 데이터베이스가 구축되었으며, 이를 이용하여 EurOtop(2007)에서는 새로운 처오름 높이 및 월파에 대한 경험식을 도출하였다.

수중음향을 이용하여 데이터를 전송하는 기술에 대한 연구는 1960년대 이후 지속적으로 수행되어왔다. 최근에는 CPU의 신호처리 속도의 발달로 아날로그 방식이 아닌 디지털 방식의 모뎀 개발이 주류를 이루고 있다. Teledyne Benthos사에서는 MFSK와 PSK 방식의 변조기법을 사용하며 다중경로를 피하기 위한 가드타임(guard period) 설정이 가능하며, 컨벌루션 코딩을 사용하고 있다. 수중과 수상과의 데이터 통신을 위하여 수상 유닛용 모델(ATM-891 등)이 있다. EvoLogics는 독일에 본사를 둔 회사로서 S2C(sweep-spread carrier) 기술을 적용한 모뎀 제작사인데, 모델은 크게 R 시리즈와 M 시리즈로 구분되며 주파수 대역, 전송속도 및 거리, 운용수심 등에 따라 구분된다. R 시

리즈는 USBL을 이용한 위치추적 기능이 가능한 특징이 있다. Tritech은 영국 업체로서 수중음향 모뎀을 비롯한 여러 장비를 생산하고 있다. 수중음향 모뎀으로는 AM-300과 Micron Data Modem의 두 종류가 있다. Micron Data Modem은 ROV나 AUV 장착이 용이한 소형모델이며, 위치탐지가 가능한 특징이 있다.

미국, 일본, 유럽 등에서는 군사 및 해양재해 대비의 목적으로 여러 가지 형태의 가동식 방파제에 대한 연구가 추진되었거나 진행 중에 있다. 해상에서의 군사작전을 보다 원활하게 수행하기 위한 군사적 목적과 소형 선박의 하역작업 및 이송작업을 위하여 파고를 줄여 정온도를 확보하기 위한 목적으로 미 해군의 연안공학연구센터(CERC)에 의해 RIB(Rapidly Installed Breakwater)가 개발되었다. RIB 개발에는 미국 내 다양한 연구기관이 참여하였으며, 1996년에 미국 North Carolina 인근에서 1/4 규모의 현장 실험이 이루어진 바 있다. 일본 및 이탈리아에서는 폭풍해일 또는 쓰나미에 대한 방재 목적으로 평상시에는 선박 항행에 장애가 되지 않도록 해저에 매설되어 있다가 긴급상황이 발생할 때에만 수면 위로 부상시켜 항내를 재해로부터 지키는 부상말뚝 방파제 및 플랩식 방파제를 개발하고 있다.

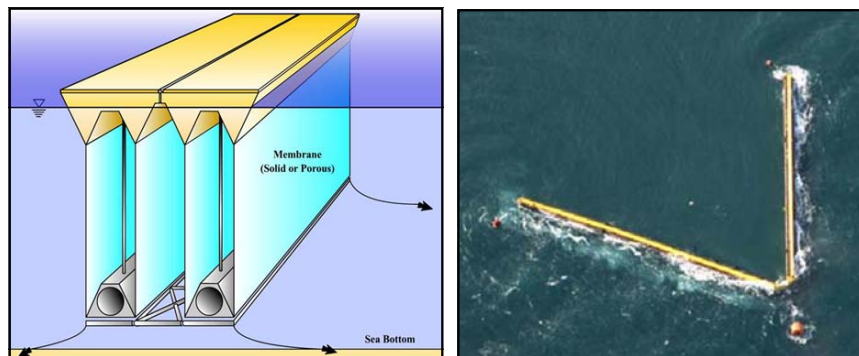


그림 2.2.2 RIB의 개념도 및 실험 모습

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 해양환경요소 통합지원 기술 개발

1. 실시간 통합 해양환경정보 제공 시스템

가. 관측자료 처리

(1) 수집 관측자료

본 시스템에서 수집되고 있는 관측자료는 해양조사원, 기상청 등에서 수집하며 그 종류는 표 3.1.1과 같다.

표 3.1.1 관측자료 일람

구 분	요 소	관측 주기
관측탑(2), 관측타워(1), 관측부이(2)	풍향, 풍속, 습도, 기온, 파고, 파주기, 수온	10분, 40분, 60분
관측소(53), 관측부이(5)	수온, 염분, 기온, 기압, 풍향, 풍속, 돌풍, 파고, 파주기, 유향, 유속	1분, 10분
부이(8), 등표(9), 등대(27)	풍향, 풍속, GUST풍속, 수온, 기온, 기압, 습도, 파고, 파주기, 파향	2분, 10분, 30분, 60분
제주중퇴등표(1)	풍향, 풍속, 수온, 기온, 기압, 염분, 습도, 파고, 파주기, 파향	5분간격
일본기상청	온도, 강수량, 풍향, 풍속, 일조기간, 습도, 기압	10분간격

(가) 국립해양조사원 - 조위관측자료

항만, 어항, 도서지역 등에서 해수면의 높이변화 또는 조석현상을 정밀하게 관측할 목적으로 관측장비와 부대장비를 갖춘 시설물에서 관측하는 자료로 국립해양조사원에서 관리하고 있다.

표 3.1.2 국립해양조사원의 조위관측소 목록

순 번	관측소명	지점번호	순 번	관측소명	지점번호
1	인천	400031	31	거문도	556851
2	평택	451821	32	강화대교	417820
3	영광	513800	33	전류리	415888
4	제주	690704	34	안흥	357945
5	부산	158650	35	흑산도	535951
6	목호	240050	36	대청도	409851
7	목포	530350	37	어청도	573819
8	안산	445310	38	굴업도	409891
9	포항	791600	39	왕돌초	132129
10	서귀포	697010	40	독도	799805
11	후포	767800	41	복사초	539840
12	속초	217800	42	교본초	650940
13	울릉도	799801	43	영흥도	409870
14	통영	650804	44	영종대교	404170
15	마산	630650	45	격렬비열도	357941
16	여수	550070	46	쌍정초	799880
17	대산	356870	47	도농탄	699936
18	군산	573400	48	속초등표	217809
19	가덕도	618440	49	광양	545711
20	울산	695851	50	태안	357914
21	추자도	680050	51	서천마량	325894
22	성산포	699903	52	인천송도	406800
23	모슬포	699835	53	진해	645600
24	장항	325903	54	순천만	540290
25	보령	355844	55	부산항신항	618821
26	고흥발포	548893	56	동해항	240806
27	완도	537800	57	경인항	404300
28	진도	539800	58	백령도	409913
29	거제도	626800	59	연평도	409840
30	위도	579910	60	삼천포	664240

표 3.1.3 조위 관측 요소별 단위

관측항목	관측단위	유효자릿수
수온	섭씨(℃)	0.01
염분	실용염분단위(PSU)	0.01
유향	도(°)	1
유속	노트(kn) 또는 초당센티미터(cm/s)	0.1 또는 1
조위	센티미터(cm)	1
파고	미터(m)	0.01
파향	도(°)	1
파주기	시간(s)	0.1
기온	섭씨(℃)	0.1
기압	헥토파스칼(hPa)	0.1
풍향	도(°)	1
풍속	초당미터(m/s)	0.1

(나) 국립해양조사원 - 해양관측부이

해양관측부이는 우리나라 주요해역 및 항로와 위험해역의 관측자료 제공과 예측정보 산출을 위해 조위, 수온, 염분, 파랑, 해수유 등의 해양요소와 바람, 기온, 기압 등의 해양 기상요소를 수집하기 위한 시설물이다.

표 3.1.4 국립해양조사원 - 해양관측부이 지점목록

순 번	한글명	영문명	순 번	한글명	영문명
주요해역 1	제주남부	JJSO	주요항로 1	경인항	GIHG
2	대한해협	KOST	2	인천항	ICHG
3	남해동부	JJEA	3	평택당진항	PTDJ
4	제주해협	JJHH	4	군산항	GSHG
5	울릉도북동	ULNE	5	광양항	GYHG
6	울릉도북서	ULNW	6	완도항	WDHG
7	백령도	BRDO	7	상왕등도	SAMGWANG
8	연평도	YPDO	8	우이도	UIDO
9	경기만북서	KKNW	9	생일도	SAENGIL
10	동해북부	DHNT	10	태안항	TAEAN
이안류 1	대천 해수욕장	DABE	11	여수항	YEOSU
2	중문 해수욕장	JMBE	12	통영항	TONGYEONG
3	해운대 해수욕장	HAEU	13	마산항	MASAN
			14	부산항신항	BUSANNEW
			15	감천항	GAMCHEON
			16	부산항	BUSAN

(다) 국립해양조사원 - 종합해양과학기지

이어도 종합해양과학기지는 우리나라 관할 해역 최남단 이어도에 해양과학기지를 구축하여 해양/기상정보를 실시간으로 제공함으로써 자연재해를 예방하고 어업 및 해양 활동의 효율성을 증진하기 위해 설치되었다. 소청초 종합해양과학기지는 소청도 남쪽 37 km 부근 황해의 소청초에 설치되어 황사와 해무를 관측하기 알맞은 곳에 위치해있다.

(라) 기상청 - 종관관측

종관기상관측이란 정해진 시각의 대기 상태를 파악하기 위해 모든 관측소에서 같은 시각에 실시하는 지상관측을 말하며, 관측방법은 기압, 기온, 풍향, 풍속, 상대습도, 강수량, 강수유무, 일사량, 일조시간, 지면온도, 초상온도, 지중온도, 토양수분, 지하수위 14개 요소에 대해서는 자동으로 관측하고, 시정, 구름, 증발량, 일기현상 등은 일부 자동과 목측으로 관측한다.



그림 3.1.1 기상청 종관관측 현황

(마) 기상청 - 국내부이

해양기상부이는 해수면에서 해양기상현상을 다양한 기상장비로 관측하고, 위성 등 원격통신을 이용하여 관측자료를 전송하는 장비이다. 현재 한반도 전해역에 11개소를 운영하고 있으며, 형태에 따라 선박형과 원반형 두 가지가 있다. 해양기상부이는 풍향, 풍속, 기압, 기온, 습도, 파고, 파주기, 파향, 수온 등을 1시간 간격으로 관측하고 있다.

표 3.1.5 기상청 부이 지점 정보

해역	지점명	위도	경도
서해중부해상	덕적도	37°14' 10" N	126°01' 08" E
	외연도	36°15' 00" N	125°45' 00" E
서해남부해상	칠발도	34°47' 36" N	125°46' 37" E
	신안	34°44' 00" N	126°14' 30" E
제주도해상	마라도	33°05' 00" N	126°02' 00" E
남해서부해상	거문도	34°00' 05" N	127°30' 05" E
	추자도	33°47' 37" N	126°08' 28" E
남해동부해상	거제도	34°46' 00" N	128°54' 00" E
동해남부해상	포항	36°21' 00" N	129°47' 00" E
동해중부해상	울릉도-독도	37°27' 20" N	131°06' 52" E
	동해	37°28' 50" N	129°57' 00" E

(2) 관측자료 처리 프로세스

원내의 자료수집서버에서 수집된 해양조사원과 기상청의 관측자료는 자료처리 서버로 전송되며 전송된 자료들은 shell script를 활용하여 DB로 입력된다. 최종 자료는 MySQL DB 내에 저장된다.

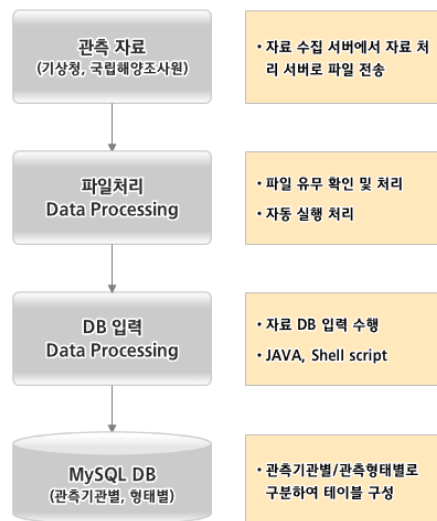


그림 3.1.2 관측자료 처리 프로세스

나. 예측자료 처리

(1) 수집 예측자료

운용해양시스템에서 생산된 예측자료는 여러 종류의 파일로 들어오며 그 내용은 표 3.1.6과 같다.

표 3.1.6 수집 예측자료 일람

항 목	설 명	용 량	비 고
3차원 기상모델	기상 모델로서 바람, 대기압, 열속 등의 대기자료 생산	40G	1일 2회 생성
3차원 해양순환모델	연안 순환 모델로서 수온, 염분, 유속 등의 해양자료 생산	8G	
	광역 순환 모델로서 수온, 염분, 유속 등의 해양자료 생산	8G	
	파랑 모델로서 주기, 파향 등의 해양자료 생산	8G	
	폭풍해일 모델로서 해일고 자료 생산	1G	
합 계		65G	

(2) 예측자료 처리 프로세스

예측자료는 요소별, 모델별로 구분된 파일로 수집되지만 이를 하나의 NC 포맷의 파일에 저장한다. 여기에는 JAVA 및 shell script를 활용하였으며, 각각의 요소와 예측기간 및 시간을 고려하여 저장하였다.

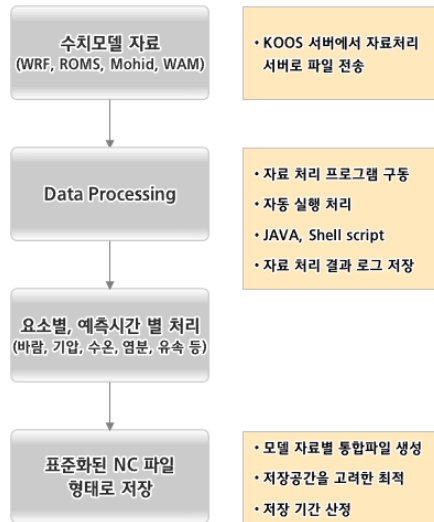


그림 3.1.3 예측자료 처리 프로세스

다. Web 기반 GIS 표출 시스템 구축

(1) 표출 시스템

본 시스템에서 표출되는 자료에 대한 직관성을 높이기 위하여 GIS 기반의 표출시스템을 구축하였다. 사용한 GIS는 Google Map API를 활용하였으며 이를 토대로 예측자료 및 관측자료를 표출하였다.



그림 3.1.4 Web 기반 표출 시스템 구축 개념도

또한 생산된 분포도와 사용된 GIS의 지도도법을 일치하기 위하여 MapServer 어플리케이션을 활용하였으며 이를 통하여 사용자는 Web 상에서 지도정보와 해양기상정보를 동시에 확인할 수 있다.

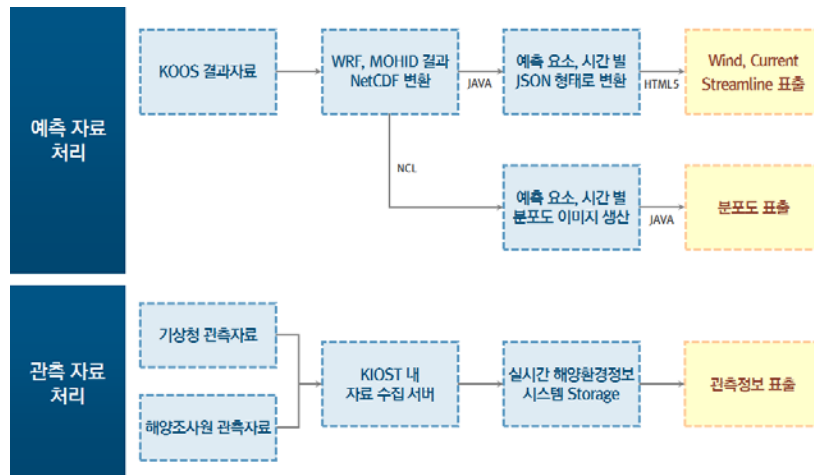


그림 3.1.5 실시간 관측 및 예측자료 처리 프로세스 개요

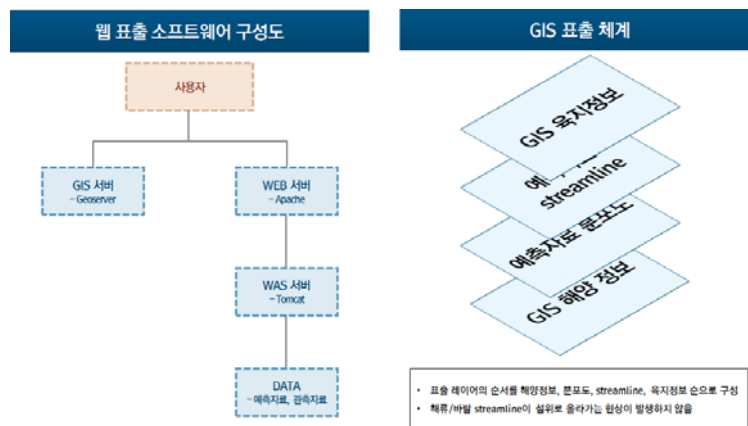


그림 3.1.6 웹 표출 체계 개요

라. 관측, 예측자료 표출 기능 구현

(1) 실시간 해양환경정보제공시스템 사용자 화면

실시간 해양환경정보제공 시스템은 웹기반으로 구현되어 있으며 사용자가 PC 브라우저에서 URL을 입력하면 접속할 수 있다. 상단은 관측, 예측, 검색구조, 유류유출 등 대 메뉴로 표현되어 있으며 우측에 각 메뉴별로 사용자의 설정을 입력하는 부분이 위치하고 있다.

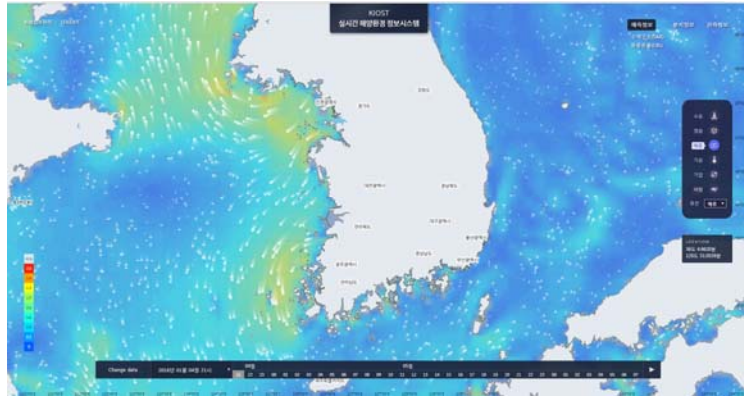


그림 3.1.7 실시간 해양환경정보제공시스템 사용자 화면

(2) 관측자료 표출

관측자료는 기상청의 부이, 종관관측자료, 해양조사원의 조위관측소 자료를 검색할 수 있게 개발되었다.

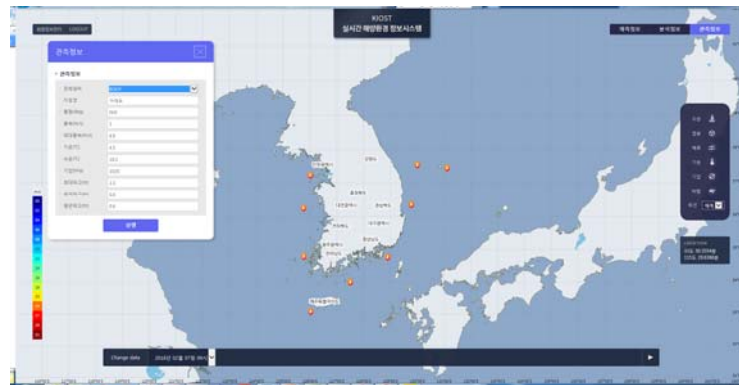


그림 3.1.8 관측자료 표출화면

관측자료 별로 통계자료를 검색할 수 있게 기간별 검색 기능도 개발하였다. 기간별 검색자료는 시계열 그래프 및 테이블로 사용자에게 제공되며 검색한 자료는 텍스트파일로 다운로드도 가능하다.

(3) 예측자료 표출

예측자료는 발표시간별, 예측시간별로 조회가 가능하며 여러 종류 모델 자료를 확인할 수 있다. 모델의 종류는 MOHID, WRF, 요소는 온도, 기압, 바람, 수온, 염분, 유향유속 자료를 표출 가능하다. 이 중 MOHID 모델 산출 요소인 수온, 염분, 유향유속 자료는 중심별로 검색이 가능하다.

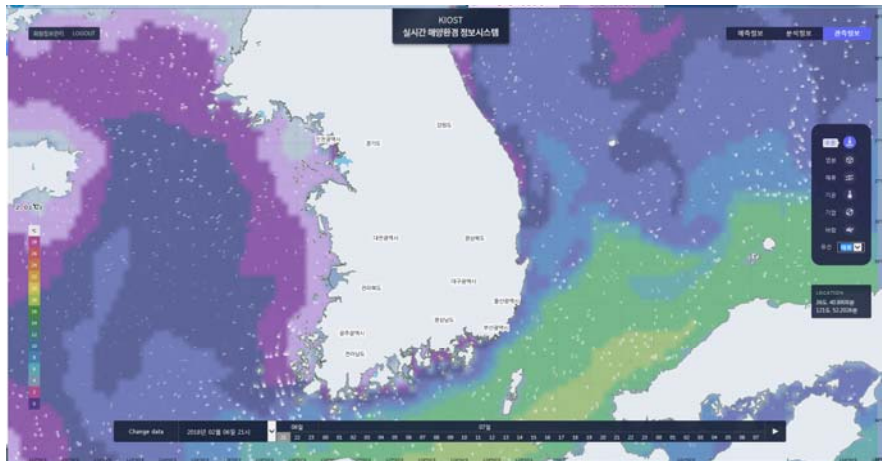


그림 3.1.9 수온 및 해류 예측자료 표출화면

사용자가 임의로 지정한 지점에 대하여 지점별 정보도 제공한다. 선택한 지점과 요소에 대하여 72시간 예측자료를 테이블 형태로 제공하며 이를 텍스트 파일로 다운로드 가능하도록 개발하였다.

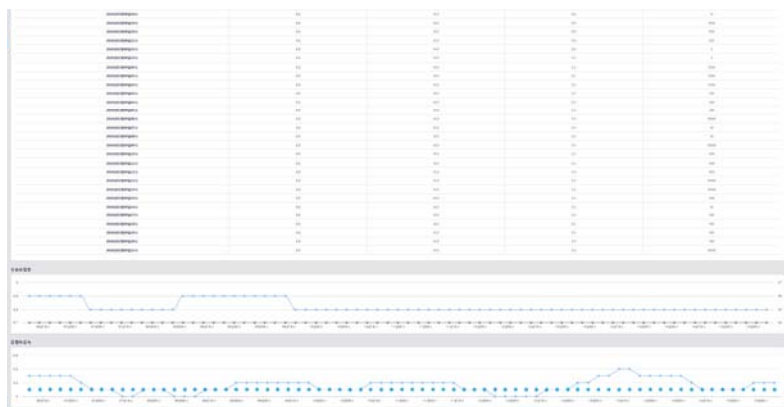


그림 3.1.10 지점별 예측자료 표출화면

(4) 수색구조 예측자료 표출

실시간 통합 해양환경정보시스템과의 연동체계 구축을 통하여 해난사고 발생 시 수색구조 예측 및 주변 해역에 대한 실시간 관측자료 및 예측자료의 동시 조회가 가능하도록 구성하였다.

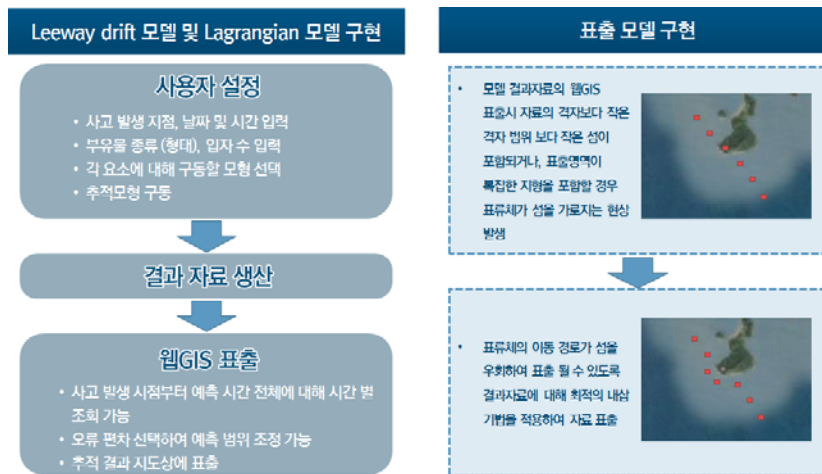
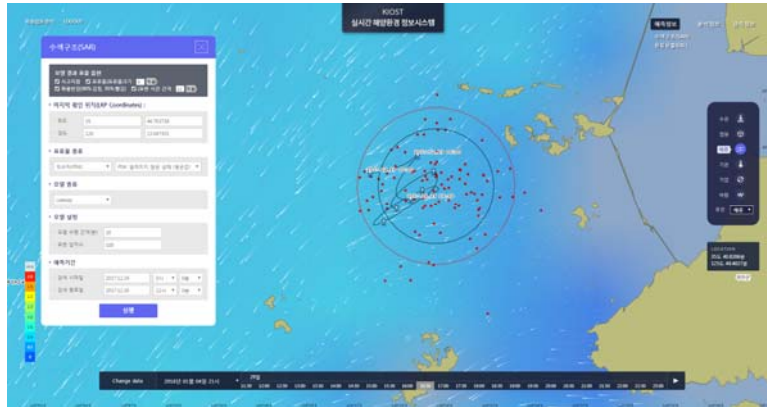


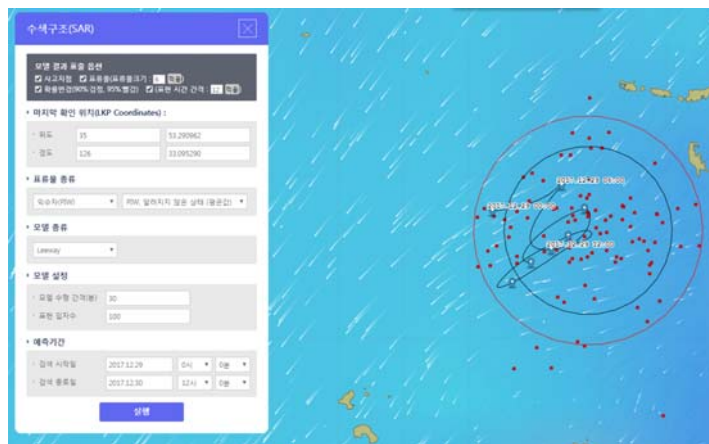
그림 3.1.11 수색계획 수립지원 시스템 수립 모식도

Leeway drift 모델과 Lagrangian 입자추적 모델을 수립하여 각각의 예측결과를 활용하고, 두 결과의 양상불 예측결과를 조회할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 또한 GIS 지도상의 격자와 예측자료의 격자 차이를 극복하기 위해 예측결과를 GIS 지도상의 격자로 내삽하여 복잡한 지형이나 작은 섬에 의한 예측결과외 왜곡을 최소화하였다.

표류물의 종류는 익수자, 구명정, 소형보트, 어선 등 총 60가지 형태 중 하나를 선택할 수 있도록 다양화하여 구성하였다. 유류유출 이동확산 예측시스템은 사용자가 사고발생 초기 위치를 입력하고 유출형태 및 지속시간, 유류종류 등 다양한 옵션을 선택하여 직접 시뮬레이션 할 수 있도록 구성하였다.



(a)



(b)

그림 3.1.12 (a) 실시간 해양환경정보제공시스템과 방제 및 수색구조 수립 지원시스템의 연동, (b) 사용자 연동 표류체 이동예측 시뮬레이션

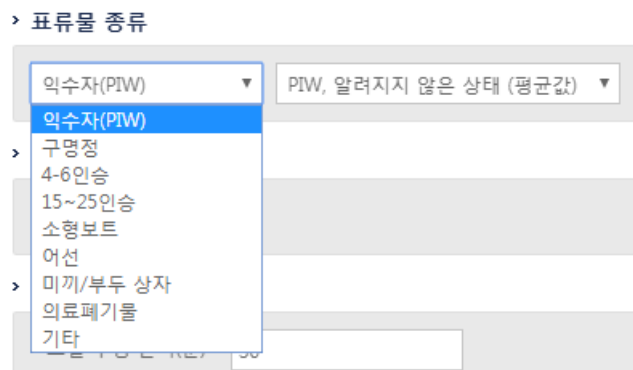


그림 3.1.13 표류물의 종류 선택 옵션

> 모델 종류

Leeway
 Leeway
 Lagrangian

· 모델 수행 간격(분) 30

· 표현 입자수 100

> 예측기간

· 검색 시작일 2017.12.29 0시 0분

· 검색 종료일 2017.12.30 12시 0분

실행

그림 3.1.14 표류예측 모델의 종류 및 기타 선택 옵션

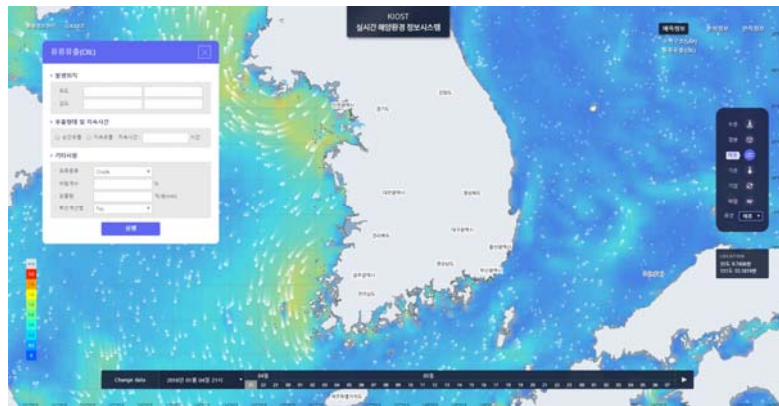


그림 3.1.15 방제계획 수립 지원시스템의 사용자 연동 메뉴

유류유출(OIL) [X]

> 발생위치

· 위도 37 18.5977

· 경도 126 58.0720

> 유출형태 및 지속시간

순간유출 지속유출 지속시간 : 12 시간

> 기타사항

· 유류종류 Crude

· 바람계수 20 %

· 유출량 100 개/분(min)

· 확산계산법 Fay

실행

그림 3.1.16 방제계획 수립 지원시스템의 사용자 입력 정보 메뉴

2. 고해상도 예측 시스템

가. KOOS와 연계한 고해상도 예측 시스템 구축

(1) 운용해양예보시스템 (KOOS)

KOOS는 해양수산부 국가 연구 개발 사업으로 구축한 우리나라 주변의 기상, 해양순환, 파랑 등의 72시간 예측하는 시스템으로 현재 2단계 사업이 진행 중이다. 이 시스템은 우리나라에서 처음으로 실시간 해양관측 (인공위성 원격탐사 포함), 수치모델링 기술을 결합, 기상외력에서부터 활용예보에 이르기까지 체계적으로 연계하여 우리나라 연안과 주변 해양에서 해양현황과 예보정보를 생산 제공하고 있다.

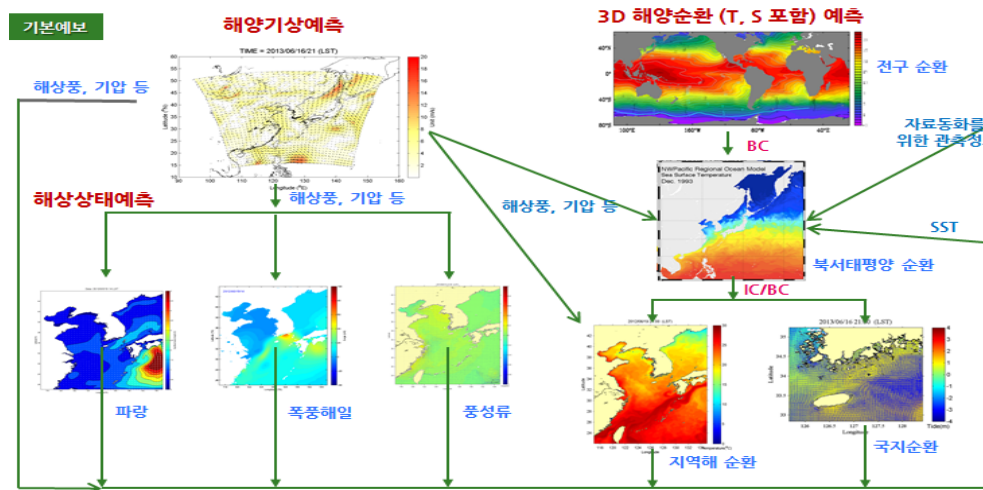


그림 3.1.17 KOOS 예측 모델 모식도

운용해양예보시스템(KOOS; Park et al, 2015)에서는 주요 항만 및 연안에서 선박의 안전항해와 해상의 현안문제 해결에 필요한 해양환경 모니터링 정보와 예측정보를 생산·제공하는 기능을 수행하기 위하여, 우리나라 지역해를 비롯한 동중국해, 북서태평양 영역에서 기상, 파랑, 해수순환 등의 요소를 예측할 수 있는 종합 해상상태 예측 시스템(그림 3.1.17)을 구축하였다.

KOOS에서의 연안 예측모델은 유동모델로 MOHID 모델을 사용하고, 파랑 모델로 SWAN 모델을 사용한다. 두 모델의 기상 입력조건은 역시 KOOS에서 생산하는 WRF 모델 기상 결과를 사용하고, 유동모델에서의 개방 경계조건은 NAO_99jb의 16개 분조를 사용하고, 3차원 초기 및 경계조건으로는 HYCOM을 사용한다. KOOS 연안 순환 예측 시스템의 개요도는 아래의 그림과 같다.

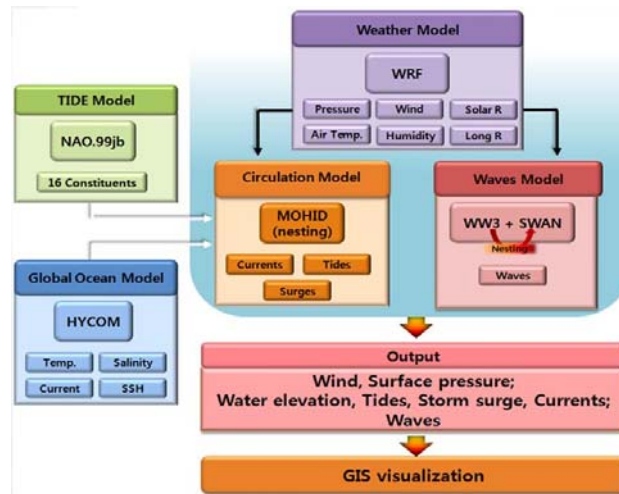


그림 3.1.18 KOOS 연안 예측 시스템(MOHID)의 개요도

본 연구에서는 기 운영 중인 KOOS 시스템의 자료를 활용하여 연안에 특화된 고해상도 예측 시스템을 구축하고 연안에서 발생할 수 있는 재해·재난에 대비하고자 하였다.

(2) 고해상도 예측시스템의 필요성

우리나라 남해안은 작은 섬들이 많고, 해안선이 복잡하다 게다가 유속이 빨라 수치모델로 연안의 흐름을 재현하려면 수치모델 계산 시 고해상도의 격자시스템을 사용하여야 한다. 예를 들어, 세월호 사고가 발생하였을 때, 사고 지점과 사고지점에서 2km 떨어진 지역에서 유속 관측을 실시하였는데, 불과 2km 차이로 조류패턴이 크게 다르게 관측되기도 하였다. 사고 지역의 유속이 빨라 дай버들이 작업할 수 있는 시간이 한정적이었다는 점을 고려하면 해당지역에서의 2km 해상도의 유동 예측은 효율적이지 않음을 의미한다.

(가) 관측 자료 분석

해상도에 따른 재현 정확도의 차이를 알아보기 위하여 세월호 사고 인근해역에서의 해상도에 따른 유동모델 결과를 비교하였다. 세월호 사고는 발생당시 세계적으로 크게 이슈가 되었고, 수색구조를 위한 여러 가지 지원이 이루어 졌다. 그 중 정확한 조류패턴 파악 및 상황 판단, 모델 검증에 위한 실시간 관측이 수행되었는데, 본 연구에서는 1차적으로 국립해양조사원 부이 자료와 한국해양과학기술원의 ADCP로 관측한 유속 자료를 이용하여 사고해역의 유속 패턴을 분석하였다.

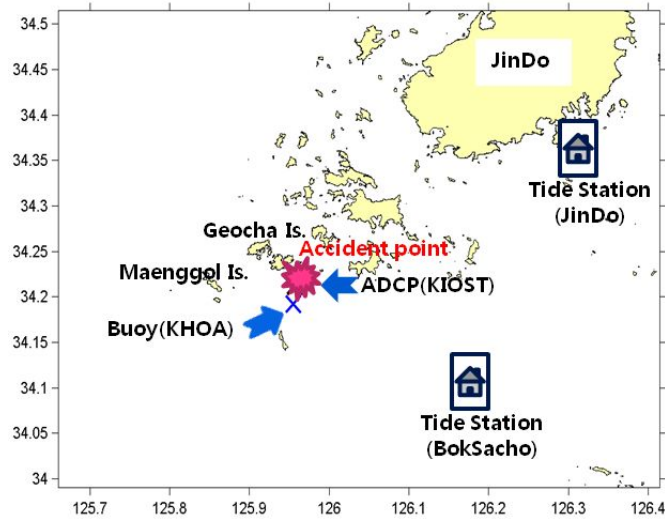


그림 3.1.19 사고 위치 및 관측 위치

그림 3.1.19는 당시 사고해역 인근의 관측 정점을 보여 주고 있다. 해양과학기술원의 ADCP와 국립해양조사원의 Buoy의 거리는 약 2km 정도였다. 하지만 아래 그림의 표층 유속 결과를 보면 두 정점에서의 조류 패턴이 상이함을 알 수가 있다. 이는 해당지역에서 유속 패턴을 잘 재현하기 위해서는 최소한 2km 이하의 격자간격을 가지는 모델을 이용해야 함을 의미한다.

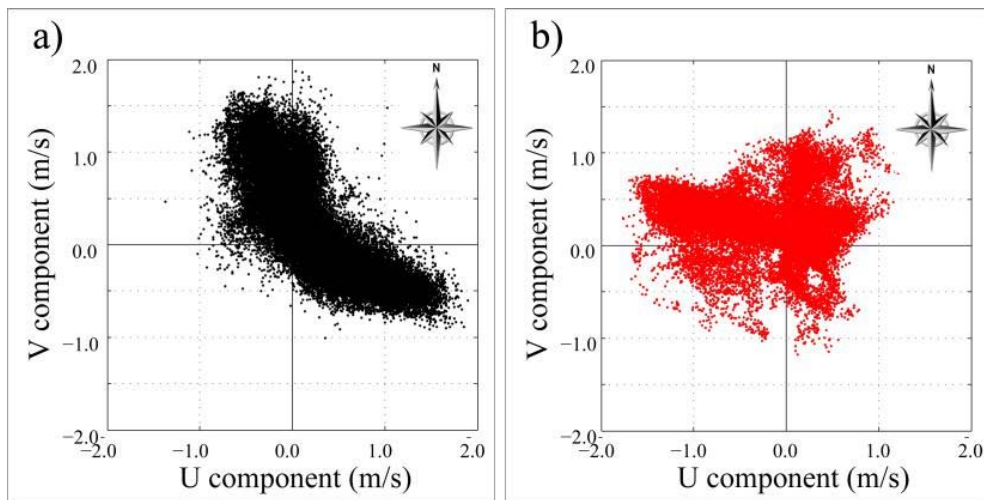


그림 3.1.20 Buoy (a)와 ADCP (b)의 표층 유속 scatter plot

그림 3.1.20은 당시 사고해역 인근의 관측 정점을 보여 주고 있다. 해양과학기술원의 ADCP와 국립해양조사원의 Buoy의 거리는 약 2km 정도였다. 하지만 아래 그림의 표층 유속 결과를 보면 두 정점에서의 조류 패턴이 상이함을 알 수가 있다. 이는 해당지역에서 유속 패턴을 잘 재현하기 위해서는 최소한 2km 이하의 격자간격을 가지는 모델을 이용해야 함을 의미한다. 연구 기간의 최대 유속은 각각 2.0 m/s 1.5 m/s 이고, 1일 평균 4회의 전류가 나타났다. 위의 그림에서와 같이 동서방향의 흐름에서 Buoy 결과가 더 크고 단조로운 반면 ADCP의 결과는 진동이 심하게 나타난다. 남북방향의 흐름은 패턴이 거의 유사하지만 일정한 패턴으로 확연히 다른 차이를 보이기도 하는데, 이는 Buoy 는 맹골수로에 위치하지만 ADCP는 거차도 뒤에 숨어 있기 때문에 생겨가는 현상으로 판단된다. 즉, 창조시에는 거차도의 영향이 없어 두 정점의 유속 패턴이 유사하지만, 낙조시에는 그 패턴이 다르게 나타난다. 낙조 초기에는 맹골수도와 거차수와 같은 조류의 흐름을 보이다가 낙조 시작 약 3시간 후부터 관측 지점 부근에서 와류가 나타났으며, 낙조 시작 약 5시간 후에는 처음 생성된 와류와 반대 방향의 와류가 나타났다. 이러한 현상은 낙조 시 동거차도의 영향으로 인한 맹골수와 거차수의 유속 차에 의해 나타나는 것으로 보이며, 이 때 생성된 와류로 인해 앞서 관측결과에서 보이는 세월호 사고 지점의 조류특성이 나타나는 것으로 판단된다.

(나) 해상도에 따른 예측 정확도 비교

본 연구에서는 해상도에 따른 흐름 형태의 변화양상을 분석하기 위하고자 하였고, 이를 위해 연구해역에서의 최소격자 66 m 까지 구성하여 격자크기별 결과를 관측과 비교하였다. 기존의 $1/6^\circ - 1/12^\circ - 1/60^\circ$ 시스템에 안정적인 네스팅을 위해 상위 격자와의 격자수 비를 1:3 으로 축소하면서 $1/180^\circ$ (600 m) - $1/540^\circ$ (200 m) - $1/1620^\circ$ (66 m) 을 구축하여 (그림 3.1.21), 2014년 5월 1일부터 31일까지 기상조건과 3차원 순환 예측 결과를 이용하여 정밀 격자 계산을 수행하였다.

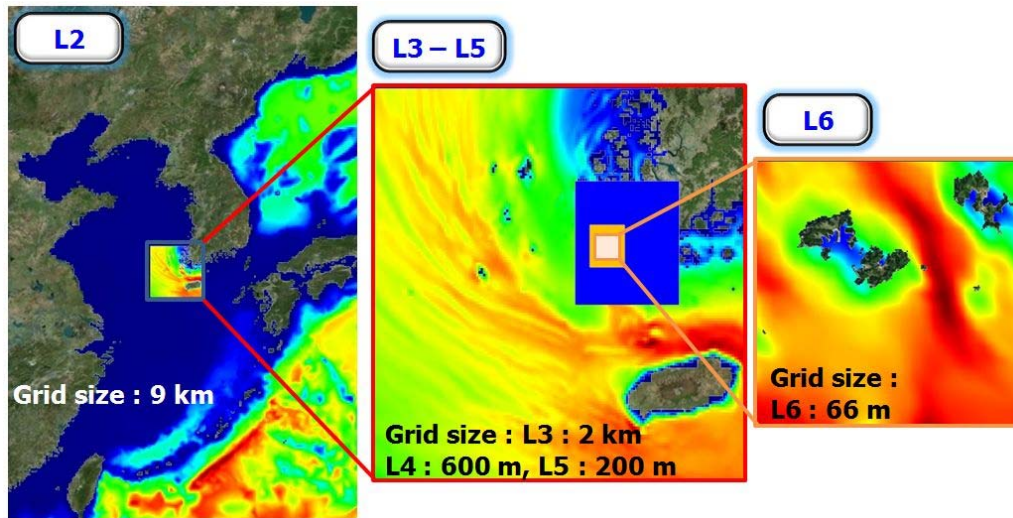


그림 3.1.21 격자 해상도에 따른 모의영역

관측결과와의 검증은 조위와 조류로 나누어서 실시하였다. 우선 조위에 대한 검증 결과는 국립해양조사원의 진도, 복사초 정점의 조위 자료와 비교하였고 그 결과는 그림 3.1.22와 같다. 아래 그림에서는 진도(a), 복사초(b)에서의 관측자료 분석 결과와 같은 위치의 모델자료 분석결과를 해상도 별로 비교하였다. 진도, 복사초 정점에서 각 분조별 진폭에서 모델 결과는 관측결과 대비 95% 이상의 정확도를 가진다.

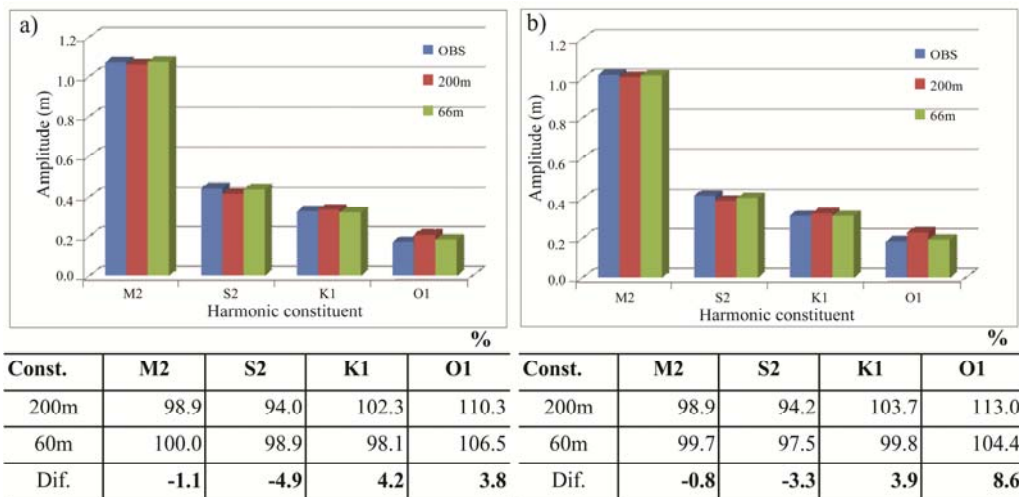


그림 3.1.22 조위 검증 결과

조류에 대한 검증은 위의 그림에서 제시한 ADCP와 buoy 자료를 사용하였다. 앞에서 언급한바와 같이 ADCP와 buoy 의 거리는 2km 에 불과하지만, 그 패턴의 차이가 있으므로 모델 결과로 그 원인을 찾고자 했고, 해상도에 따른 정확도의 차이를 살펴보고자 했다.

그림 3.1.23은 300 m 해상도의 모델 결과 중 낙조시의 조류 패턴이다. 낙조시작(a)부터, 각각 2시간후(b), 3시간후(c), 5시간 후(d)를 보여 주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 사고 지점(x) 는 남동쪽에 위치하고 있으므로 북서향의 창조류에는 거차도의 영향을 받지 않지만, 남동향의 낙조류에는 거차도의 영향을 받게된다. 따라서 모델이 거차도와 사고지점 사이를 제대로 재현하지 못하면 사고지점에서 수치 오차가 발생하게 될 것이다.

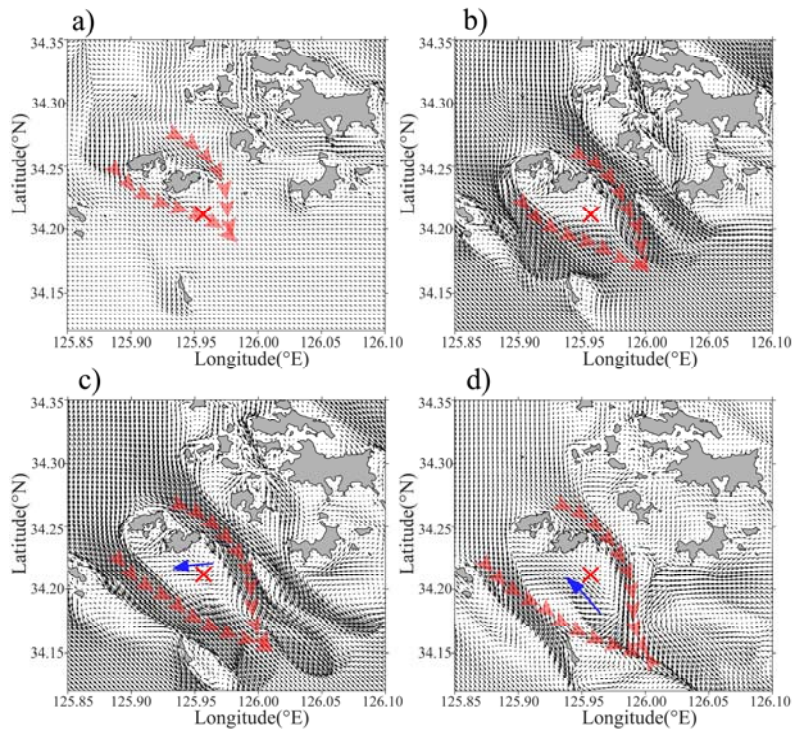


그림 3.1.23 300 m 해상도의 낙조시 조류 결과

실제로 맹골수로에 위치하는 buoy 점에서의 모델결과는 창낙조와 관계없이 우수하다. 하지만 사고지점에서의 ADCP는 해상도에 따른 차이를 보인다. 그림 3.1.24는 ADCP 관측 정점에서 해상도별 모델 결과를 보여준다. 그림에서 a), b), c) 는 각각 current speed, 동서방향의 current velocity (u-velocity), 남북방향의 current velocity (v-velocity)를 나

타낸다. 빨간색 실선이 관측, 연두색 실선이 600m 해상도의 모델결과, 검정색 실선이 66m 해상도의 모델 결과를 보여주고 있는데, 600 m의 경우 v-velocity 가 음의 값에서 양의 값으로 급하게 변경되는 구간 즉, 낙조가 창조로 바뀌는 구간에서 큰 오차를 보이지만, 66m 해상도의 경우 동 구간에서 오차가 많이 감소하게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 해상도가 높을수록 거차도와 사고지점사이에 계산 격자수가 많아져 낙조 후반부에 발생하게 되는 반류를 잘 재현하게 되기 때문이다. 그림 (d), (e), (f) 에서는 이 오차가 심한 구간에서 관측(빨간색), 600m(연두색), 200m(v파란색), 그리고 66 m(검정색) 의 결과를 확대하여 나타내었는데, 격자 간격이 조밀할수록 모델결과가 점점 좋아지고 있음을 알 수 있다.

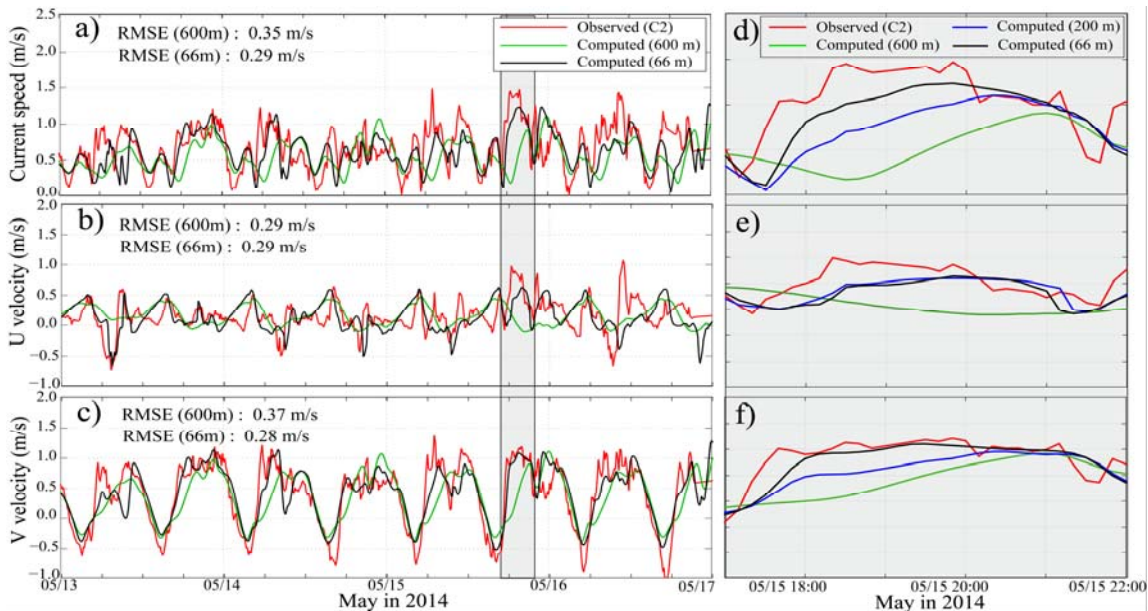


그림 3.1.24 사고해역에서의 해상도에 따른 모델 결과의 비교 a) 유속 b) 동서방향의 속도 c) 남북방향의 속도, d) 상세 유속, e) 동서방향의 속도(상세) f) 남북방향의 속도(상세)>

이와 같이 해양 또는 연안에서의 정확한 예측 수행하기 위해서는 최신 기술이 도입된 모델 개발, 수심을 포함한 정확한 입력자료 뿐 아니라 보다 높은 해상도에서의 계산이 필요하다. 하지만 계산 자원 및 계산 시간의 한계 때문에 무한히 해상도를 높일 수는 없고, 특히 operational forecasting system 의 경우에는 신속함까지 고려하여야 하므로 정확성과

신속성을 동시에 고려하여 계산하기 위해서는 적절한 격자크기의 선택이 필요하다. 예를 들어 대한민국 동해안과 같이 해안선이 단조롭고 유속 또한 강하지 않은 해역은 비교적 성긴 격자를 사용할 수 있지만 유속이 강한 남해안이나, 조수간만의 차이가 큰 서해안의 경우 공간적인 조류패턴을 보다 정밀하게 재현하기 위해서는 조밀한 격자체계가 필요하다.

나. 고해상도 예측 시스템 구성

(1) 모델 개요

(가) 순환 모델 : MOHID

본 연구에서 사용된 모델은 포르투갈의 리스본 대학에서 개발한 MOHID (MOdelo HIDrodinamico) 로 현재 포르투갈 연안에서 예보시스템으로 운용하고 있는 3차원 순환 모델이다. MOHID 모델은 연안과 하구역에 적용할 수 있는 다기능 3차원 수치해석 모델로 기본적으로 조석 및 해일과 같은 연안·하구역에서의 물리적 작용을 계산하며, 유체특성(수온, 염분 등), Eulerian 물질이동, Lagrangian 물질이동, turbulence, 퇴적물의 이동, 침식과 퇴적, 기상 및 파랑조건 고려, 수질 및 생태, 유류확산 등을 계산할 수 있는 60개 이상의 모듈로 구성되어 있으며, 동적결합(nesting) 기법을 적용하여 보다 정밀하게 관심 지역의 해황을 재현할 수 있는 모델이다.

MOHID 모델은 수평적으로 직교(cartesian) 또는 직교곡선(orthogonal curvilinear) 격자체계를 사용하며, 수직적으로는 시그마와 직교좌표계를 개별 또는 혼합 사용할 수 있는 GVC(general vertical coordinate) 시스템의 적용이 가능하며, 공간적으로는 유한체적법(finite volume method)을 사용하고, 시간적으로는 반음해 ADI (semi-implicit Alternate Direction Implicit) 알고리즘을 사용하여 계산상의 안정성 제약을 최소화 한다. 또한, 이동경계 처리가 가능하여 조건대가 넓게 분포한 우리나라의 지형에 필수적인 조건대 처리가 가능한 모델이다. MOHID 모듈에 대한 동수역학 모듈의 모식도는 그림 3.1.25와 같다.

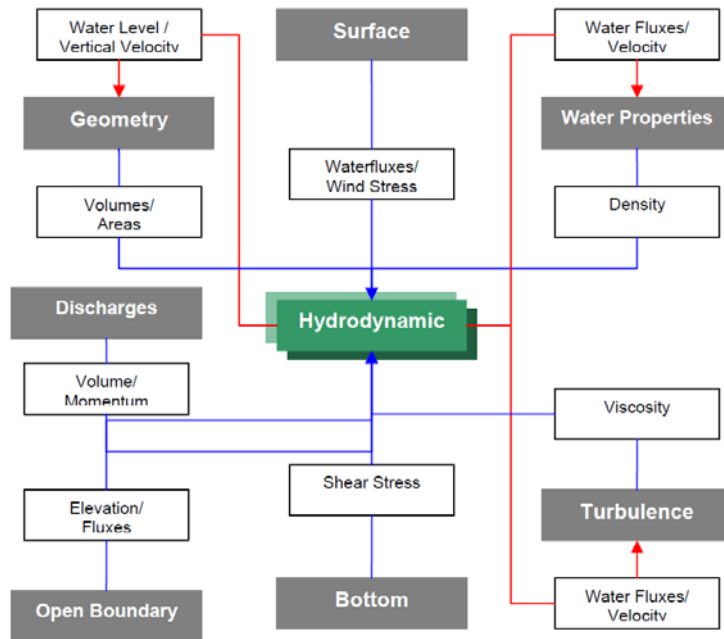


그림 3.1.25 MOHID 모듈에 대한 동수역학 모듈 모식도

MOHID 모델의 기본방정식은 정수압 평형이 Boussinesq와 Reynolds 근사에 의한 가정에 의해 유도되었고 수평류의 평균류에 대한 운동량 평형은 다음과 같다.

$$\partial_t u = -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p + \partial_x((\nu_H + \nu) \partial_x u) + \partial_y((\nu_H + \nu) \partial_y u) + \partial_z((\nu_t + \nu) \partial_z u) \quad (1)$$

$$\partial_t v = -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) - fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_y p + \partial_x((\nu_H + \nu) \partial_x v) + \partial_y((\nu_H + \nu) \partial_y v) + \partial_z((\nu_t + \nu) \partial_z v) \quad (2)$$

여기서 u, v, w 는 각각 속도벡터의 x, y, z 방향 성분이다. f 는 코리올리 파라미터이고 ν 는 분자의 동점성계수($1.3 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$)이며, p 는 압력이다. 속도의 시간적인 변화는 이류수송, 코리올리 힘, 압력경사 및 난류확산과 평형을 이룬다.

연직속도는 비압축성 연속방정식으로부터 계산되고, 저면으로부터 수심 z 까지 적분함으로써 계산된 w 는 다음과 같다.

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (3)$$

$$w(z) = \partial_x \int_{-h}^z u dx + \partial_y \int_{-h}^z v dy \quad (4)$$

자유수면 방정식은 연속방정식을 전체 수주에 걸쳐 다음과 같이 적분하여 계산된다.

$$\partial_t \eta = -\partial_x \int_{-h}^{\eta} u dz - \partial_y \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (5)$$

정수압 근사는 다음과 같다.

$$\partial_z p + g\rho = 0 \quad (6)$$

여기서 g 는 중력이고, ρ 는 밀도이다. 만약 대기압 p_{atm} 은 압력 p 로부터 추출되고 밀도 ρ 는 일정한 기준밀도 ρ_0 와 편차 ρ' 로 분리된다면 자유수면부터 수심 z 까지 적분한 후에 압력이 다음과 같이 계산된다.

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z^{\eta} \eta \rho' dz \quad (7)$$

위 식은 해수면에서 대기압을 가지는 어떤 수심에서의 압력과 관련되어 있고 해수위와 변칙적인 압력이 수면과 그 위치 사이에 결합되어 있다. 이러한 표현과 Boussinesq 근사를 이용함으로써 x_i 방향에서 수평압력경사는 세 성분으로 나뉘어질 수 있다.

$$\partial_{x_i} p = \partial_{x_i} p_{atm} - g\rho_0 \partial_{x_i} \eta - g \int_z^{\eta} \eta \partial_{x_i} \rho' dz \quad (8)$$

전 압력 경사는 대기압력, 해수위(순압경사) 및 밀도분포(경압경사)의 합이다. 밀도는 염분 및 수온으로부터 얻어지고 water properties module에 의해 수송되어진다.

표면 경계조건은 w의 연직플럭스가 수면에서 '0'이라는 조건하에서 수면을 가로지르는 모든 이류플럭스는 "0"으로 가정되며, 운량의 확산 플럭스는 다음과 같다.

$$\nu \frac{\partial \overline{\nu_H}}{\partial z} \Big|_{surface} = \vec{\tau}_w \quad (9)$$

여기서 바람응력은 2차 마찰법칙을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{\tau}_w = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}| \quad (10)$$

여기서 C_D 는 풍속의 함수인 항력계수이고 ρ_a 는 대기밀도이며, W 는 10m 높이에서의 풍속이다.

저면 경계조건에서 저면의 이류 플럭스는 '0'으로 주어지고 운동량의 확산량은 저면응력에 의해 결정되며, 저면응력은 no slip 조건에 의한 저면 부근의 속도에 의존하는 2차 마찰법칙을 이용하여 계산된다. 저면부근의 확산항은 다음과 같다.

$$\nu \frac{\partial \overline{\nu_H}}{\partial z} \Big|_b = \nu_H |\overline{\nu_H}| \quad (11)$$

여기서 C_D 는 저면 항력계수로 다음과 같다.

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{\log\left(\frac{z+z_o^b}{z_o^b}\right)} \right)^2 \quad (12)$$

여기서 κ 는 von Karman 상수이고 z_o^b 는 저면의 조도길이다. 이 2차 법칙은 저면속도가 저면위 격자의 중간부분에 위치하므로 경계층의 벽 부근의 대수법칙으로부터 유도된다. 이 항은 Backhaus(1985)의 반음해법으로 계산되며 바닥으로 향하는 수온과 염분의 flux

는 없는 것으로 가정된다.

MOHID 모형은 전지구 대양을 모의하기에는 부적합한 연안공학 모형이므로 이 모형을 이용하여 연안에서 정밀 격자로 3차원 계산을 하기 위해서 수온, 염분, 해류, SSH를 OGCM(Ocean General Circulation Model)에서의 다운 스케일링 기술이 필요하다. 이에 KOOS에서는 HYCOM 자료를 다운스케일링 하여 시스템을 운영하고 있다. 이러한 연안 순환 예측 시스템의 주요 개념은 보다 큰 영역에서 계산한 모델의 결과를 정밀영역에서 초기조건 및 경계조건으로 적용하는 것으로 낮은 해상도의 모델결과를 정밀 영역의 격자에 내삽 적용하여 초기조건을 구성해야 하는 것이다 (Leitão et al, 2005). 여기에 모델을 3차원 baroclinic으로 구성하여 고해상도의 국지 조석, 조류, 기상 자료 등의 자료들을 추가하여 계산하는데, 천문조에 의한 조석 및 조류 정보는 광역에서 2차원 barotropic 모델을 구성하여 입력하여야 한다. 본 연구에서는 KOOS에서 생산해내는 3차원 순환 결과를 이용하여 정밀 격자에 적용하였다. 연안순환 예측시스템의 운용 : 연안 순환 예측 시스템은 1일 1회 운용되고, 조석, 수온, 염분등의 결과를 산출한다.

(나) 파랑 모델 : SWAN

모형을 통한 파랑 예측 방법을 고려하기 위하여 SWAN(Simulation WAVes Nearshore) 모델을 선택하였다. SWAN 모델은 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 주로 연안역, 호수 및 하구의 파랑 매개변수들을 사실적으로 구하기 위한 3세대 파랑 모델로 본 연구에는 SWAN version 40.91을 사용하였다.

SWAN은 해류의 영향을 고려한 wave action balance equation에 기초하여 계산하고, 파랑의 천수, 굴절 그리고 해류에 의한 변형 등을 고려하여 계산한다. 이 외에도 바람에 의한 파의 생성과 파간 상호작용을 재현하며, 백파(white capping), 쇄파 그리고 저면 마찰에 의한 파의 소멸 등도 재현이 가능하다 (Booij et al., 1999).

쇄파대와 같이 비선형 현상이 지배적인 환경에서 SWAN은 파랑을 2차원 스펙트럼으로 표현하여 계산한다. SWAN에서 고려되는 스펙트럼은 에너지 스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ (여기서, σ 는 각주파수(intrinsic angular frequency))이 아니라 작용스펙트럼 $N(\sigma, \theta)$ 이다. 그 이유는 해류가 존재할 경우 작용은 보존되지만, 에너지는 보존되지 않는 성질을 갖고 있기 때문이다. 에너지 스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 과 작용스펙트럼(wave action spectrum) $N(\sigma, \theta)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (13)$$

SWAN에서 파랑스펙트럼의 발달은 작용평형 방정식에 의하여 기술되는데, 직교 좌표계에서 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (14)$$

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

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (15)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (16)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla h \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (17)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (18)$$

여기서, s와 m은 각각 파향선(wave ray)과 파향선에 수직인 좌표를 의미한다. 식(14)의 우변은 원천항(source and dissipation)을 나타내며 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (19)$$

여기서, S_m 는 바람에 의한 에너지 유입이고, S_{ds} 는 저면 마찰 또는 쇄파에 의한 에너지 소산, S_{nl} 는 파랑 간 상호작용에 의한 에너지 전달을 의미한다.

본 연구에서 구축한 파랑 예측 시스템은 연안순환예측 시스템과 같은 격자 구성으로 SWAN 모델을 이용하여 구축하였으며, 스펙트럼 모델이 가지고 있는 항내의 반사 및 회절 현상 재현의 한계를 해결하여 정확하게 예측하기 위하여 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 예측시스템을 추가적으로 구축하였다. 이 모델과 결과에 대해서는 다음 장에서 따로 언급한다.

(2) 전연안 300 m 해상도 예측 시스템 구축 및 운영

세월호와 돌고래호 사고를 겪으면서 예측 모델에 대한 관심이 증가하기 시작하였고, 모델의 해상도에 대한 중요성도 부각되기 시작했다. 앞에서 언급한 바와 같이 연안순환 모델링에서의 해상도는 매우 중요하다. 하지만 예측 시에는 정확성 뿐 아니라 계산 속도도 고려해야하기 때문에 한정된 계산 자원과 시간에 최대한의 정확도를 낼 수 있는 격자 크기의 선택이 필요하다. 이에, 본 연구에서는 연안 300m 격자를 적절한 해상도로 설정하고 연안 예측 시스템을 계획하였다. 이 예측 시스템은 KOOS 의 2 km (L3) 연안 예측 시스템의 자료를 이용한 순환 및 파랑 예측 시스템이다. 본 과업이 진행되는 동안 남해안, 서해안, 동해안의 순서로 전 연안 300m 해상도의 예측 시스템을 구축하는 것이 기본 계획이었다. 이는 우리나라 전 연안을 9개 영역 (L4-1 ~ 9)으로 나누고 이 중, L4_1, 2, 3 은 서해안 영역, L4_4, 5, 6 3개 영역과, 제주 영역인 L4_9 영역은 남해안 영역, L4_7, 8은 동해안 영역으로 구축 예정이었다. 2015년 9월 제주도 돌고래호 사고 이후 KOOS에서 전연안 300m 해상도 예측 시스템 구축으로 계획을 변경함에 따라, 중복성을 피하기 위해 1차년 남해안 예측 시스템만을 구축하였다. 따라서 본 보고서에서는 남해안 300m 해상도 순환예측 시스템만을 소개한다. 300 m 해상도의 연안 순환 예측 시스템의 계산 방식은 기존의 L1, L2, L3 순환예측 계산 후 Imposed run 방식을 이용하여 L4 영역 계산하는 방식으로 그 개념도는 그림 3.1.26과 같다.

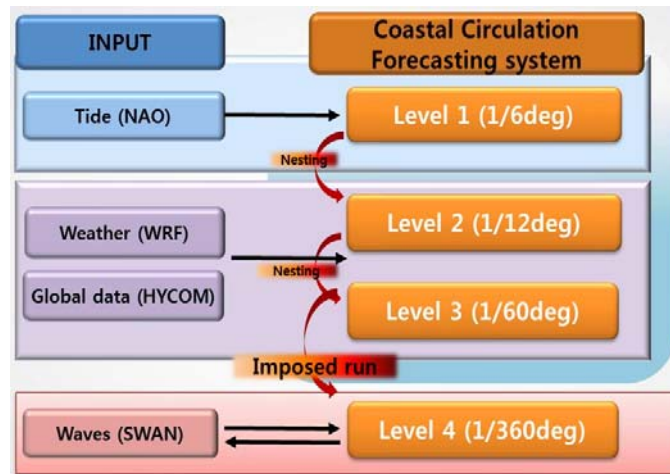


그림 3.1.26 고해상도 연안순환예측 시스템의 개념도 (L1 - L4)

예측결과는 아래의 그림과 같다. 예측은 하루에 한번 72시간 예측을 수행하고, 앞서 언급한 바와 같이 진도 해역을 포함하는 L4_4 영역, 여수 남해도를 포함하는 L4_5 영역, 부산, 울산을 포함하는 L4_6 영역, 그리고, 제주도를 포함하는 L4_9 영역에서 300 m 해상도의 조위, 층별 수온, 염분, 유속 등의 결과를 출력한다. 또한, 부분적으로 추가적인 고해상도가 필요한 지역에 대비하여 전연안 100 m 급의 격자 시스템을 구축하여 유사시에 운영할 수 있도록 하였고, 그 예로 세월호 사고 지점이었던 맹골수도, 우리원의 본원 및 분원이 위치한 부산항, 장목항 등에 적용하여 보았다. 맹골수도에 관한 내용은 앞절의 고해상도이 중요성을 강조하기 위해 언급되었고, 다음절에서 부산항, 장목항 결과를 제시하였다.

파랑의 경우에도 해수 순환 영역과 동일하게 전 연안을 300 m 격자 9개 영역으로 구분하여 구성하였다. 그림 3.1.30에서는 파랑 예측 시스템의 결과 예를 보여주고 있고, 매일 72시간 예측 시스템으로 운영 중이다. 하지만 스펙트럼 파랑 모델의 경우 연안에서 회절 및 반사를 제대로 재현하지 못한다. 본 연구에서는 Boussinesq wave 모델인 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 파랑 예측 시스템을 구축하여 스펙트럼 모형이 가지고 있는 단점을 보완하고자 하였다. 태풍시 파랑모델의 검증 결과 및 Boussinesq wave 모델을 이용한 폐쇄해역에서의 파랑 모델 결과를 관측 결과와 비교·제시하였다.

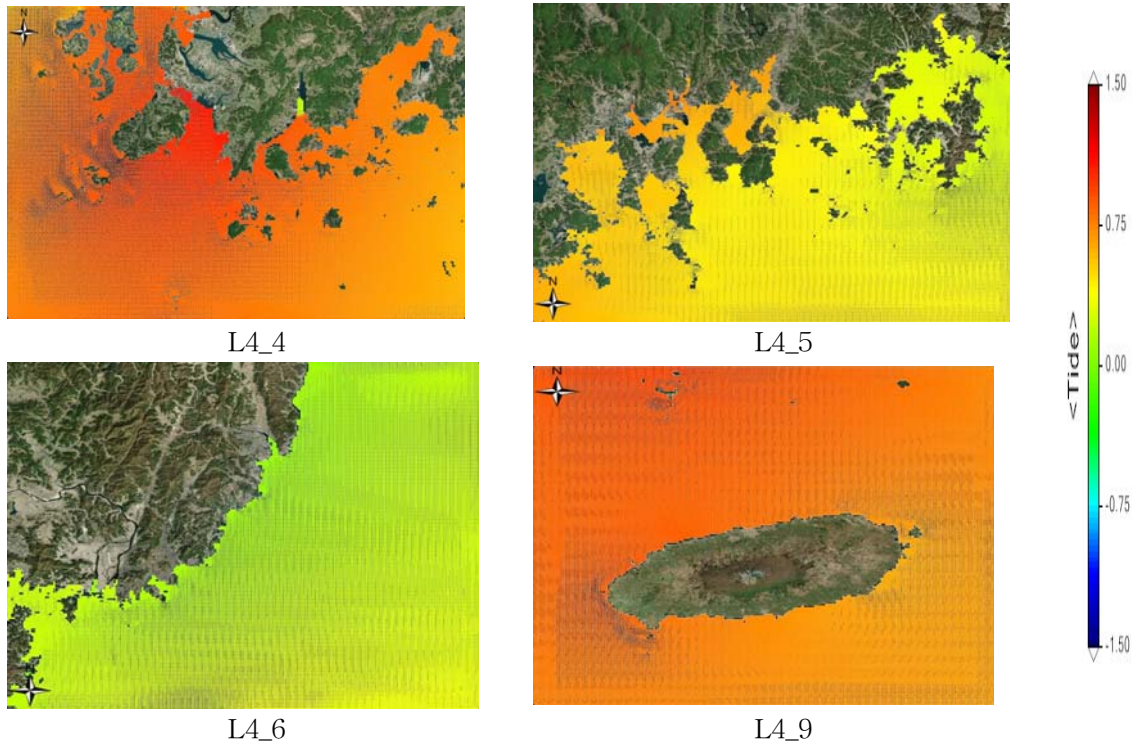


그림 3.1.27 남해안 300m 격자의 조위 및 유속, 유향 예측 결과의 예

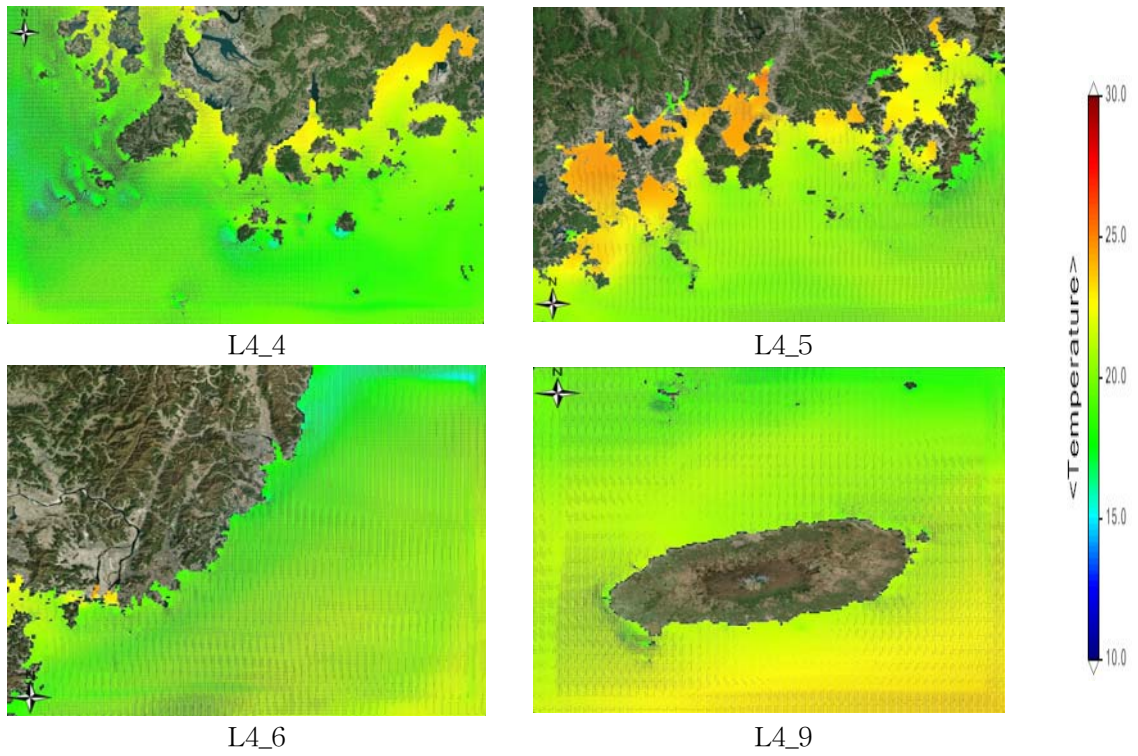


그림 3.1.28 남해안 300m 격자의 수온 및 유속, 유향 예측 결과의 예

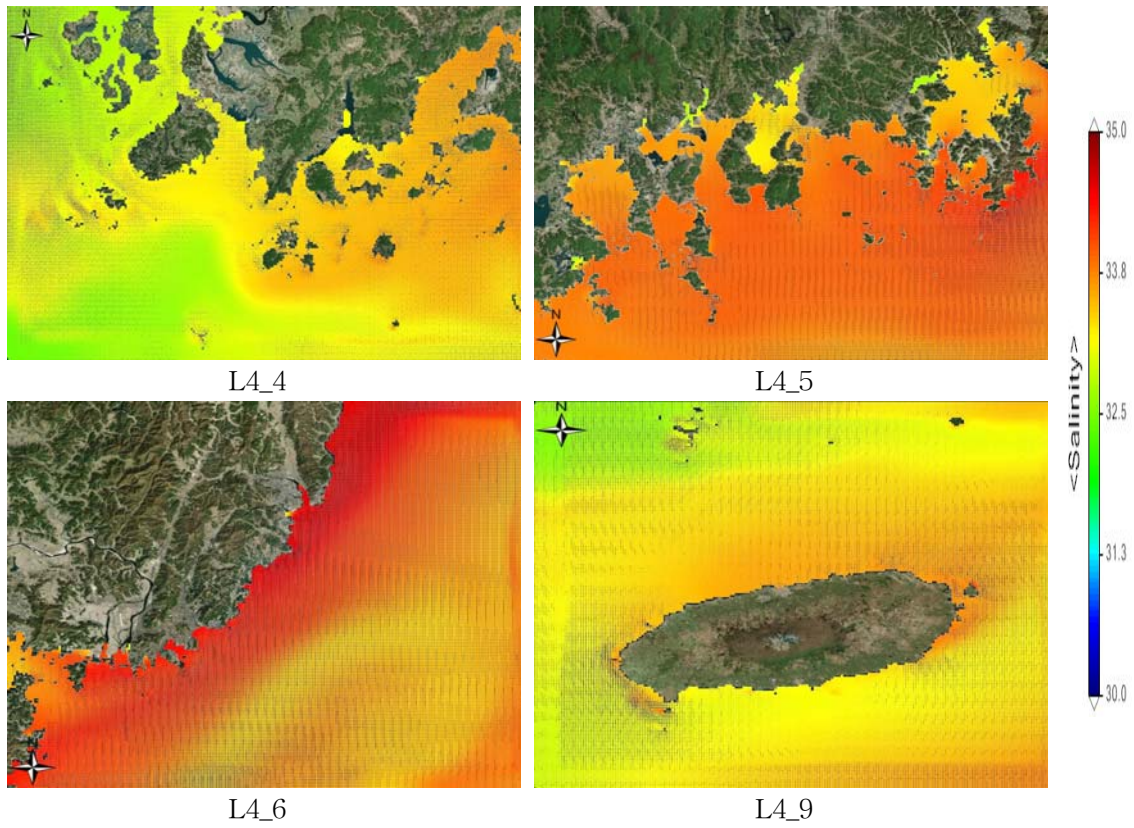


그림 3.1.29 남해안 300m 격자의 염분 및 유속, 유향 예측 결과의 예

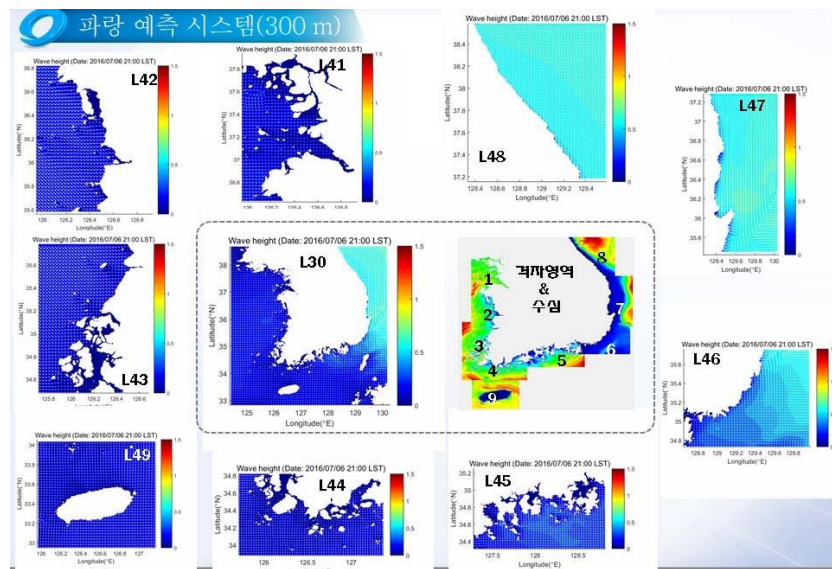


그림 3.1.30 전 연안 300m 해상도 파랑 예측 시스템 영역 및 결과

이와 같은 격자수와 계산 time step 을 감안하였을 때, 계산 자원의 보완이 필요하여 고성능 컴퓨팅 시스템을 구축하였고, 그 사양은 아래와 같다.

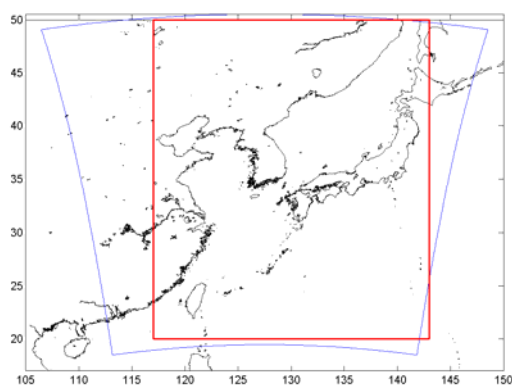
- Dell R630 (Intel E5 2695 v3 14Core 2.3GHz X 2EA) : 19node (532core)
- Mellanox InfiniBand QDR 36port (1EA)
- Mellanox Infiniband QDR HCA (16EA)

(3) 부산항, 장목항에서의 예측시스템 구축 및 검증 결과

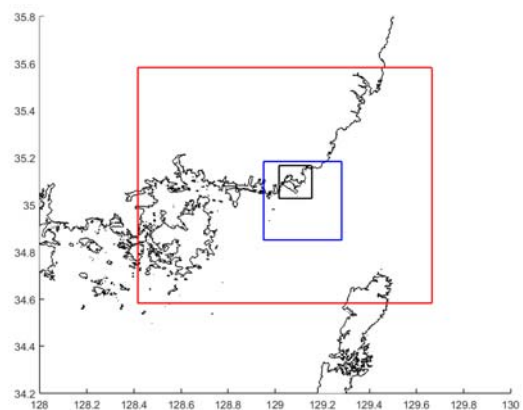
고해상도 예측 시스템의 검증은 우리원이 본원 및 분원이 위치한 부산항과 장목항에서 수행하였다. 검증을 위한 관측은 각각의 영역에서 조위, 유속, 파랑 등의 요소에 대해 수행하였고, 그 결과는 아래의 그림과 같다.

(가) 부산항 고해상도 예측 시스템

우리원의 부산 이전을 맞이하여 신축 공사 및 주변 환경 연구를 위한 예측 시스템을 구축 하였다. KOOS 정보를 경계조건으로 하며 그 해상도는 순환 예측의 경우 최소 300 m, 파랑예측의 경우 2 m 이다. 순환 모델의 경우 격자와 결과는 아래의 그림과 같고, 모델과 관련된 자세한 내용은 ‘부산항 고해상도 해양정보제공시스템 개발, 구축’ 보고서 (2016)를 참고할 수 있다.

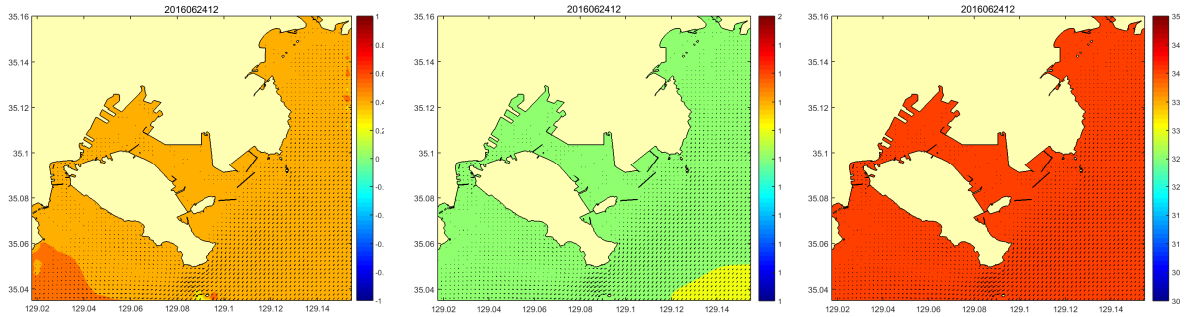


KOOS (L1, L2) 격자



부산항 고해상도 (L3, L4, L5) 격자

그림 3.1.31 부산항 인근 고해상도 예측 시스템 격자 영역



조위, 유속, 유향

수온, 유속, 유향

염분, 유속, 유향

그림 3.1.32 부산항 인근 고해상도 예측 시스템 결과

본 연구과제로부터 수정, 개선된 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 부산항 내에서의 파고 예측을 수행하였다. FUNWAVE-TVD 모형의 수정, 개선된 내용은 2절에 제시하였다. 부산항 내에서의 실시간 파고예측을 수행하기 위해서 한국해양과학기술원의 KOOS에서 수행되는 SWAN 모형을 이용하여 심해에서 전파해오는 파랑을 계산하였으며, 매시간 계산되어지는 SWAN의 결과를 FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역 경계에서 입사파 조건으로 사용하였다. FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역을 그림 3.1.33에 제시하였다.

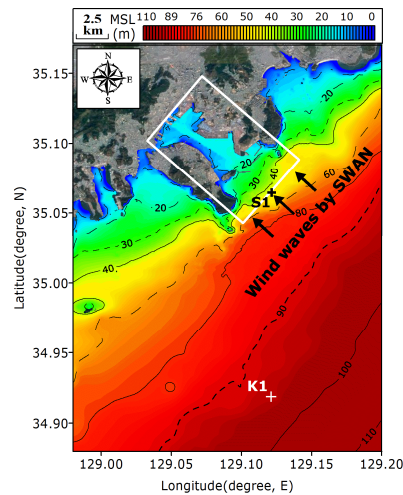


그림 3.1.33 FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역(□)과 수심도

KOOS에서 수행되는 SWAN 모형의 모의영역을 그림 3.1.34에 제시한다. SWAN 모형에서는 WRF 모형의 풍속과 풍향 결과를 이용하여 풍파를 모의하였으며, 부산항 인

근까지 N1, N2, N3의 nested grid를 사용하여 모의하였다. 실시간으로 계산되는 SWAN 모형의 결과를 검증하기 위하여 그림 3.1.33에 제시되어 있는 국립해양조사원에서 설치한 K1 지점의 부이 관측 결과와 비교하였다. 그림 3.1.35에 SWAN 모형의 파고 결과와 K1 지점의 부이에서 관측된 파고 결과를 비교하여 제시하였다. SWAN 모형 결과와 관측치와의 차이를 계산하기 위하여 Willmott (1981)이 제안한 다음 식을 사용하였다.

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (20)$$

여기서 M_i 는 수치모형결과, O_i 는 관측결과, \bar{O} 는 관측치의 평균을 의미한다. 2016년 1월 26일부터 2016년 9월 2일까지의 관측치와 SWAN 모형의 수치해를 비교한 결과 $D = 0.89$ 로 상당히 일치하는 결과를 보였다.

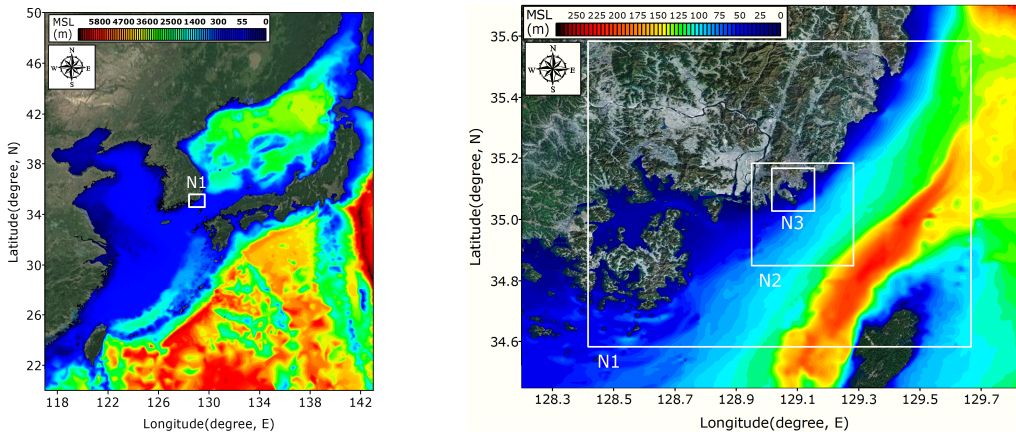


그림 3.1.34 SWAN 모형의 계산영역과 수심도

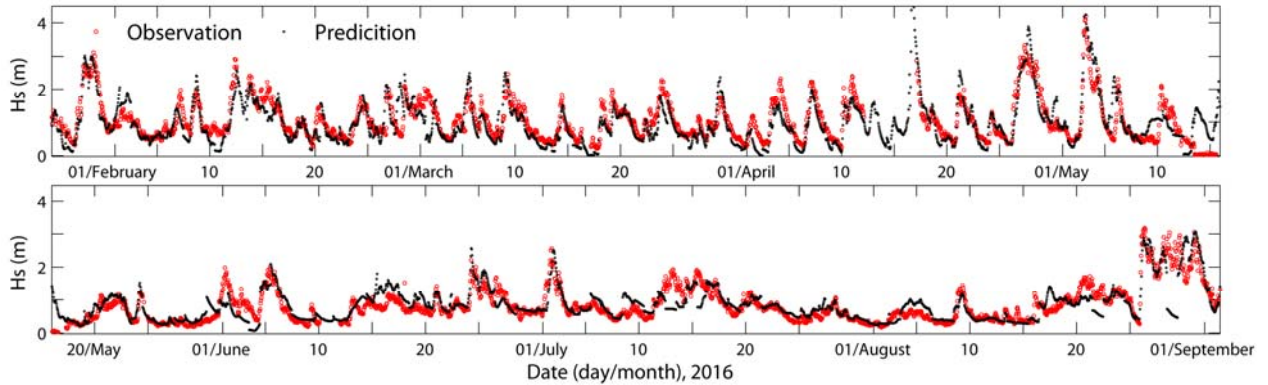


그림 3.1.35 K1 정점에서 SWAN 모형 결과와 관측치 비교

SWAN에서 계산되는 실시간 파고, 주기, 파향을 FUNWAVE-TVD 모형의 입사파 조건으로 사용하여 부산항 내에서의 실시간 예측을 수행하기 위하여 다음 과정을 수행하였다. 표 3.1.7과 같이 총 45 case의 파고, 주기, 파향 계급에 따른 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 실험을 수행하여 각 실험안마다 유의파고를 미리 계산하였다. FUNWAVE-TVD 모형의 경계에서 SWAN 모형에 의한 입사파에 따른 부산항 내에서의 파고를 예측 할 수 있도록 미리 계산해놓은 파고 값을 interpolation하여 예측하는 시스템을 구성하였다.

표 3.1.7 FUNWAVE-TVD 모형의 실험안

Significant wave height (m)	0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0
Peak wave period (s)	8, 10, 12
Peak wave direction (deg)	117.5, 140.0, 162.5

FUNWAVE-TVD 모형에서는 각 실험안마다 최단파의 재현을 위하여 $\Delta x = \Delta y = 2$ m로 구성하였다. 정상상태에서의 유의파고를 계산하기 위하여 7,200 s까지 모의를 수행하였으며, 안정화된 계산결과를 사용하기 위하여 2,000 s - 7,200 s까지의 결과를 사용하였다. 모의에 사용된 최대 격자수는 16,870,448개이며, MPI 계산수행을 위하여 924 core를 사용하였다. Wave breaking을 모의하기 위하여 eddy viscosity type breaking 방법을 사용하였다. 내부조파 방법을 이용하여 조파하기 위하여 220° 회전한 지형을 사용하였다. 45 case 중에 $H_s = 3$ m, $T_{peak} = 10$ s, $\theta_{peak} = 0^\circ$ 일 때의 수면변위를 그림 3.1.36에 제시하였다.

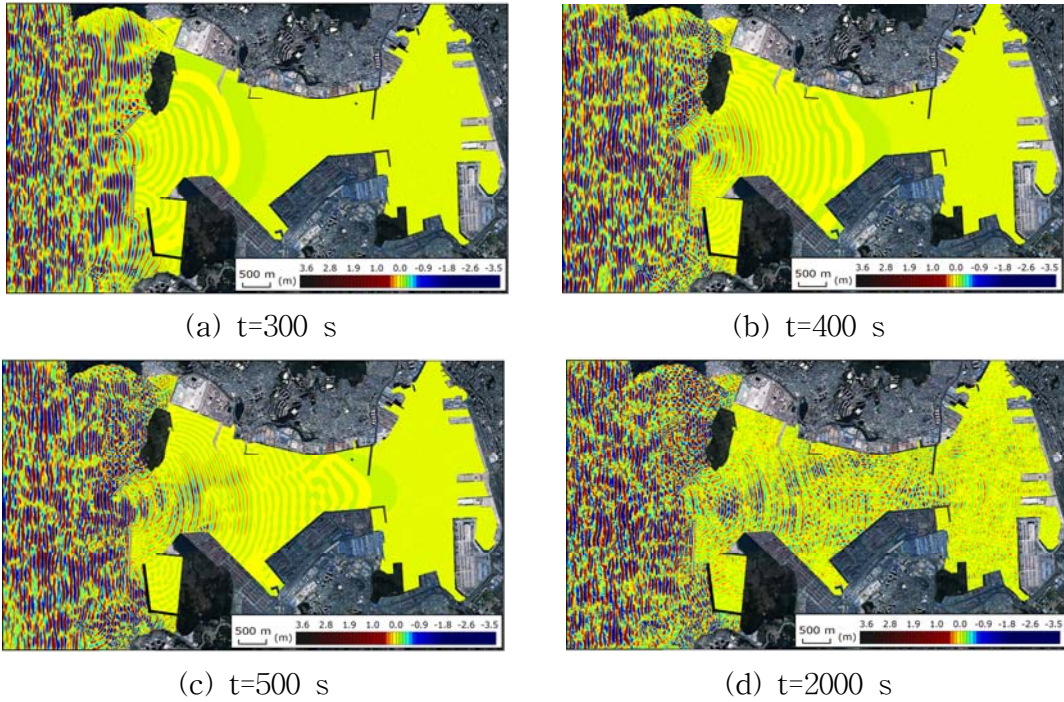


그림 3.1.36 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 불규칙파 모의 결과

SWAN과 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 예측시스템을 검증하기 위하여 2016년 1월 26일부터 2016년 9월 2일까지 부산항 내측의 세 정점에서 수압식파고계를 이용하여 관측을 수행하였다. 부산항 내측의 관측 정점 T1, T2, T3를 그림 3.1.37에 제시하였다.

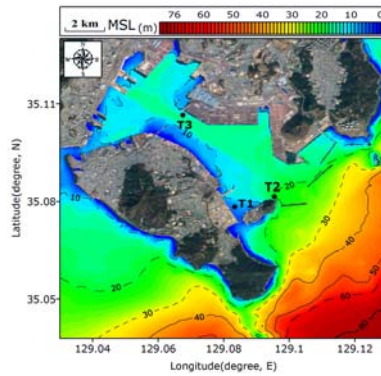
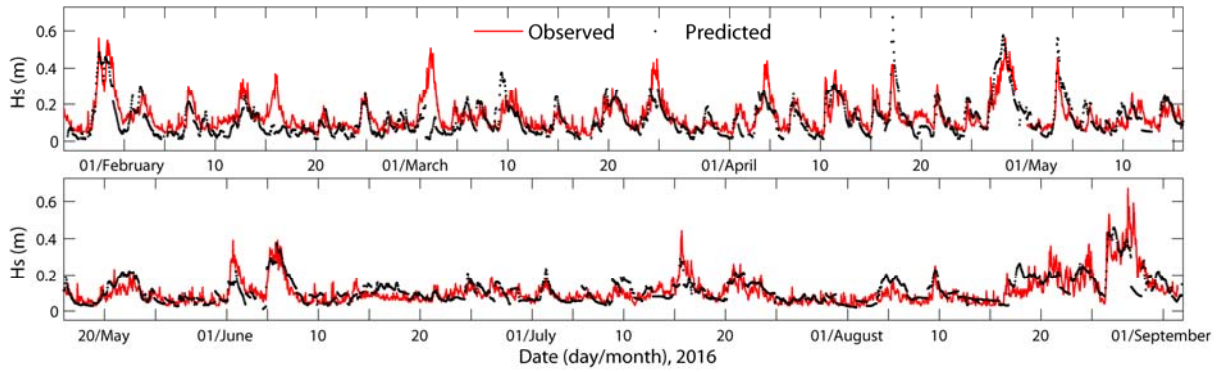


그림 3.1.37 부산항 내측의 관측정점

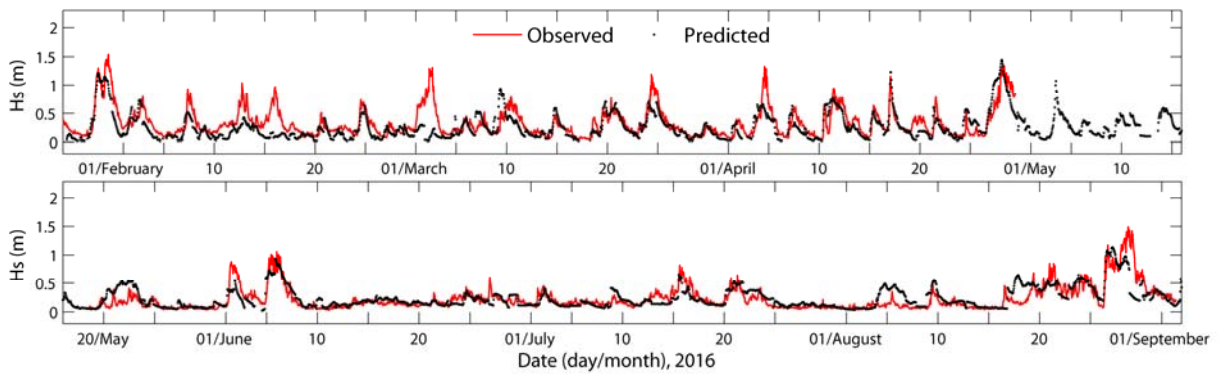
T1, T2 지점의 수압식 파고계는 FUNWAVE-TVD 모형에서 파랑 회절에 대한 재현성을 검토하기 위하여 설치하였으며, 설치된 위치의 수심은 각각 6.09 m, 19.58 m 이다. T3 지점의 수심은 7.02 m 이다. 그림 3.1.38에 각각 T1, T2, T3에서 관측치와 비교한 결과를 제시하였다. T1, T2, T3에서 2016년 1월 26일부터 2016년 9월 2일까지의 관측치와 수치 모델의 결과의 차이를 비교하면 각각 $D=0.84, 0.83, 0.75$ 가 계산된다. T1과 T2 지점에서는 관측치와 비교 결과 상당히 일치하는 결과를 보인다. 하지만, T3 지점에서 관측치와의 비교 결과는 T1과 T2 지점에서 비교한 결과보다는 낮은 수치를 보이는데, T3 지점에는 항해하는 선박의 영향으로 항주파가 많이 작용한 것으로 판단된다.

(나) 남해 연구소 인근 장목항 고해상도 예측 시스템

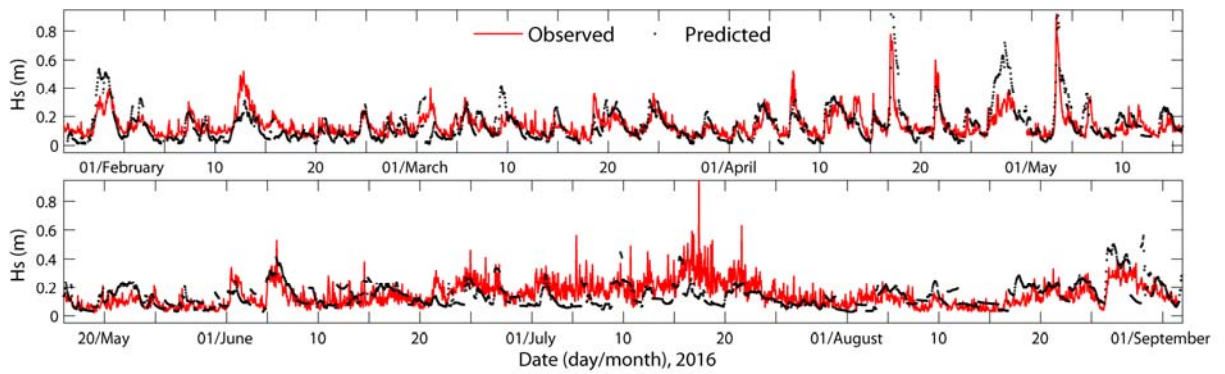
우리원의 남해 분원이 위치한 거제도 장목항에 대하여 정밀 격자 모델을 구축하여 예측 시스템에 적용하였다. 그림 3.1.39는 장목항 인근의 고해상도 예측 시스템 격자 영역을 보여주고 있고, 모델별 최소격자는 순환 모델의 경우 300 m, 파랑 모델의 경우 60 m 이다. 그림 3.1.40은 예측 결과의 검증, 그림 3.1.41은 조류 검증 결과를 보여주고 있다. 해당 모델링은 우리원 남해연구소 부두건설 사업에서 설계파 산출 및 부유물 확산 예측 등에 이용되기도 하였다.



(a) T1 정점에서 비교한 결과



(b) T2 정점에서 비교한 결과



(c) T3 정점에서 비교한 결과

그림 3.1.38 부산항 내측의 세 정점에서 관측치와 비교한 결과

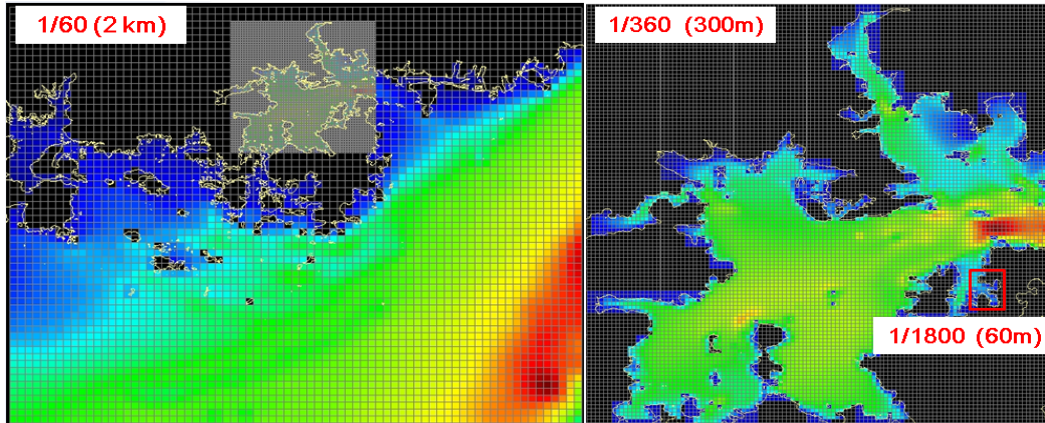


그림 3.1.39 장목항 인근 고해상도 예측 시스템 격자 영역

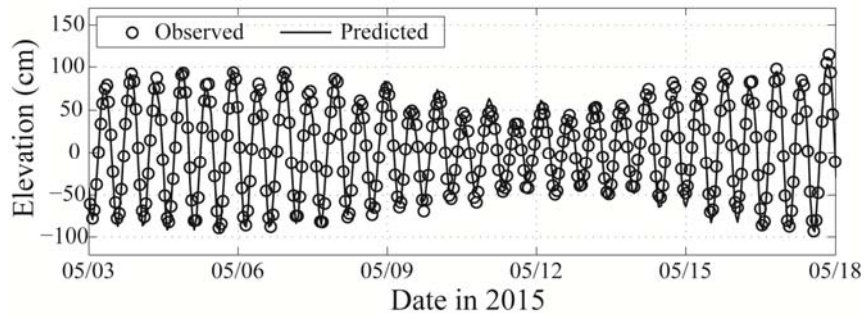


그림 3.1.40 장목항 인근 조위 검증 결과 예

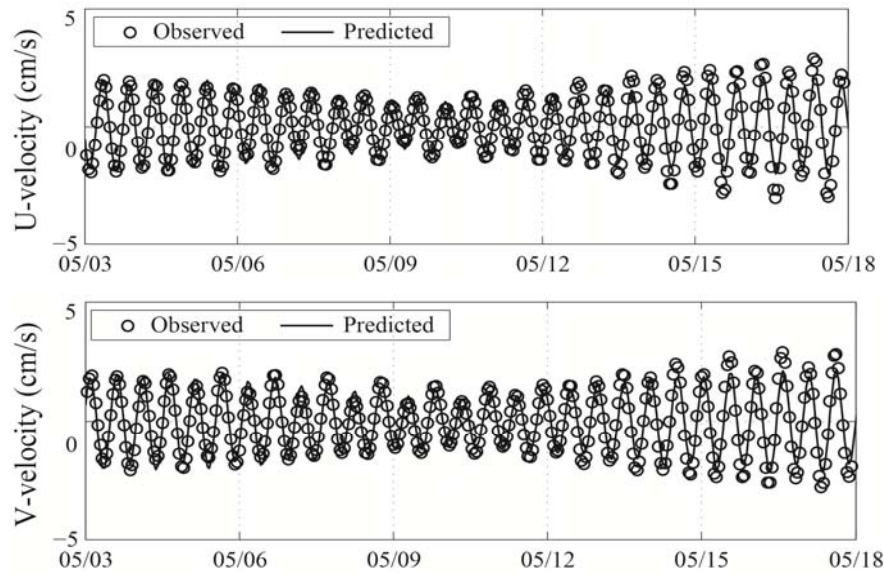


그림 3.1.41 장목항 인근 조류 검증 결과 예

다. 고해상도 예측 시스템 고도화

(1) 태풍 통과 시 파랑 및 폭풍해일 모의

2016년 10월 카테고리 4 의 태풍 Chaba 가 한반도를 관통하였고, 이로 인해 우리나라에서는 많은 재산피해를 입었다. 이 태풍은 대한민국 남쪽의 1825 km² 정도 크기의 제주도 동쪽을 관통하여 한반도 남동해 연안을 빠르게 스쳐서 통과하였으며 이 때 태풍 중심부의 관측정점에서의 풍속은 20 ~ 25 m/s 로 관측되었다. 이 태풍의 영향으로 한반도 남동해안에 위치한 여러 항 및 연안에서 침수 및 월파에 의한 피해가 발생하였고, 특히 감천항 및 다대포항의 피해가 가장 컸는데 두 항의 방파제가 거의 유실되었다. 이 두 항과 가장 가까운 관측정점인 국립해양조사원의 The Korea Straits Buoy Station (KS) 에서 관측된 파고는 12.9 m 이고, 이 때의 파향은 남-남남서였다. 이 관측 정점이 감천항, 다대포항과의 거리가 불과 17 km 남짓 이라는 점을 감안할 때, 두 항에 미쳤을 영향을 미루어 짐작해 볼 수 있다.

본 연구에서는 본 연구에서는 당시의 태풍의 특성 뿐 만아니라 조위, 조류, 해류 등의 물리적 환경 등을 분석하여 높은 파고를 일으켰던 원인을 찾고자 하였다. 이를 위해 관측 자료의 수집 뿐 아니라, 기상, 파랑, 그리고 유동 수치 모델을 수립하였고, 한반도 남동해안 해역의 기상 및 파고를 재현하였다. 우선 태풍 차바의 경로는 그림 3.1.42와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 이 태풍의 중심은 우리나라 남해안을 스쳐 일본으로 향했으며, 2016년 9월 28일에 발생해서 10월 6일에 소멸되었다.

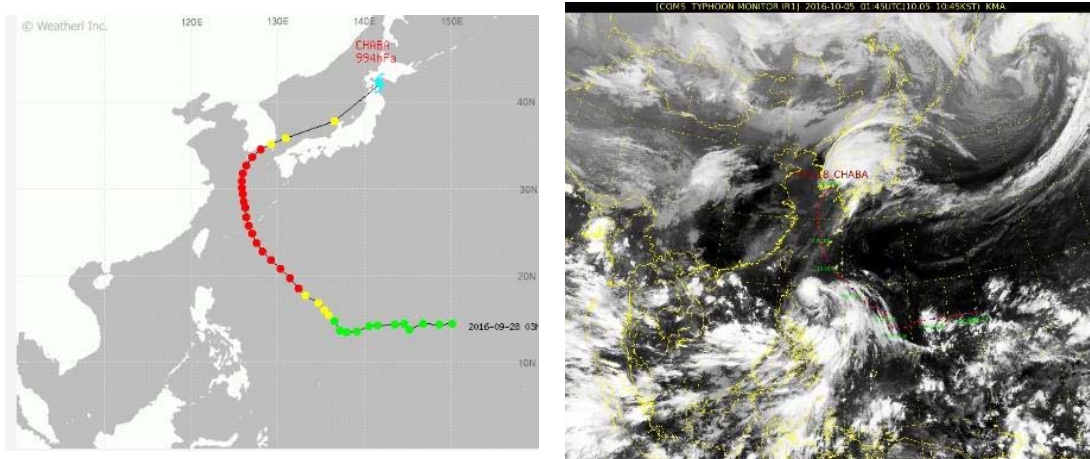


그림 3.1.42 태풍 차바의 경로(좌)와 우리나라 통과시 위성사진(우)

태풍 모의는 태풍 파라메타 모델인 TC96을 사용하였고, 여기서 태풍파라미터는 기상청 예보자료 사용하였다. 파랑 모델은 SWAN ver 40.91을 사용하였고, 격자 해상도는 광역 9 km, 상세역 2 km - 60 m 로 하였다.

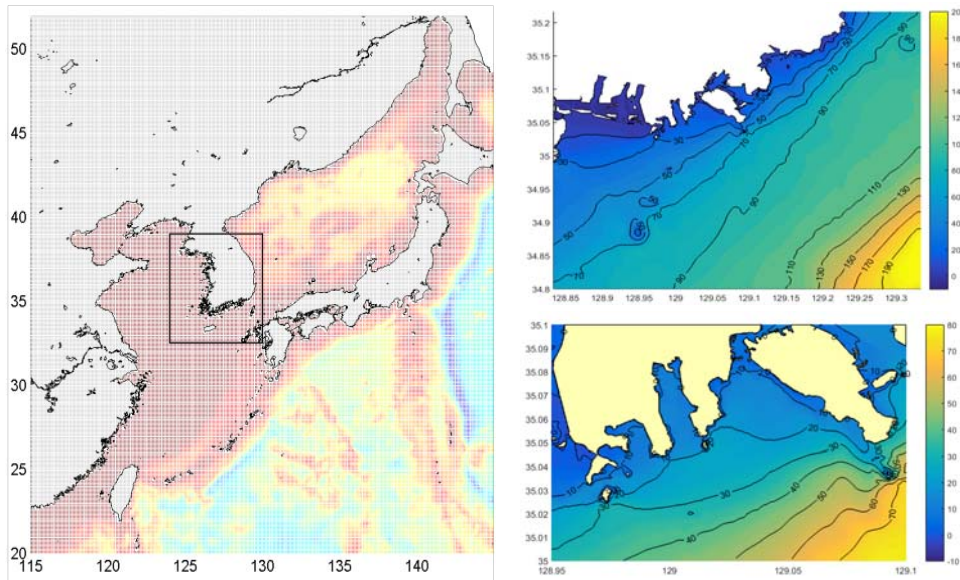


그림 3.1.43 태풍 차바 모의시 모의 영역

태풍 Chaba 통과 시 관측 자료는 기상청, 국립해양 조사원의 관측 정점 중 태풍 경로 상에 위치한 기상청의 거문도, 거제도, 포항 부이, 국립해양조사원의 KOGA-S02 부이가 있다. 각각의 부이에서의 최대 유의파고는 거문 : 11.2 m, 거제 : 11.5 m, S02 : 13.0 m, 포항 : 4.7 m 이었다.

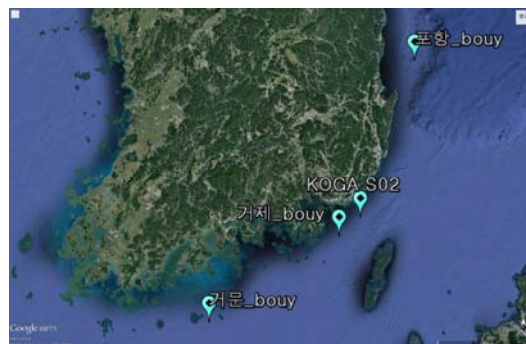


그림 3.1.44 태풍 차바 분석에 사용된 관측정점 위치

수치모델 계산 결과 거문도, 거제도, 포항에서의 검증 결과는 그림 3.1.45와 같고, 거문도의 결과가 다소 과대평가 (1.4 m), 거제도와 S02는 0.5 m 이내의 차이를 보인다.

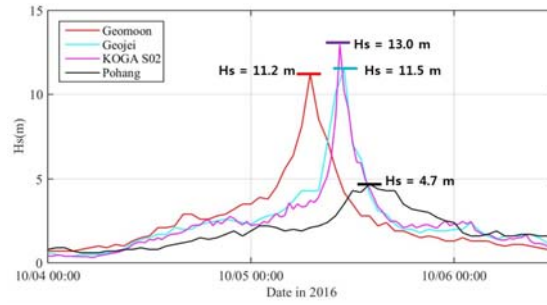
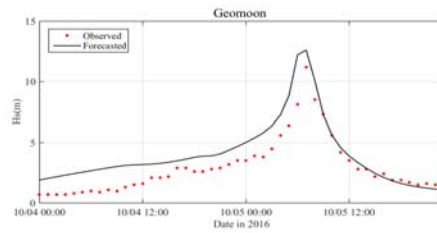
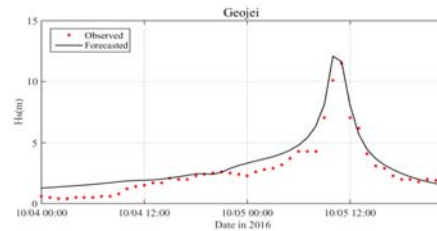


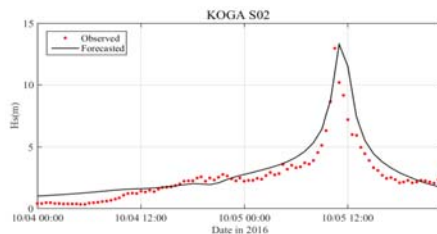
그림 3.1.45 태풍 차바시 거문도, 거제도, KOGA S02, 포항에서의 관측 결과(유의과고)



(a) 거문도 정점



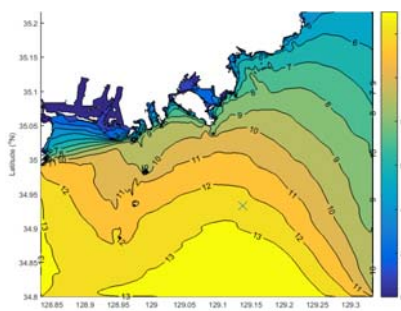
(b) 거제도 정점



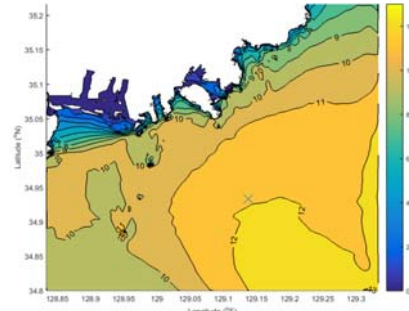
(c) KOGA S02 정점

그림 3.1.46 태풍 차바시 거문도, 거제도, KOGA S02에서의 관측과 모델결과 비교 (유의과고)

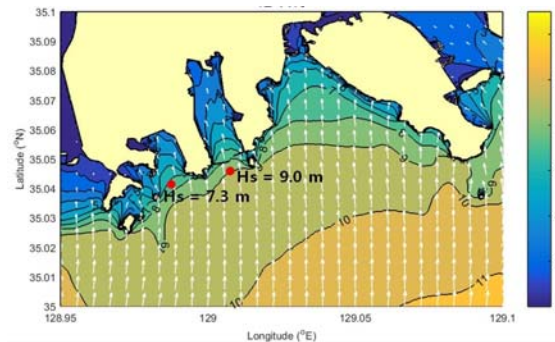
또한, 태풍으로 인해 붕괴된 감천항, 다대포항의 파고를 추정해 보기 위해 부산 (감천항, 다대포항 포함) 인근에 60m 격자를 구성하여 태풍 통과 시기인 10월 5일 0시부터 10월 5일 23시에 대하여 수치모의 수행하였고, 이중 파고가 가장 높았던 11시, 12시 자료를 제시하고자 한다. 당시 감천항 인근의 최대 유의파고는 12시에 최대 9.6 m, 다대포항은 7.9 m 였던 것으로 보이며, 이때의 파향은 S 또는 SSE로 계산되었다.



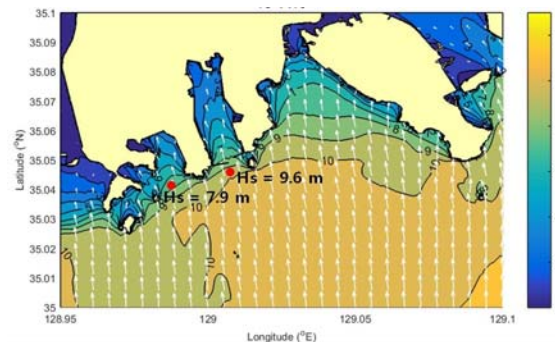
(a) 10월 5일 11시



(b) 10월 5일 12시



(c) 10월 5일 11시 (상세)



(d) 10월 5일 12시 (상세)

그림 3.1.47 태풍 차바 통과시 감천항, 다대포항 인근에서의 파랑 모의 결과(유의파고)

(2) 파랑 상호작용 정밀 계산 적용 연구

연안에서의 파랑에 의한 유동 요소들 즉, 연안류, 이안류 및 wave set-up 등의 요소를 계산하기 위해서는 파랑모델과 순환 모델의 연계계산이 필요하다. 이에, 정밀격자 유동, 파랑 상호작용 계산 모듈 개선하여 연안 격자에서 MOHID와 SWAN을 매 1시간 마다 결합하여 계산할 수 있는 예측 시스템을 구축하였다. 파랑모델과 순환모델의 연계 개요도를 보여주고 있고, 표는 순환모델과 파랑모델의 상호작용 모듈 흐름의 순서를 보여주고 있다.

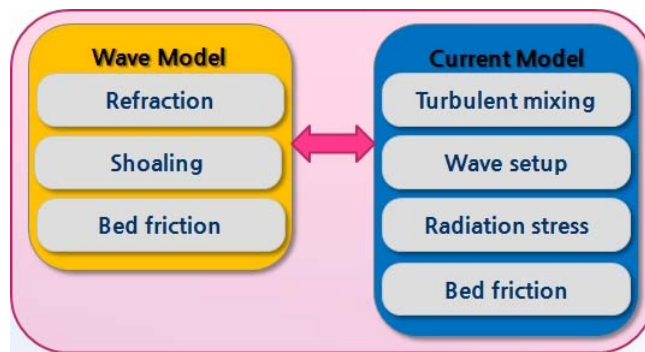


그림 3.1.48 파랑모델과 순환모델 연계 개요도

표 3.1.8 순환 모델과 파랑 모델 상호작용 모듈 흐름 순서(①파랑모델 계산 (non-stationary), ② 파랑→유동 ③ 유동모델 계산 ④ 유동→파랑)

계산시간 모델	계산시간									
	1h		2h		...		72h			
유동모델 (MOHID)	③		③		③		③			
정보교환	↑②	④↓	↑②	④↓	↑②	④↓	↑②	④↓	↑②	④↓
파랑모델 (SWAN)	①		①		①		①		①	①

(3) 비구조 격자를 활용한 연안 예측 시스템 구축

앞에서 언급한 바와 같이 돌고래호 사고 이후로 KOOS에선 전연안 300m 연안 시스템을 구축하게 됨에 따라 보다 고급기술을 적용하여 예측 시스템을 구축하고자, Flexible Mesh를 이용한 고해상도 연안해역 예측 시스템 검토하게 되었다. 기 구축된 전해역 300m

예측 시스템의 고도화를 위해 비구조 격자를 이용한 전 연안 9km - 2km - 300m 통합 예측 시스템 구축 검토 하였고, 이는 예측 시스템을 고도화하기 위한 차별화 전략이라고 할 수 있다. 이 기법은 기 구축된 KOOS의 격자를 그대로 이용하고 9km - 2km - 300m를 nesting 방식이 아닌 하나의 격자로 구성하여 계산 가능하게 하는 방식이다.

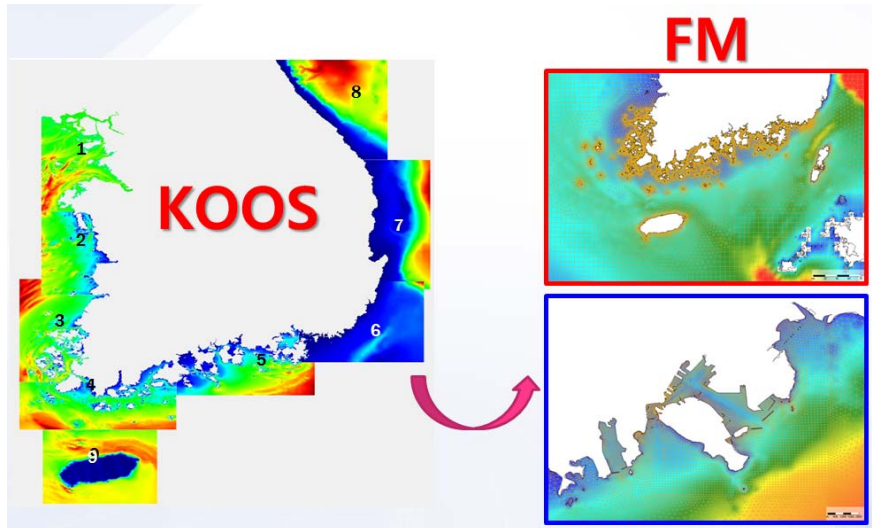


그림 3.1.49 KOOS 시스템의 300 m 격자도와 구축한 비구조 격자 예

(가) 적용모델

D-Flow Flexible Mesh(FM) 모델은 Deltares(네덜란드)에서 개발된 최신 hydrodynamical simulation 프로그램으로 만, 하천, 그리고 연안역에서 1D, 2D, 3D 계산과 다양한 문제를 다룰 수 있는 fully integrated computer software이다. 현재 D-Flow FM 모델은 유동, 파랑, 수질과 생태에 대한 수치계산을 수행 할 수 있으며, 퇴적물이동 모델과 지형변화 모델이 현재 개발 중에 있다.

D-Flow FM 모델은 서로 상호 연결이 가능한, 다중 interface로 묶여진, 다양한 module로 구성되어 있다. D-Flow FM 모델은 다차원(1D, 2D, 3D) 수리역학(그리고 물질 이동) 계산 모델로, 구조 및 비구조(boundary fitted grid) 격자상에 조석 및 기상 외력으로부터 비정상류(non-steady flow)와 물질이동을 계산할 수 있다. Flexible Mesh의 개념은 정방 격자(rectangular) 또는 곡선직교격자(curvilinear)와 삼각형(triangles), 직교 또는 곡선직교형태의 사각형(quads) 격자로 구성된 비구조격자(unstructured grid)를 복합적으로 적

용할 수 있음을 의미한다. 3차원 모의에서 수직격자는 시그마 좌표계로 정의되며, z-layer 및 z-layer와 시그마 격자간의 혼합사용은 현재 개발 중이다. D-Flow FM 모델의 적용영역과 계산 특징은 아래와 같다.

○ 적용 영역

- 조석과 풍성류(i.e. 폭풍해일)
- 성층 및 밀도류
- 하천
- 관개수로
- 도심 강우범람
- 쓰나미, 도수(hydraulic jump), 해일 및 홍수파(bore and flood wave)
- 만으로의 담수 유입
- 염수 침투
- 냉각수 취수와 오염수 방류
- 용존물질 및 오염물질 이동

○ 기본 계산 특징

- 조석 외력
- 지구자전효과(코리올리스 포스)
- 밀도류(운동방정식의 압력경도력항)
- 이류확산계산(밀도경사의 계산을 포함)
- 시·공간적으로 변화하는 바람 및 기압 고려
- 분자 점성 개념(eddy viscosity concept)을 기초로 한 수직 난류 점성 및 확산을 고려하는 발전된 난류모델($k-\epsilon$, $k-\tau$, algebraic, constant의 4가지 옵션)
- 시간변화를 고려하는 source and sink(e.g., river discharge)
- 임의의 장소 및 깊이에서 냉각수의 취수와 온배수의 방류
- 조간대 및 갈수기 하천에서의 drying and flooding의 계산

○ 특별 계산 특징

- 2차원 저면 응력 계수의 3차원 계수로의 자동전환
- 시그마 격자망에서 발생하는 인공적인 수직 확산과 흐름을 감소시키는 anti-creep correction
- 해수면에서의 열교환 및 파랑 기인 stress와 mass flux
- 저면 shear stress에 대한 파랑의 영향
- 침식과 퇴적의 연구에서 중요한 흐름상에서의 spiral motion phenomenon의 강도계산 (2차원 계산시 한정)
- 보다 정확한 flooding 결과의 도출을 위한 solver 내의 non-linear iteration
- 출력계수의 조화분석(tidal analysis)
- Pumping stations, fixed weirs, controllable barriers와 같은 특별 구조물의 고려 (1D, 2D, 3D)
- Bore의 전파에서 eddy의 shedding에 이르는 다양한 flow regimes에 적합한 advection scheme
- MPI 기준의 병렬계산

D-Flow FM 모델과 Delft3D-Flow 모델간의 가장 기본적인 차이점은 비구조격자의 사용유무 이다. 곡선직교격자로 구성된 광역의 영역에 삼각, 오각, 육각형의 격자형태를 혼합 적용하는 것은 지형 해상도의 향상을 크게 높일 것이다. 또한, Domain Decomposition Coupling을 실시하지 않아도 관심지역의 격자 세분화가 가능하며, 1D network과 2D network간의 coupling 역시 가능하다. 따라서, 기존 격자체계에 존재하던 많은 제한점들이 개선되었다.

Delft3D-Flow와 마찬가지로, D-Flow FM 모델은 staggered grid상의 유한체적(finite volume) solver를 사용한다. 그렇지만, 격자 상에 ‘행’과 ‘열’의 개념이 존재하지 않으며 ADI-solver를 사용하지 않는다. 연속방정식(continuity equation)은 단일 combined system상에서 모든 격자점에 대해 implicit하게 계산된다. 시간 적분은 이류항에 대해 explicit하게 계산되며, 시간간격의 제한은 Courant 조건에 따라 자동적으로 수립된다.

이류항의 경우 Delft3D-Flow는 flooding scheme(potentially super critical flow) 또는 higher order cyclic scheme(all other flow)을 적용한다. D-Flow FM의 경우 앞선 두 경

우에는 동일한 scheme을 사용한다. 모형내의 ‘shockproof’ scheme은 정확한 bore의 전파 속도를 재현할 수 있다. 또한 higher order를 적용함으로 보다 완만한 변화 또는 eddy shedding flow에도 적용이 가능하다.

Delft3D-FLOW 모델에서 유속 계산 격자점은 wet 또는 dry로 고려된다. D-Flow FM 모델의 경우, 유속 계산 격자점은 부분적으로 wet으로 고려된다. 이러한 처리 방법은 조간대 처리시 보다 완만한 flooding과 drying process를 계산할 수 있도록 해준다. 모델에서 비균일 수심에서의 유속 계산 격자점과 관련된 수력반경(hydraulic radius) 계산에는 여러 option이 제공된다. 2차원 모델의 경우, 가장 완전한 옵션은 소위 2D conveyance approach라 일컬어지는 방법으로, 이 방법은 마찰 우세 흐름에서 빠른 grid convergence를 보여준다. 이러한 방법은 subgrid modelling에서도 선택 가능한 효과적인 방법이다.

D-Flow FM 모형을 이용하여 폭풍해일을 재현하기 위해서는 우선적으로 D-Flow FM 모형의 풍향/풍속 및 기압의 입력방법 및 계산조건의 이해가 필요하다. D-Flow FM 모형내의 바람응력계수(drag coefficient)는 wind shear stress (바람응력)은 다음과 같은 quadratic equation에 의해 결정된다.

$$|\tau_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (21)$$

여기서, ρ_a 는 밀도, U_{10} 은 자유표면 10미터 상공의 풍속, C_d 는 바람의 drag coefficient이다.

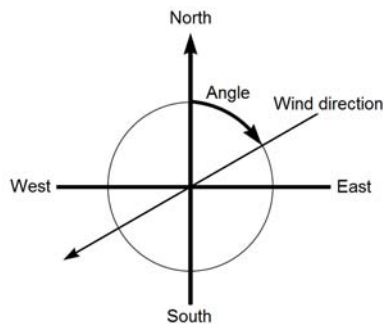


그림 3.1.50 바람의 정의

(나) Flexible mesh 구축

본 연구의 Flexible Mesh의 목적은 KOOS의 지역해 모델과 격자를 그대로 사용하여 새로운 방식의 시스템을 구축하는 것이다. 따라서 네스팅 방식을 사용하는 기존의 모델은 연안 격자에서 중복된 격자를 가진다. 따라서 중복된 격자 없이 하나의 격자시스템으로 사용하게 되는 Flexible Mesh를 구축하기 위해서는 중복된 격자를 제거하고 영역간을 D-FLOW FM 모델의 test run을 위한 격자망은 삼각격자를 적용하여 연결하였다.

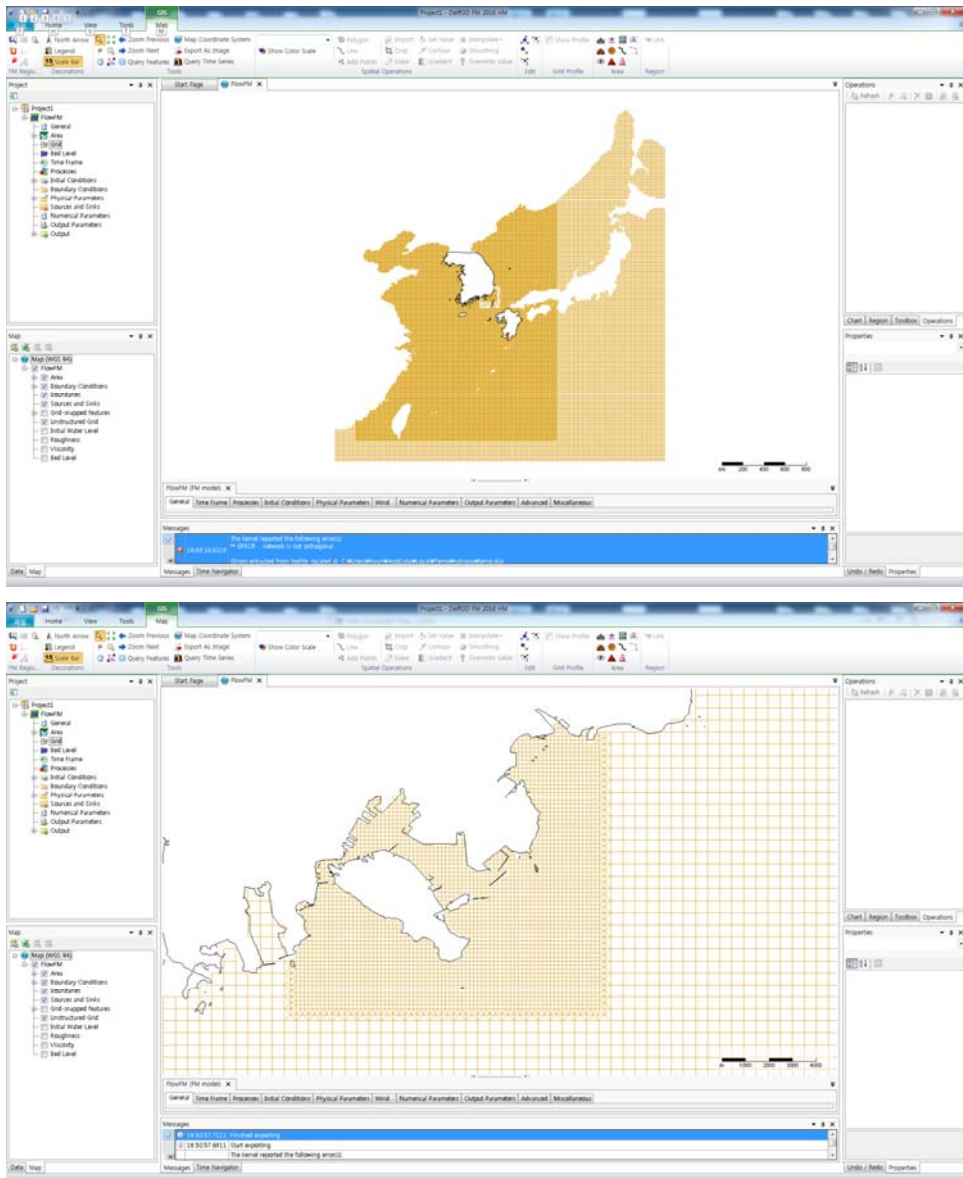
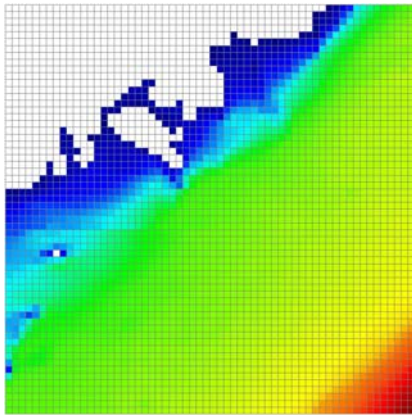
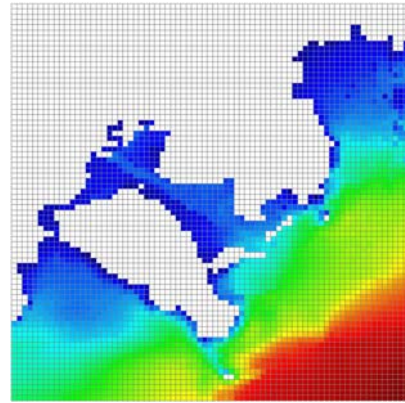


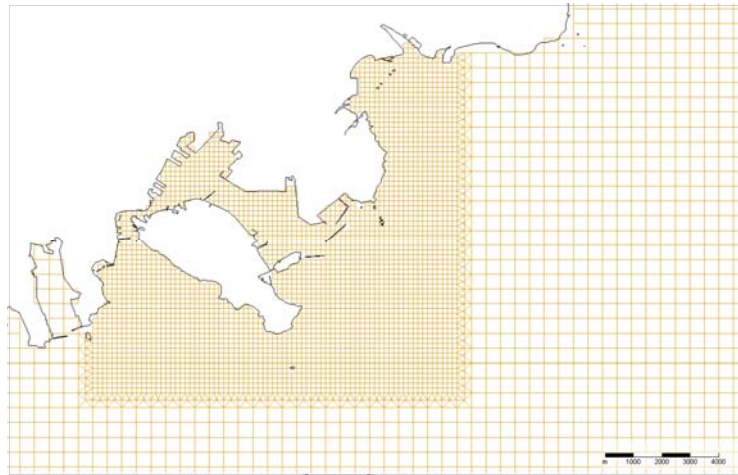
그림 3.151 Flexible mesh 생성 예



정방격자 L4

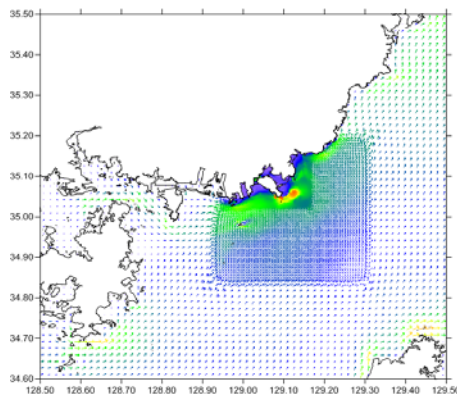


정방격자 L5

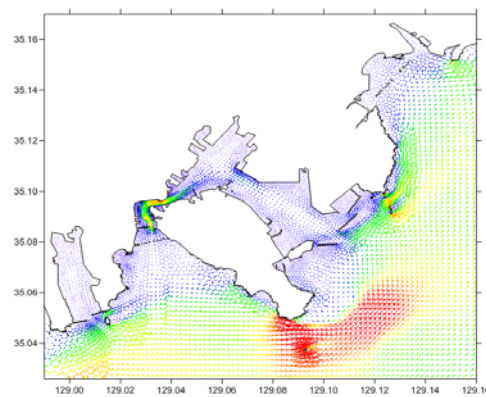


Flexible mesh

그림 3.1.52 기존 부산항 예측 시스템의 정방격자와 Flexible mesh



(a) 중간역 유동 모델 결과



(b) 상세역 유동 모델 결과

그림 3.1.53 유동모델 결과 (유속, 유향)

(다) 모델 검증 및 폭풍해일 예측 시스템 (2차원) 구축

D-flow FM 방식을 이용하여 우리나라 전 연안에 대한 300m 해상도의 유동 모델을 구축하였고 그 격자형태는 그림 3.1.54와 같다.

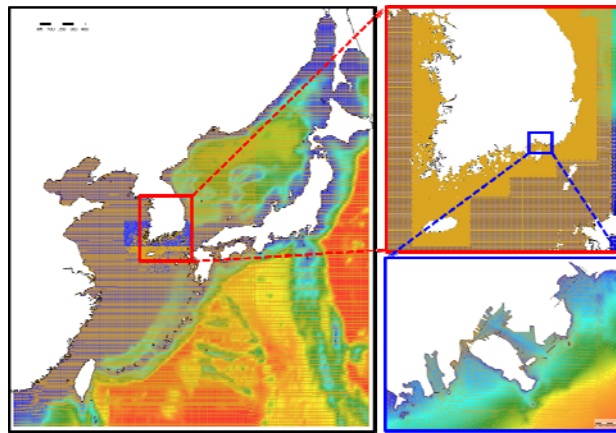


그림 3.1.54 D-flow 격자망도

또한, D-flow FM의 예측 적용성을 검토하기 위하여 2차원 기상-유동 예측 시스템 구축하였는데, 모델의 조석은 FES2012의 주요 16개 분조의 조화상수를 개방경계조건으로 입력하였다. 우선 조석모델 검증을 위한 모의를 수행하였고 모의 기간은 2016년 1월 1일~31일, KHOA의 연안 10개 조위관측소(인천, 군산, 영광, 진도, 모슬포, 여수, 부산, 울산, 묵호, 속초) 자료와의 비교를 통해 검증하였다. 검증 결과 동해 지역의 지각을 제외하고 우리나라 연안의 조석을 대체적으로 잘 재현하였다. 기존의 정방격자 결과와 비교하였을 때 크게 차이는 없었다.

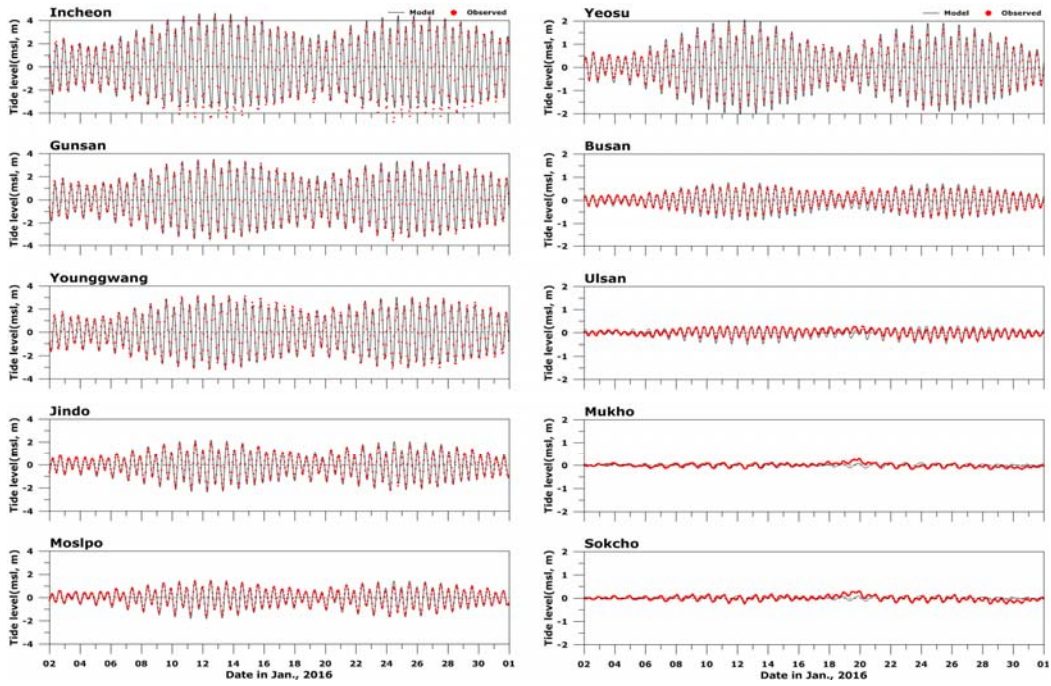


그림 3.155 조위 검증 시계열

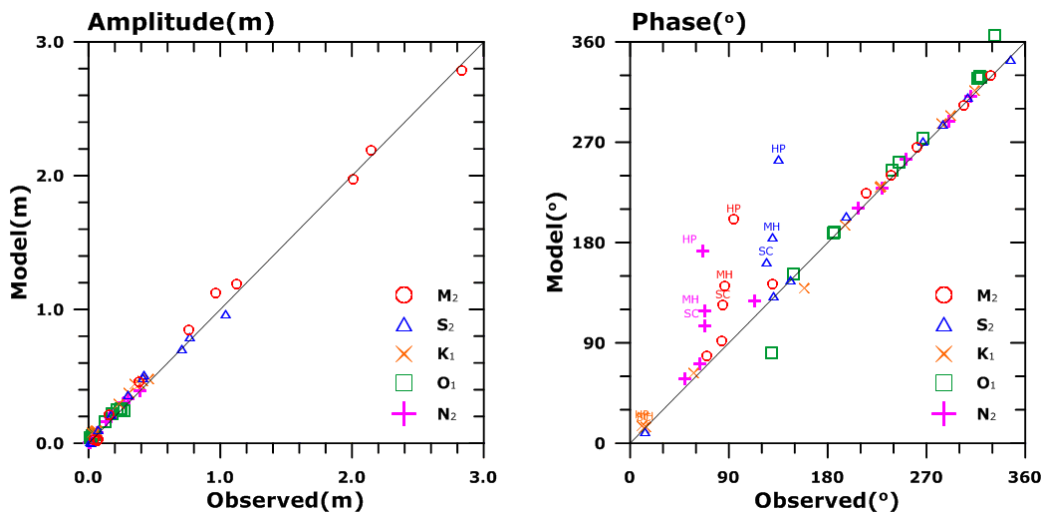


그림 3.156 관측치와 모델치 일대일 분포

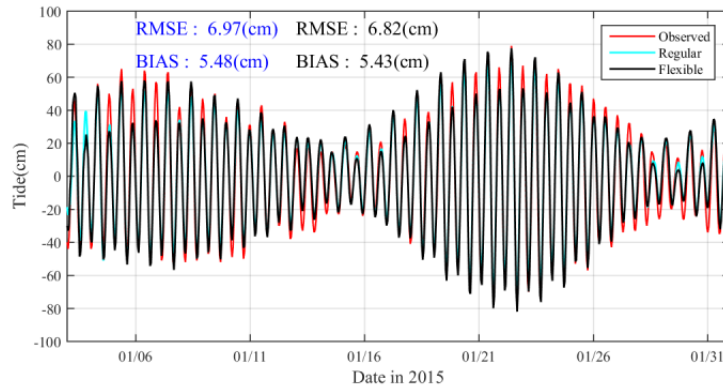


그림 3.1.57 조위 검증 결과

2016년 18호 태풍 차바의 경우에 대하여 수립된 flexible mesh 를 이용하여 폭풍해일 및 침수범람 영역을 계산하였다. 모의기간은 태풍 Chaba가 통과한 기간인 2016년 10월 1일~9일, 태풍 조건은 WRF의 1시간 바람 및 기압장을 이용하였으며, 조석-폭풍해일 조건, 조석 단독 조건, 폭풍해일 단독 조건에 대한 DFLOW-FM 모형을 구축하고 부산항 기준검조소 위치에서 예측된 수위 예측 결과를 시계열로 비교하여 모형에 의한 해일고의 산출 여부를 검토하였다.

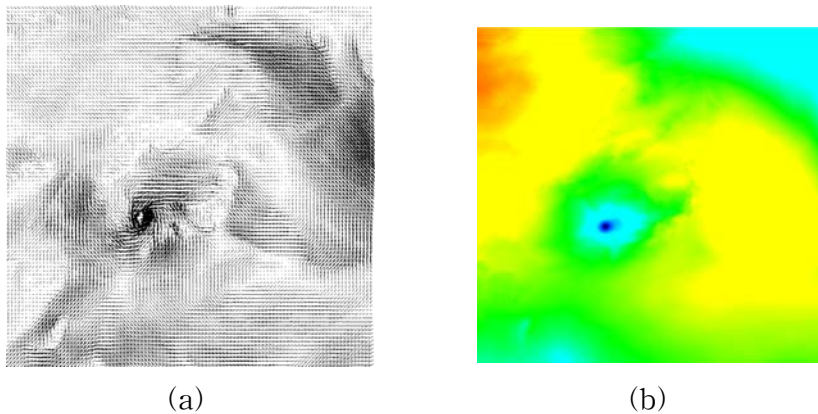


그림 3.1.58 (a) WRF 모델 바람의 예(2016. 10. 5. 6시), (b) WRF 모델 기압의 예 (2016. 10. 5. 6시)

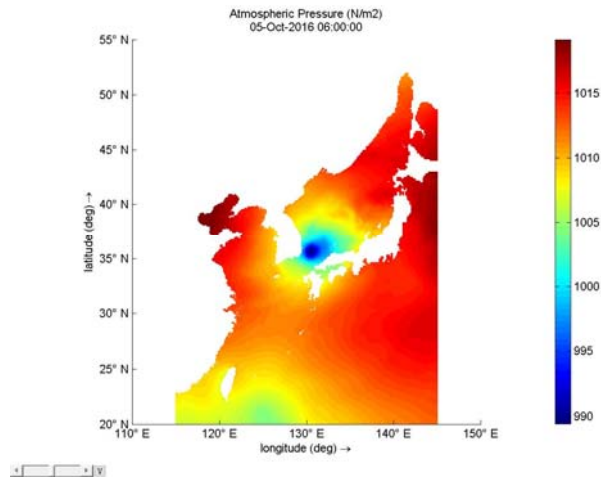


그림 3.1.59 DFLOW-FM 모형 기압 적용의 예 (2016. 10. 5. 6시)

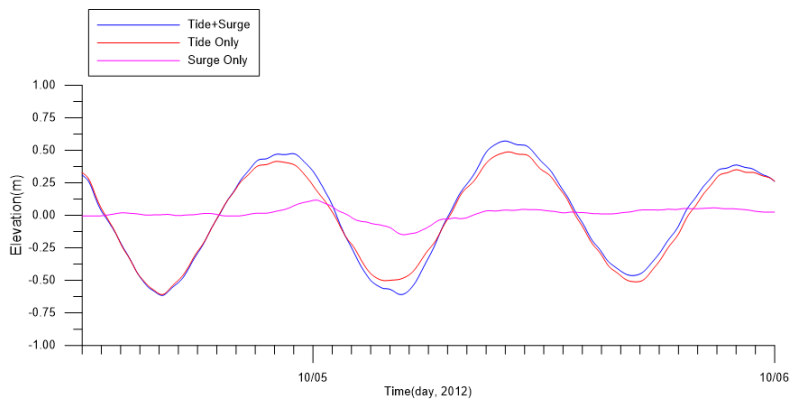


그림 3.1.60 실험안 별 수위 예측 예(부산항 검조소)

또한, 기 구축한 최소격자 300 m D-flow FM 격자를 이용하여 태풍 Chaba 통과시 마린시티 침수범람도 모의하였다. 이때는 추가적으로 마린시티 지역을 최소격자 50m로 추가 구성하여 폭풍해일을 모의하였고, 모의시 하천수의 유입 및 방파제 등의 구조물은 고려하지 않았다. 모의 결과 마린시티 지역의 침수 범위는 약 0.12km²으로 나타났다.

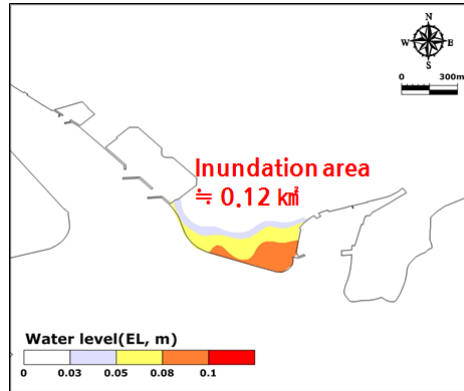


그림 3.1.61 마린시티 침수구역 범위

3. 유출유 및 표류체 이동 예측 시스템

우리원에서는 KOOS 등의 시스템을 이용하여 유류확산 및 수색구조를 위한 표류예측 시스템을 구축 운영하여 왔다. 본 연구에서는 시스템의 고도화 전략으로 현장실험을 통한 표류예측 검증, 역추적 기법 적용, 가상 실험 등의 연구를 수행하였다.

가. 표류체 이동예측 기술 개발 및 지원

(1) 사고 재현 및 역추적 기술 개발

구축된 표류 예측 시스템으로는 해상사고 발생시 수시로 표류예측 결과를 계산하여 해경등의 유관기관에 제공하였다. 본 보고서에서는 2016년에 발생하였던, 토고 국적 화물선 알파호에서의 원목 분실에 대한 모의 결과를 제시한다. 사고는 2016년 2018.21.(일)에 발생하였고, 원목(약 1000여개) 해상에 유실되었다. 우리원, 국립해양조사원 등에서 표류 원목 수거를 위한 표류 예측을 계산하였고, 표류예측 결과 원목은 빠르게 북동진 할 것으로 예상되었으나, 실제로는 서서히 남서진 하였다. 이에 오차에 대한 원인을 분석하였고, 이를 제시하고자 한다.

우선 유속 예측 결과에 대한 검증을 수행하였는데, 국립해양조사원의 좌초해역 인근의 S02, S03 정점에서 수행하였다. 그 결과 북동쪽으로 흐르는 해류성분이 과다하게 계산되었던 것으로 나타났다. 이에, 원목이 북동쪽으로 과하게 이동했던 것으로 보인다. 계절별 차이를 알아보기 위해 같은 정점에서 1월의 모의결과와 관측결과를 비교하였을 때, 상당히 유사하게 모의되었던 것을 감안하면, 전선지역인 해당 정점 모의시 해류성분이 과다하게 입력되었던 것으로 보인다.

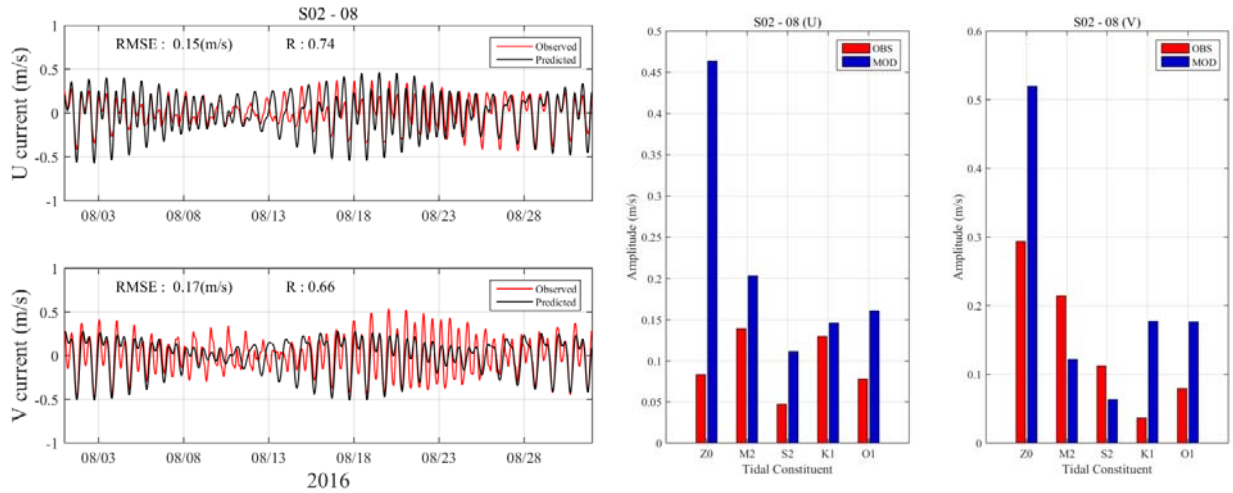


그림 3.162 국립해양조사원 S02 정점에서의 모델결과와 관측결과의 시계열(좌)과 조화상수(우) 비교(8월)>

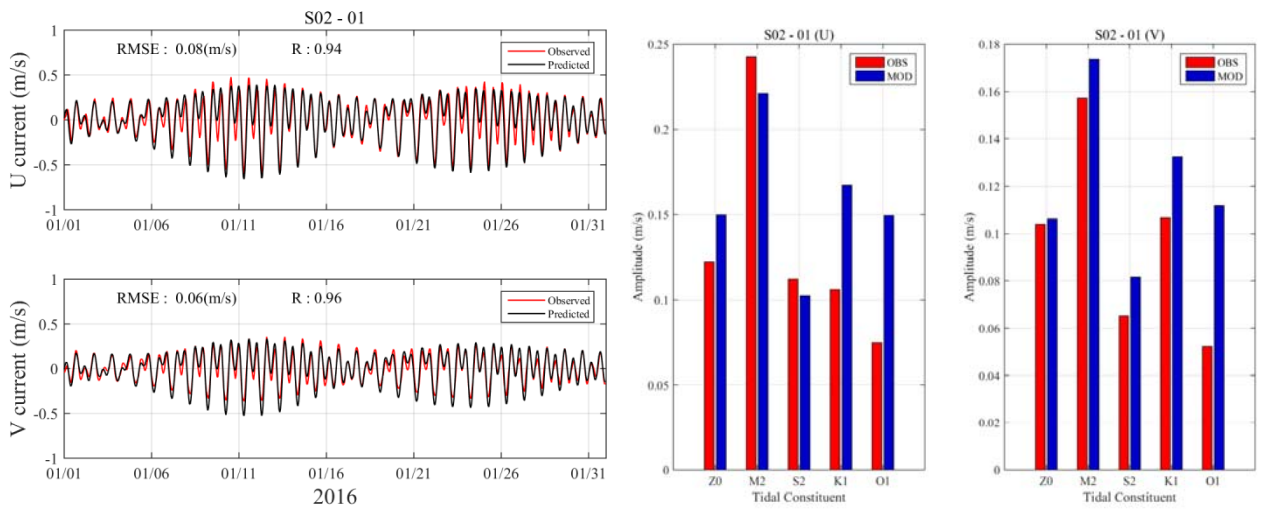


그림 3.163 국립해양조사원 S02 정점에서의 모델결과와 관측결과의 시계열(좌)과 조화상수(우) 비교(1월)

사고 재현 사례 중 구축한 역추적 기법을 적용한 사례는 동해 쓰레기에 관한 내용이다. 2016년 9월 14일 소돌 인근 해역 다량의 나무쓰레기 유입되었다. 이후, 9월 25일 우리원 동해연구소 해안에서 북한 것으로 추정되는 쓰레기가 발견되기도 하였다. (유입날짜는 정확하지 않음). 이는 8월 29일 ~ 9월 2일 두만강 유역 홍수에 의한 쓰레기가 남하한 것으로 추정되었고, 이를 수치모델로 재현해 보았다.

두만강유역 수해지역서 떠내려온 것으로 추정

(속초=연합뉴스) 이종건 기자 = 추석 연휴 첫날 강릉시 주문진읍 소돌해변에 밀려온 엄청난 양의 나무 쓰레기는 어디서 온 것일까?

17일 지역주민들에 따르면 추석연휴 첫날인 지난 14일 오전 엄청난 양의 나무 쓰레기가 소돌해변을 덮쳤다.

소돌 인근인 양양 현남면에서 스쿠버레저업체를 운영하는 한 주민은 "다이버 동호인들을 보트에 태우고 바다로 나갔는데 무슨 이상한 띠가 바다 위에 형성돼 있어 다가가 보니 통나무를 비롯한 나무 쓰레기였다"며 "사고가 날 것 같아 해경에 신고했다"고 말했다.



강릉 주문진 소돌해변 뒤덮은 나무쓰레기

<언론 보도 자료>

예측 시스템의 결과에 따른 당시의 연안 해류는 북한한류의 영향으로 두만강 하류부터 북한 동해안을 타고 남하하는 흐름이 있었다. 그림 3.1.64와 같이 이 흐름은 9월 10일을 전후로 강해졌던 것으로 추정된다. 한편 바람의 경우 9월 초(1~2일)에는 강한 남서풍의 영향이 있었고, 이후 동풍 또는 북동풍 계열이 우세하게 나타났다. 그리고 9월 14일에는 약한 남풍이 불었던 것으로 모의 되었다(그림 3.1.65).

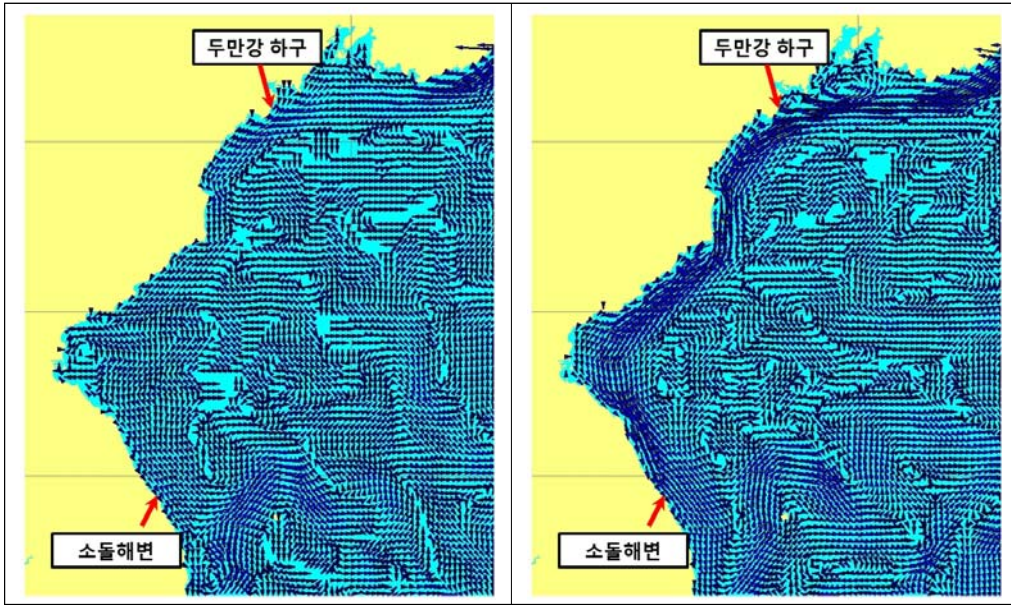


그림 3.1.64 유동모델 결과(유속), 2016년 9월 1일 10시(좌), 2016년 9월 14일(우)

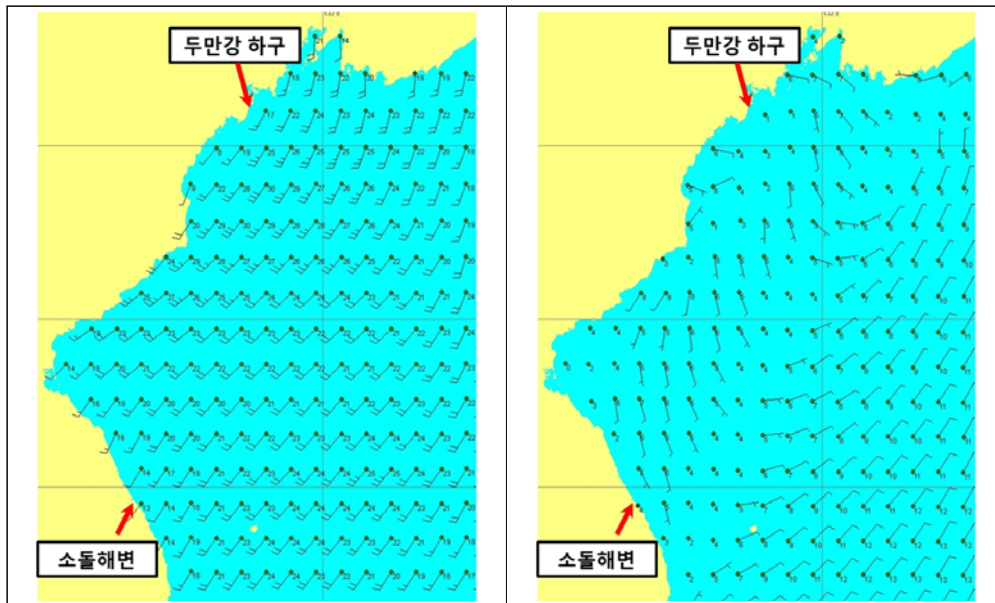


그림 3.1.65 기상모델 결과(바람), 2016년 9월 1일 10시(좌), 2016년 9월 14일(우)

당시의 해류상황과 기상상황 예측자료를 바탕으로 9월 14일 소돌 해변 인근에서부터 표류체를 역추적 해본 결과 쓰레기는 북한 연안에서부터 북한해류를 타고 남하했던 것으로 추정되나, 모의 결과(입자의 평균위치)는 홍수 발생시기인 9월 1일경 함경남도 인근으로 나타났다. 이는 발원지이라고 판단되었던 두만강 인근과는 다소 먼 거리였다. 이것이 수치적 오차인지 다른 발원지가 있는 것인지는 정확히 알 수가 없지만 장기간 (15일 이상)의 모의로 인한 오차 및 입력조건(초기 시간 위치 등)의 오차일 가능성이 높다.

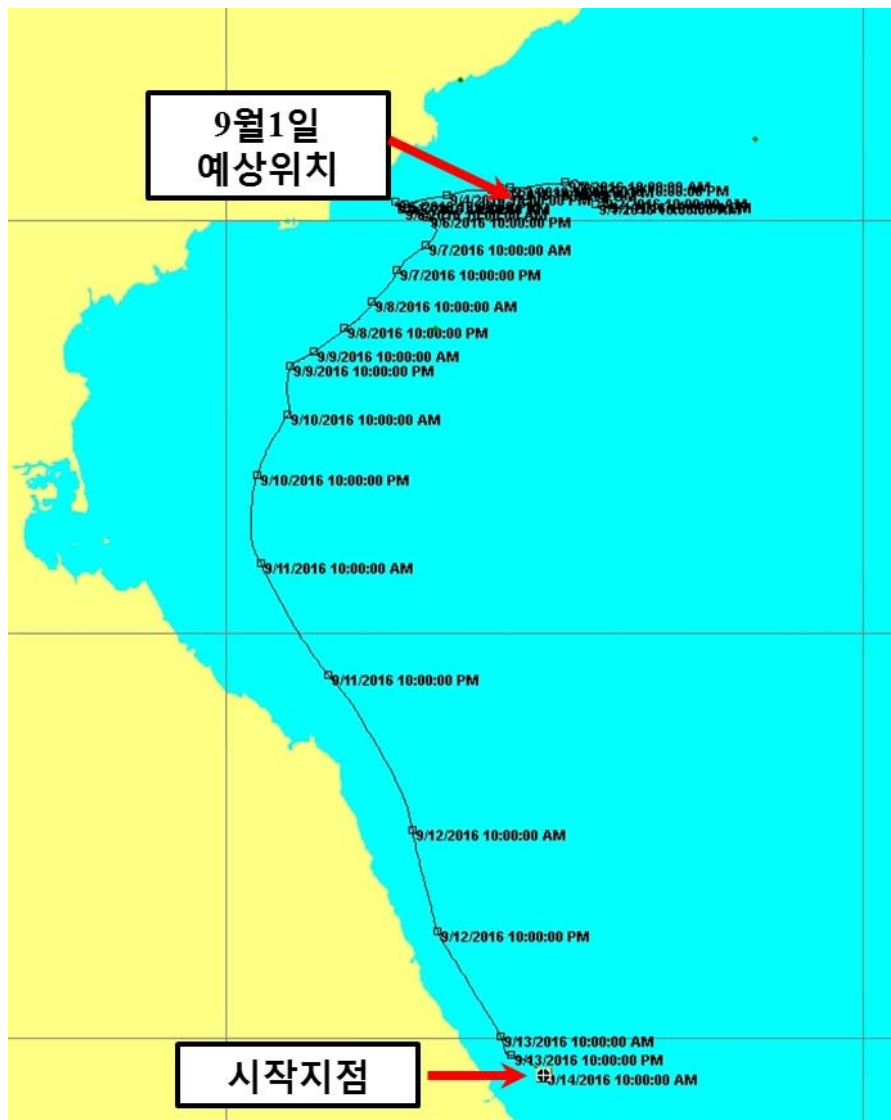


그림 3.1.66 2016년 9월 14일 소돌 해변부터 9월 1일까지의 역추적 결과

나. 유류유출 이동확산 예측 기술 개발 및 지원

(1) 방제활동 (오일펜스 설치 및 유화제 등) 효과에 따른 유류확산 예측

유류확산 예측 고도화를 위해 방제활동 (오일펜스 설치 및 유화제 등) 효과에 따른 유류확산 예측 연구를 진행하였다. 이 연구에 대해서는 검증할 수 있는 자료획득이 어려우므로 미국 US Coast Guard에서 사용하고 있는 ASA 사의 Oilmap tool 을 이용하여 가상의 경우에 대하여 오일펜스 및 유화제 살포 효과에 따른 유류확산 예측 수행하고 우리 예측 모델의 결과를 검증하여 보았다. 2014년 우이산호 유류유출 상황에 4개의 가상 시나리오를 구성하여 수치모의 수행하였는데, 이 때 기상 입력자료의 해상도는 4km, 유동 입력자료의 해상도는 300m 이다. 각각의 시나리오에 관한 상세내용은 표 3.1.9와 같고, 각각의 경우별 확산 결과는 그림 3.1.67과 같다.

표 3.1.9 시나리오 상세 내용

시나리오	내용	유류 유출량
1	방제작업 없음	700 kL
2	유류사고 발생 6시간 후 오염방지막 설치	
3	유류사고 발생 12시간 후 오염방지막 추가 설치	
4	유류사고 발생 24시간 후 유화제 살포	

※ 오염방지막의 길이는 1.5 km, 유속한계는 2 m/s, 파랑 한계는 2 m이고, 유화제는 100 L 살포하였음

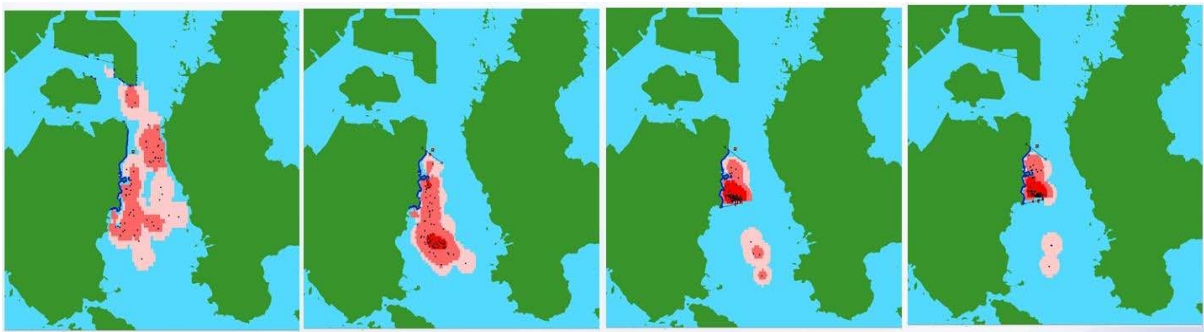


그림 3.1.67 방제활동에 따른 유류확산 예측, 왼쪽부터 #1, #2, #3, #4

(2) 유류확산 예측 지원

우리원에서는 국내외 유류 및 유해 물질 오염 시 확산 예측 기술 활용의 일환으로 구축한 유류확산 예측 시스템을 이용하여 연안의 크고 작은 사고에 대해 지원하였다. 사

고가 발생하면 해양수산부 또는 해양경찰청 등에서 유류확산에 대한 자문을 요청하고 예측 결과를 송부해 주는 방식으로 진행한다. 유류확산 예측에는 원유, 선박유, 뿐만아니라 타르볼 형태의 예측도 포함하는데, 본 보고서에서는 그 예로 2017년 6월에 태안 일대에서 발견되었던 타르볼에 대한 역추적 결과를 소개하고자 한다.

2017년 7월 5일 15:12경, 태안군 삼봉해수욕장에서 검은색 기름이 다수 부착되었다는 신고가 해경에 접수 되었고, 이후 태안군 내 연포, 마검포 등 13개 해수욕장에 타르 형태의 기름부착 확인하였다. 해경측에서는 이 타르볼의 생성위치에 대해 추적 요청을 해왔고, 이에 기 구축한 유류확산 예측 시스템으로 타르볼 역추적 하여 보았다. 타르볼이 가장 많이 발견되었던 연포 정점(36.692936°N, 126.211039°E) 에서부터 1개월 역추적 결과 입자들의 추정 위치는 연포 남서쪽으로 약 130 km 지점이였다.

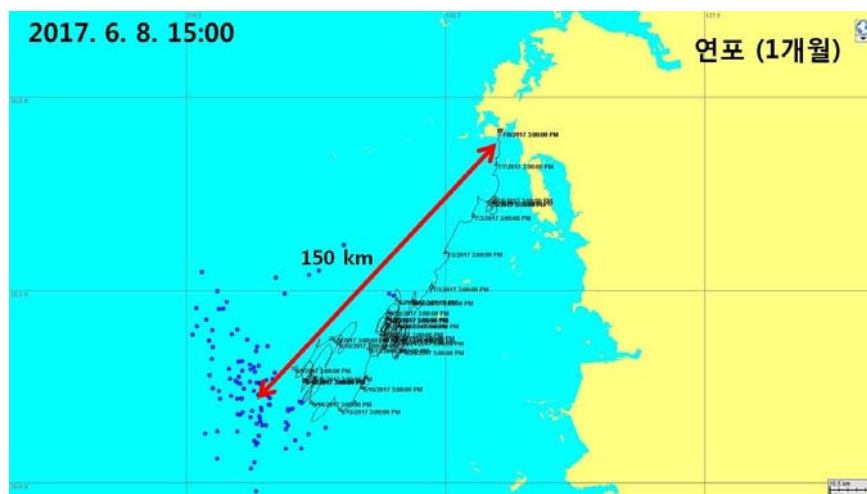


그림 3.1.68 연포 정점에서부터 1개월 역추적 결과

이와 같은 방향성은 조류에 의한 왕복운동 보다는 바람의 영향이 더 컸었던 것으로 보이는데, 그림 3.1.69와 같이 유류 입자들은 7월 1일경까지 연포 남서방 100 km 정도에서 머물러 있다가, 7월 1일 이후 강한 남서풍의 영향으로 급격하게 북동진했던 것으로 추정된다. 즉, 해당 지역에서의 입자 이동은 바람 및 해류의 영향 보다는 조류의 영향이 우세하기 때문에 장기간 계산에도 그리 멀리 이동하지는 않지만, 바람이 특별히 강할 경우 바람에 따라 빠르게 이동하게 되는 것이다. 타르입자가 발견된 마검포, 만리포, 기지포, 연포 4개 해역으로부터 동시 역추적 결과는 그림 3.1.70과 같다.

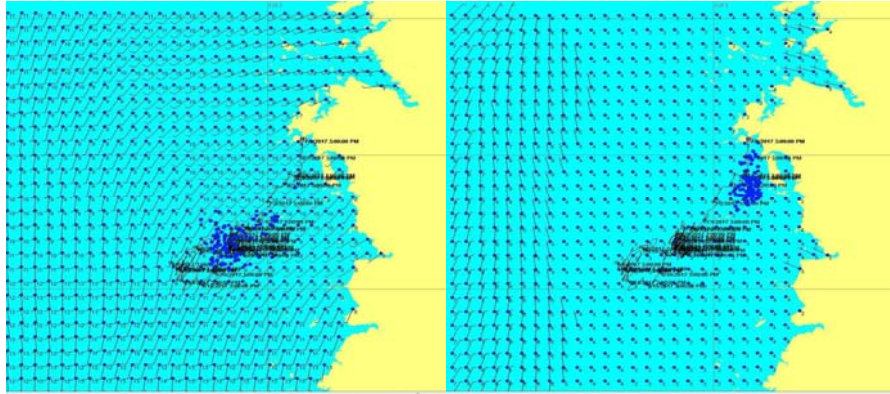


그림 3.1.69 입자경로와 바람장 (7월 1일(좌), 7월 6일(우))

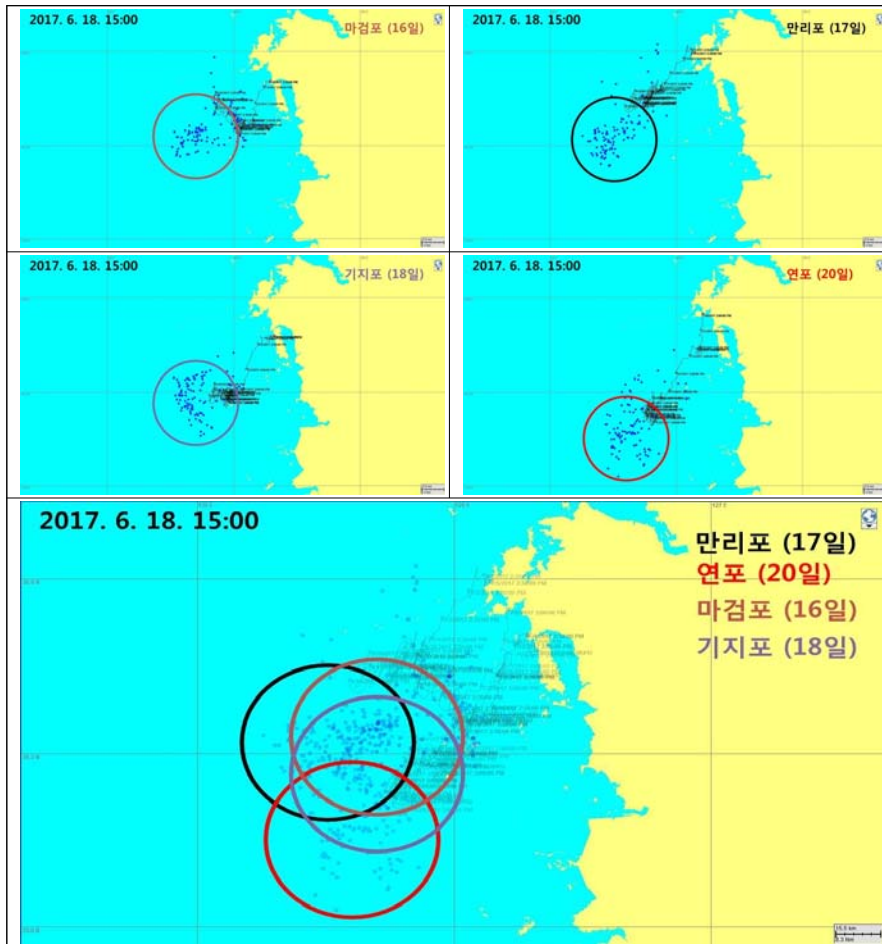


그림 3.1.70 마검포, 만리포, 기지포, 연포에서 타르볼 발견 시점부터 6월 18일 15시까지의 역추적 결과

다. 수색구조 중층 표류 현장실험

(1) 현장실험

유류확산 예측 및 수색구조를 위한 표류예측의 기본인 되는 입자추적 모델 (particle tracking model)의 고도화를 위해서는 적용하는 입력 조건 (유속, 바람)등의 정확도 향상도 중요하지만 현장 실험을 통해 수치모델에 물체별 해역별 특성을 파악하여 적용할 수 있는 경험적인 요소도 중요하다. 이에 본 연구에서는 다수의 위치전송이 가능한 표류체를 제작, 구입하여 현장표류실험을 수행하였고, 표류예측의 검증자료로 사용하였다. 본 절에서는 그간 수행하였던 현장 실험에 대해 설명하고 모델 검증 결과를 제시하고자 한다. 또한 현장 실험을 이용한 표류예측모델의 개선 연구의 내용도 제시하고자 한다. 현장 실험은 기본적으로 연안, 섬, 양식장, 어망 등에 영향을 받지 않고 유속, 바람 등의 검증에 필요한 관측자료가 존재하는 지역에서 수행하여야 실험의 효과를 극대화 할 수 있다. 따라서 특별히 특정해역에 대한 필요성이 없을 시에는 주로 해양경찰청과와 협조하거나 해양과학기술지 인근에서 현장 실험을 수행하였다. 특히, 2015년 7월 27일에는 해경 표류예측 실험 자문 및 공동 현장 실험을 수행하였는데, 이는 해경 측의 요청으로 해양 경비함을 이용한 현장 실험 수행하였고, 우리원의 표류부이를 2개를 해양경비안전연구센터에 전달하여 공동 연구를 진행하기도 하였다.

(가) 가거도 해역 중층 부이 현장 실험

이 실험은 가거도 해역에서 해양 경찰 헬기가 추락하였을 때, 중층으로 이동하는 표류체에 대한 모의 요청으로 계획되었다. 당시 3차원 자료를 이용하여 특정 수심에서의 표류예측은 기술적으로 가능하였으나, 그 정확성에 대해서는 아직 의문점이 있었다. 이에 중층의 흐름에 의해 움직일 수 있는 부이를 제작하여 현장실험을 수행하였고, 모델 검증에 이용하고자 하였다. 제작한 부이의 사양은 아래의 표 3.1.10과 같고 그 형태는 그림 3.1.71과 같다. 이 부이는 2015년 6월 17일에 투하되었고, 위치 정보 통신은 15분마다 위성으로 위치를 전송하도록 세팅하여 매 15분 마다 위치를 메일로 전송하게 된다.

표 3.1.10 부이 사양

항목	내용
표류부이 크기	지름 25cm, 높이 25cm, 부력 약 12kg
drogue 크기	높이 80cm, 넓이 60cm
drogue 위치 수심	1m(표층), 40m(중층)
drogue 고정 와이어	1.2mm stainless steel wire



그림 3.1.71 실험에 사용된 부이(좌) 및 드로그(우)



그림 3.1.72 표류부이 투하 시 및 투하 후 표류 모습



그림 3.1.73 표류부이 이동경로 (2015년 6월 17일 - 11월 3일)

(나) 추자도 해역 현장 실험

돌고래호 사고 직후 돌고래호를 수색하기 위해 모의한 표류예측 결과는 돌고래호가 해류를 따라 동쪽으로 이동할 것으로 예상하였다. 하지만 실제로 돌고래호는 서쪽에서 발견되어 큰 문제시 되었고, 앞장에서 언급한 바와 같이 사고 이후 순환 예측 및 표류 예측에 대한 관심이 학계 뿐아니라 일반 국민들에게도 증대되었고, 결론적으로 상세격자의 예측 정보 생산의 필요성이 대두되었다. 왜냐하면 당시 표류예측을 수행하기 위해 사용된 격자의 해상도가 2 km 로 이 격자 시스템으로는 추자도가 격자 하나에 불과하기 때문에 추자도 연안을 따라 흐르는 해류를 제대로 재현하지 못했기 때문이다.

우리원에서는 보다 정확한 현장 상황과 해상도에 따른 표류예측 결과를 비교해 보기 위해 추자도 인근에 표류부이 1개를 투하하고 2대의 층별 유속계(AWAC)을 설치하여 현장 실험을 수행하였고 모델 검증에 위한 자료로 활용하였다. 그림 3.1.74는 표류 드로그와 함께 투하된 표류 부이의 모습과 설치전의 AWAC의 모습과 설치 위치를 보여주고 있고, 그 이동경로는 그림 3.1.75와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 표류부이는 추자도 주위를 2~3일간 표류하다가 해류를 타고 빠르게 동해로 이동하는 것을 볼 수가 있다. 이는 추자도 인근에서 추자도의 영향을 받지 않는 해류는 동향으로 표류체가 동쪽으로 빠르게 이동하게 됨을 의미한다.



그림 3.1.74 부이 표류 모습, AWAC 사진 및 설치 위치



그림 3.1.75 표류부이 이동경로 (2015년 10월 16일 ~ 11월 3일)

(다) 이어도호를 활용한 현장 실험

우리원의 해양관측선 이어도호를 이용하여 표류부이를 투하하였다. 이어도호는 2016년 8월 부산항에서 소청초, 황해 중부부이, 가거초, 이어도 기지에서 각 기지 점검 및 주변 해역에 대한 승선 조사 실시, 조사기간 동안 해양물리/생물, 음향, 위성 등 다양한 분야의 연구원들이 승선하여 연구 진행을 계획으로 출항하였고, 항해 일정 중 이어도, 소청초, 가거초, 황중부이 인근에 7기의 표류부이를 투하하였다. 이 실험은 해역별 표류이동 특성을 나타내기 위한 것이므로 객관적 비교를 위해 규격화된 부이(Aqua Drift)를 구입하여 이용하였고 표류부이의 형태는 그림 3.1.76과 같고 부이의 사양은 표 3.1.11, 7기의 부이 투하 위치는 그림 3.1.77과 같다.



그림 3.1.76 부이 모양 및 투하 모습

표 3.1.11 부이 사양

항목	내용
크기	Ø214mm x 높이 400mm (안테나 포함 높이 : 800mm)
Aqua Drift 무게	4kg (웨이트 포함)
배터리 팩 용량	7.5VDC 12.5Ah (Alkaline D Size 5EA)
GPS 정확도	2.5m 이내 95% 이상
소모 전류	동작 시 - 약 44mA, Sleep 시 - 약 0.23mA
기타 사항	자석을 이용한 동작 ON, OFF 가능 동작 상태 확인을 위한 LED 장착byte의 내부 메모리 장착 Aqua Drift의 식별을 위한 깃발 부착 관측된 GPS 데이터의 실시간 전송

표 3.1.12 표류부이 투하 위치

정점	번호	위도(N)	경도(E)	비고
소청초 기지	N31	-	-	• 표류부이 투하
황해중부부이	N32	-	-	• 표류부이 투하
가거초 기지	N33	-	-	• 표류부이 투하
YS15	N34	33°09' 35.28"	124°50' 47.76"	• 표류부이 투하
YS17	N35	32°38' 19.32"	125°00' 55.80"	• 표류부이 투하
IE07	N36	32°07' 26.91"	125°10' 54.23"	• 이어도 기지 인근
IE11	N38	32°03' 31.15"	125°12' 03.59"	• 이어도 기지 인근

부이는 전체적으로 남서방향으로 이동하였다(그림 3.1.77). N31, N32, N33은 황해를 가로지르며 남서방향으로 이동하였고, 나머지 4개의 부이 (N34, N35, N36, N38)는 중국 해안을 따라 남서방향으로 이동하였다.

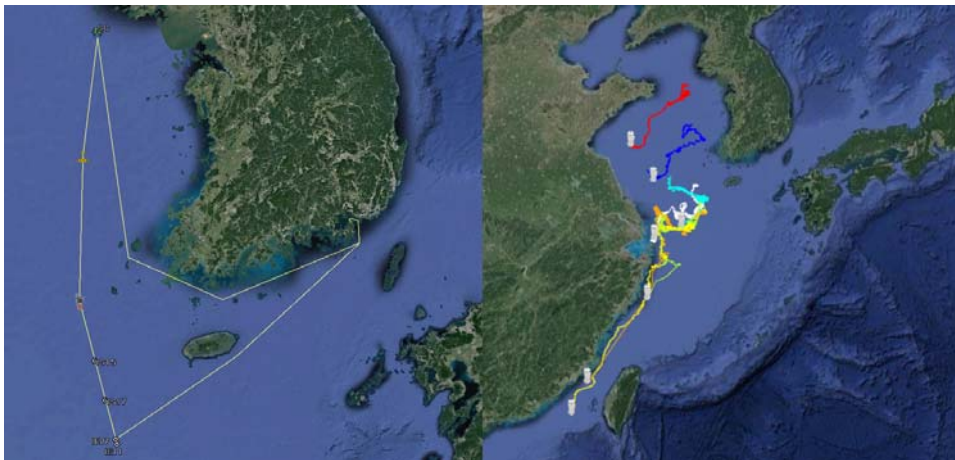


그림 3.1.77 부이 투하 위치(좌)와 이동경로(우)

(2) 현장실험을 이용한 모델 검증

가거도 중층 표류부이에 대하여 6월 16일부터 7월 15일까지 1개월 간 실제 표류이동 경로와 예측 결과를 비교 검증하였으며, 표류 예측은 시간이 지속될수록 오차의 범위가 크므로 12시간마다 초기위치를 재설정하여 각 24시간씩 예측을 수행하여 비교하였다. 표류부이 이동 경로는 그림 3.1.78과 같고, 기상 모델 검증 결과는 그림 3.1.79와 같다.

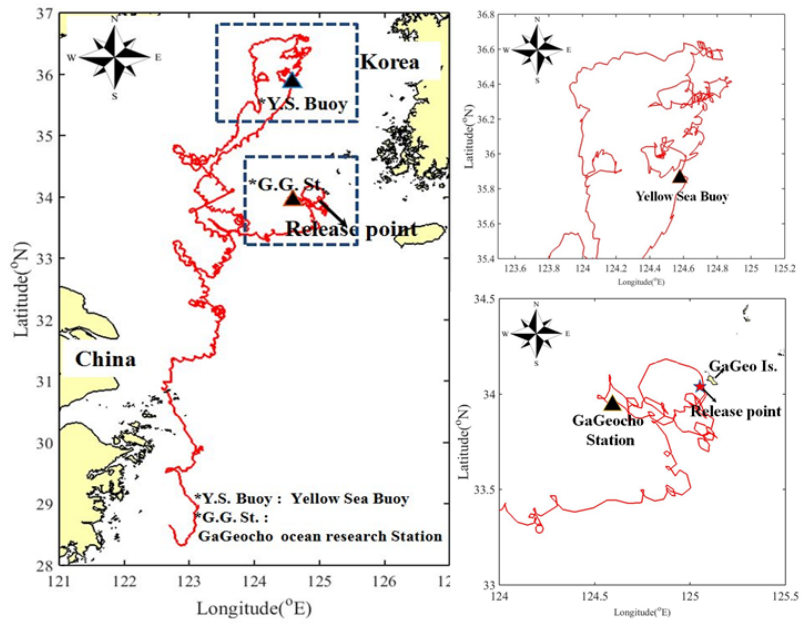


그림 3.1.78 표류부이 이동 경로

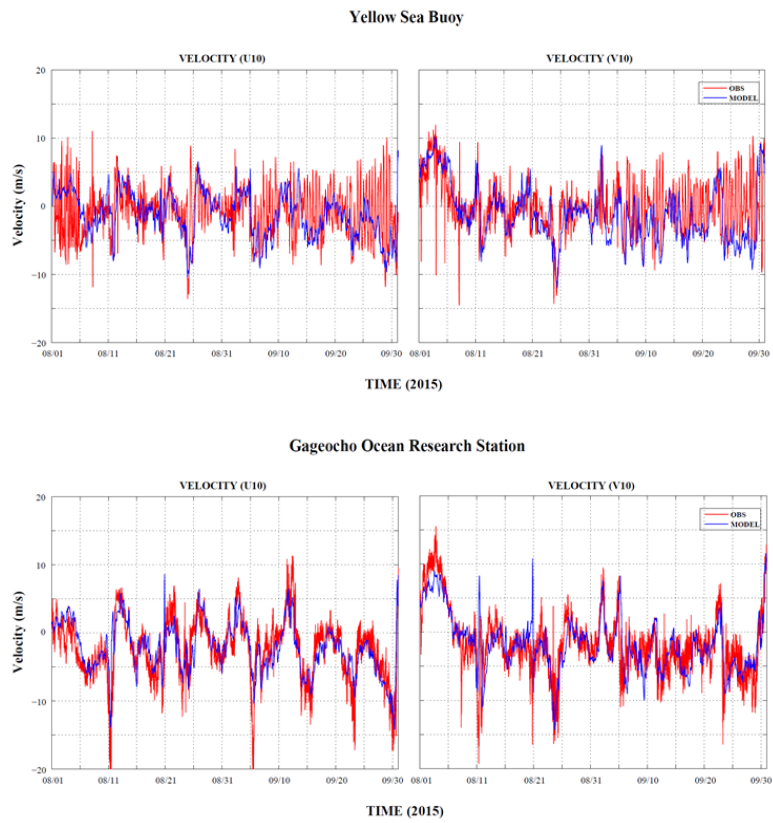


그림 3.1.79 기상 모델 검증 결과

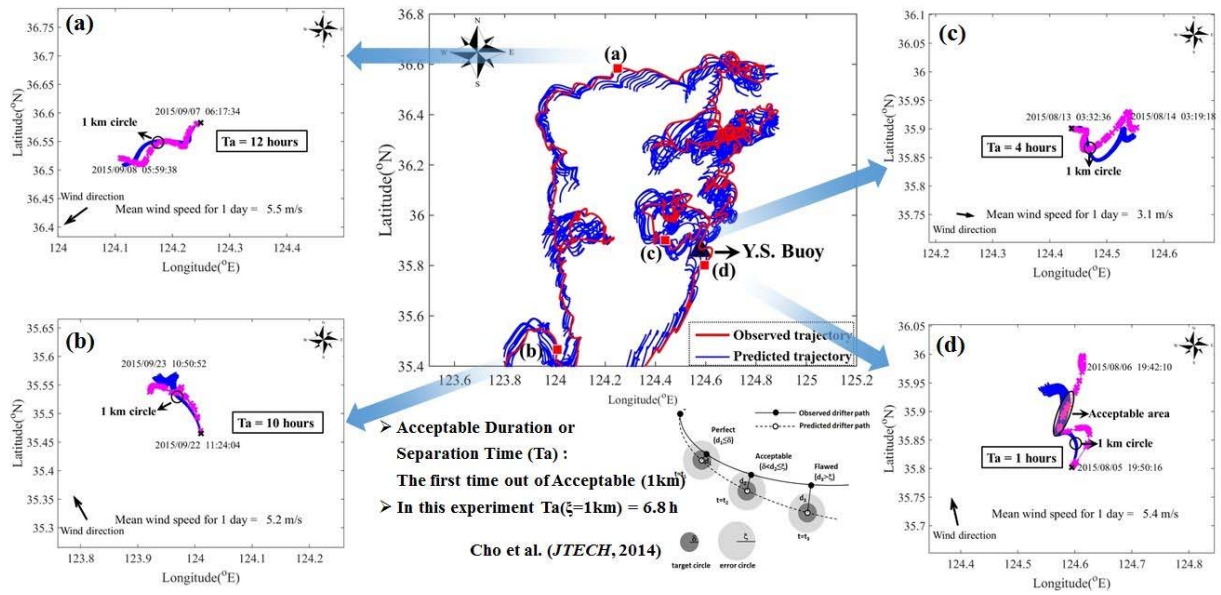


그림 3.1.80 표류부이에 대한 모델(파란색)과 실험(자주색) 결과의 비교

입자추적 모델 수행 기간은 2016년 8월 24일 ~ 10월 9일이며, 투하한 7기의 부이 중 소청초 해양과학기지와 황해중부부이 인근 해역에서 투하한 N31, N32 부이에 대한 바람 계수별 입자추적 모델 결과를 통해 최적의 바람계수를 산정하기 위하여 바람계수(wind coefficient : W.C.)를 0, 1~5%까지 0.2%간격으로 나누어 총 22 case에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과 해당 부이에 대한 바람계수는 1.4 ~ 1.8 % 가 가장 적절한 계수로 보인다.

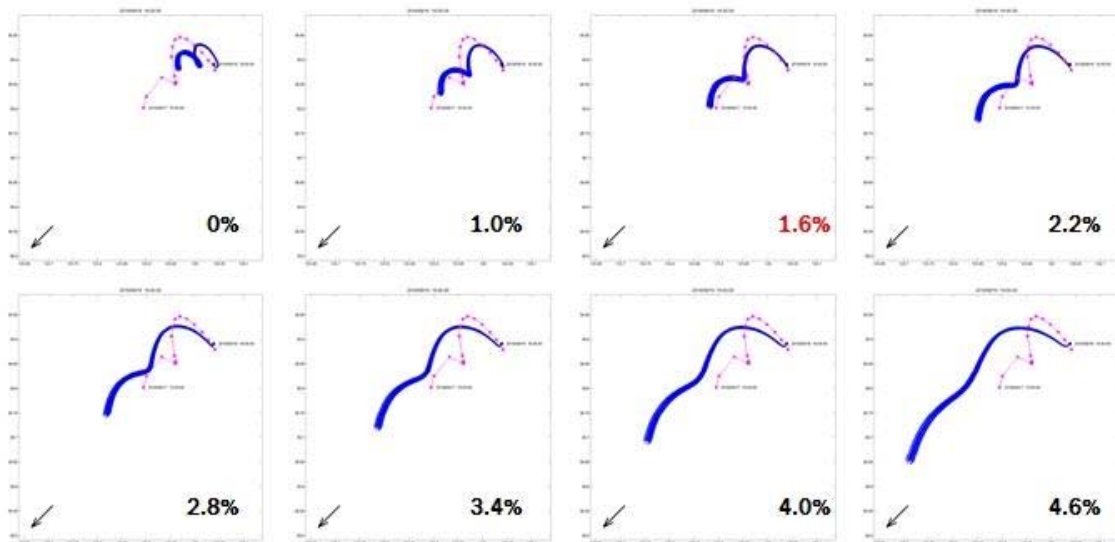


그림 3.1.81 L31 부이에 대한 모델(파란색)과 실험(자주색) 결과의 비교

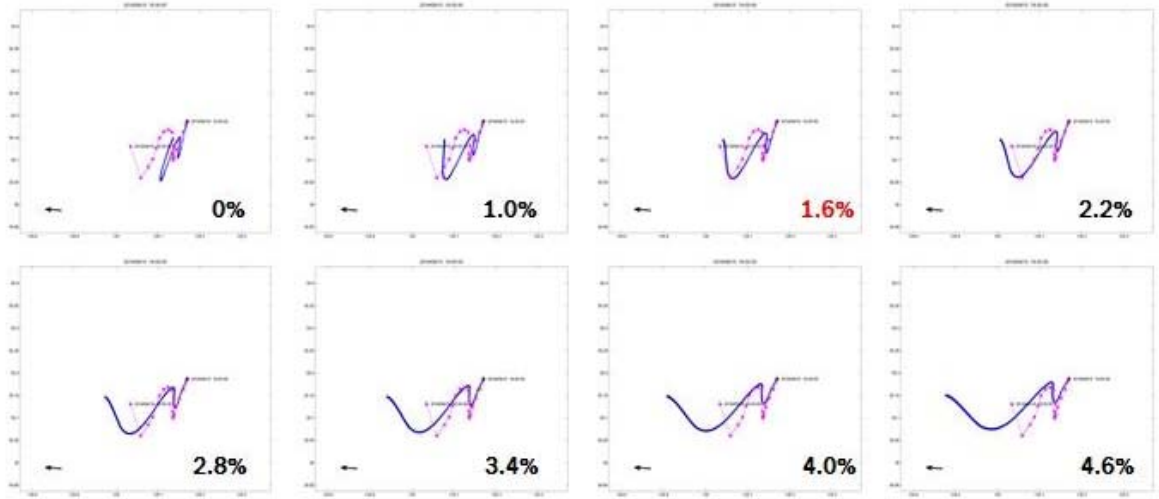


그림 3.1.82 L32 부이에 대한 모델(파란색)과 실험(자주색) 결과의 비교

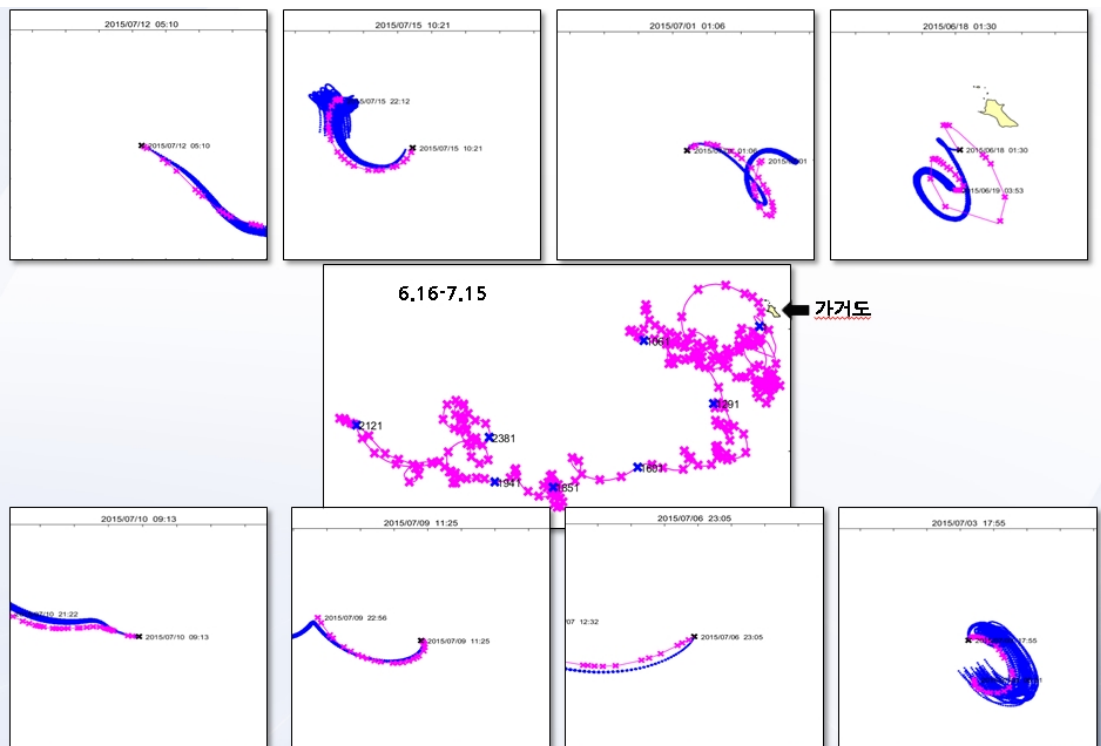


그림 3.1.83 현장실험 결과를 이용한 예측모델의 비교 검증의 예

(3) 바람계수 설정

표류예측 모델의 입력장으로 사용되는 유동모델의 표층의 경우 coordinate, 수치모델에 따라 두께가 다르며, 수치모델 계산 시 바람의 영향을 직접적으로 받는 표층의 경우 수심에 적분되기 때문에 같은 바람이 불어오더라도 표층이 두꺼울수록 같은 거리를 이동하기 위해 많은 힘이 필요하기 때문에 표류체의 이동속도가 다르게 나타난다. 현재 표류예측 모델 수행 시 입력장인 유동모델의 표층 두께에 대한 고려없이 표류체 자체에 대한 바람계수만 산정하고 있으므로, 예측 정확도 향상을 위해 표층 두께에 따른 표류체에 대한 바람계수의 차등적용을 고려할 필요가 있다.

소청도 인근해역에서 2016년 12월 22일 ~ 2017년 2월2일까지 투하한 aqua drift buoy의 궤적을 사용하였으며, 부이는 북풍의 영향으로 남동진하여 제주도 서쪽해안까지 이동하였다. 기상모델은 WRF를 사용하였으며, 유동모델인 MOHID의 표층을 5개로 나누어 표층 두께에 따른 표류체의 바람계수를 산정하였다. 그 결과 표층의 두께가 두꺼울수록 큰 바람계수를 적용해야하며, 이는 표층 두께에 따라 유동모델에 포함된 풍성류의 영향이 달리 적용되기 때문에 전체적인 밸런스를 위한 것으로 사료된다.

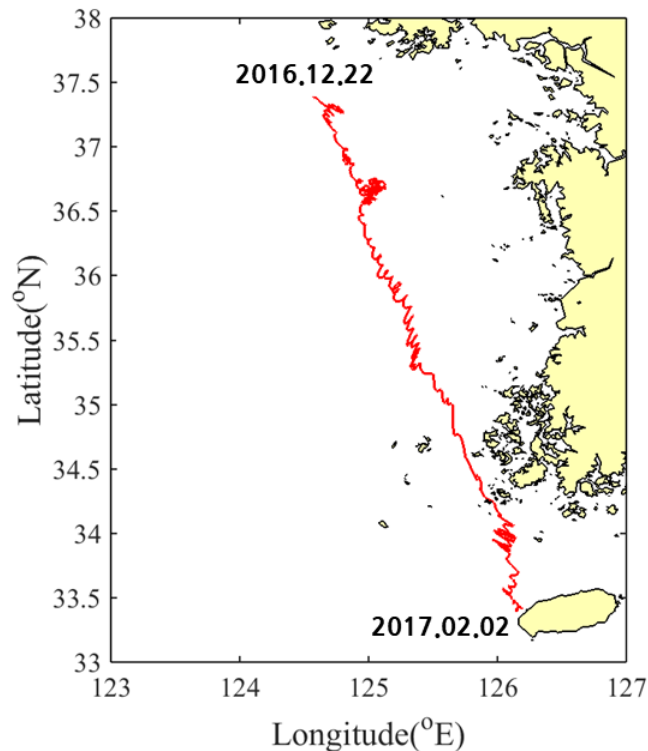


그림 3.1.84 aqua drift buoy의 궤적

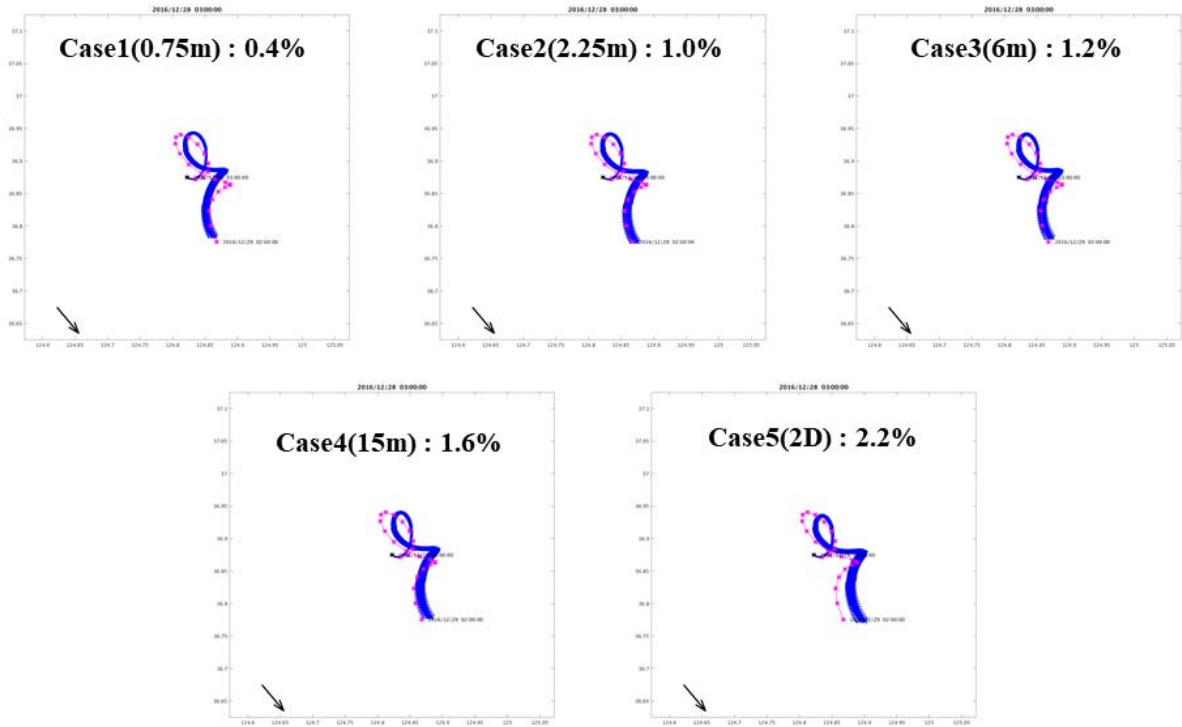


그림 3.1.85 표층 두께에 따른 바람계수 차등적용 결과 비교

(4) HF 레이더

표류예측의 정확도 향상을 위한 방법으로 앞서 설명한 바람의 영향을 정확히 고려하는 것 뿐만 아니라, 직접적으로 표류체에 영향을 미치는 유속을 정확히 입력하는 것이 중요하다. 이를 위해 수치모델에서 계산된 유속과 현장관측자료인 HF radar 자료의 유속을 결합하여 예측 정확도 향상 실험 수행하였다. 제주도에 2011년에 설치되어 제주해협에 대해 관측 중인 HF radar 자료를 사용하였고, max range는 90km, 격자크기는 약 3km, 자료 생산 간격은 1시간이다. 기상모델은 WRF, 유동모델은 MOHID의 결과를 사용하여 표류예측 수행하였다. MOHID와 HF radar 자료의 유속을 결합한 표류예측 결과 수치모델인 MOHID의 유동장만 사용했다.

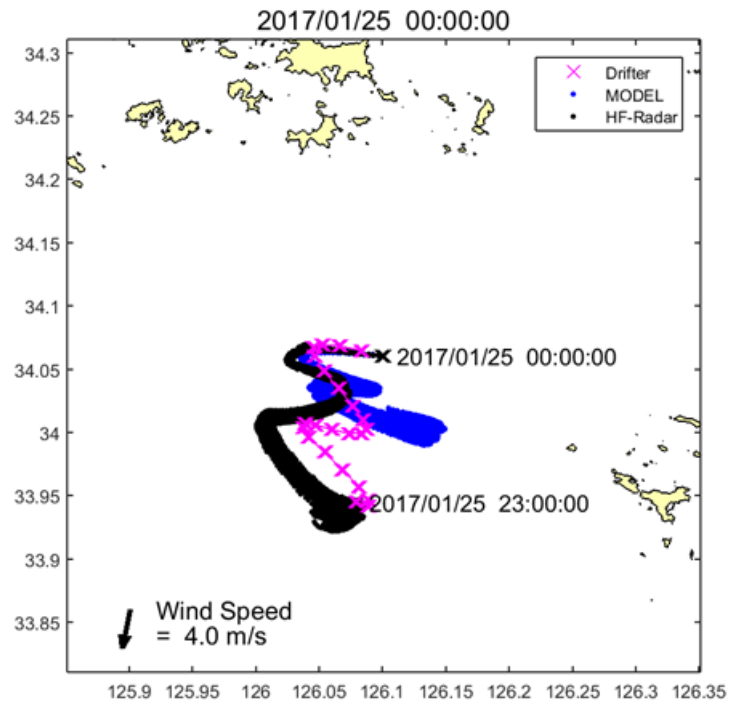


그림 3.1.86 모델자료와 HF Radar 유속자료를 결합한 표류예측결과 정확도 향상

제 2 절 연안·항만의 파랑 및 폭풍해일 재해 위험도 분석평가 기술 개발

1. 파랑 및 폭풍 해일 모델 구축 및 개선

가. FUNWAVE-TVD 수치모형의 개선 및 적용

초기의 FUNWAVE 수치모형은 Delaware 대학의 Kirby et al. (1998)에 의해 개발되었다. 격자를 일정하게 나누는 방식의 유한차분법으로 이산화되어있으며, Shi et al. (2001)에 의하여 곡선좌표계를 사용할 수 있는 모형으로 개선되었다. 초기의 FUNWAVE 모형에서는 급격한 수심변화 등에 의해서 나타나는 수치진동 현상을 줄이기 위하여 수치필터를 사용하였지만, 수치필터를 자주 사용할 경우에는 파랑의 진폭이 감소하기 때문에 수치필터의 적절한 사용이 중요하며, 특히, 비선형성이 증대하는 문제에서는 모형의 수치적인 안정성을 확보하기 어려웠다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 Shi et al. (2012)은 TVD 기법을 사용한 FUNWAVE-TVD 수치모형을 개발하였다. Chen(2006)의 강비선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용하며, 버전 2.1까지 적용된 수치기법으로는 flux항을 풀기 위하여 MUSCL-TVD 기법과 approximate Riemann solver인 HLL 기법을 적용하였으며, 분산항에 대해서는 유한차분기법을 적용하였다. 적용된 MUSCL-TVD 기법으로는 Yamamoto and Daiguji(1993)가 제안한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법과 van-Leer limiter를 사용한 2차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 사용하여 두 기법 중에 선택하여 모의할 수 있도록 구성되어 있다.

FUNWAVE-TVD 수치모형에서 쇄파를 모의하는 방법으로 각 격자에서 파고와 수심의 비를 구하여 일정 값 이상인 격자에서는 Boussinesq 방정식을 비선형 천수방정식으로 전환하여 쇄파를 모의하는 방법과 Kennedy et al.(2000)이 제안한 eddy viscosity 형태의 쇄파를 모의하는 방법의 두가지가 있다. 또한 계산소요시간을 줄이기 위하여 MPI 병렬계산방법이 도입되어 계산량이 많은 문제에도 적용 가능하도록 개선되었다.

본 과제에서는 FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1을 사용하였으며, Shi et al. (2012)이 제시한 분산항 관련 식에서 나타난 수식 오류를 수정하였고, Yamamoto and Daiguji (1993)가 제안한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법에서 나타나는 수치적인 불안정성을 보완하기 위하여 Erduran et al. (2005)의 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 적용

하였다.

(1) FUNWAVE-TVD 수치모형의 개선

(가) 분산항의 수식 오류 수정

FUNWAVE-TVD 수치모형에서는 Chen (2006)의 강비선형 Boussinesq 방정식을 지배 방정식으로 사용하고 있으며, 보존 형태(conservative form)의 방정식으로 변환하여 수치 이산화(numerical discretization)를 하였다. FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1의 코드를 분석하면 Shi et al. (2012)이 제시한 보존 형태(conservative form)의 방정식과 다른 데, 본 과제에서는 보존 형태의 지배방정식을 다시 유도하여 FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1에 빠져있는 여러 가지 항들과 분산항의 수식 오류를 수정하였다.

분산항의 수식 오류를 수정한 FUNWAVE-TVD 수치모형의 보존 형태의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (22)$$

여기서,

$$\Psi = \begin{Bmatrix} \eta \\ \bar{U} \\ \bar{V} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \frac{P}{H} + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) \\ \frac{PQ}{H} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} \frac{Q}{H} \\ \frac{PQ}{H} \\ \frac{Q^2}{H} + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{Bmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial h}{\partial x} + \psi^x + HR^x \\ g\eta \frac{\partial h}{\partial y} + \psi^y + HR^y \end{Bmatrix} \quad (23)$$

η 는 수면변위, h 는 수심, $H = \eta + h$ 이며, 식 (23)의 변수들은 식 (24) - (27)으로 정의된다.

$$(\bar{U}, \bar{V}) = H(u + U_1', v + V_1') \quad (24)$$

$$(P, Q) = H(u + U_4, v + V_4) \quad (25)$$

$$\psi^x = \eta_t (U_1' - U_4) + H(uU_{4,x} + vU_{4,y} + U_4u_x + V_4u_y - U_1'' - U_2 - U_3) \quad (26)$$

$$\psi^y = \eta_t (V_1' - V_4) + H(uV_{4,x} + vV_{4,y} + U_4v_x + V_4v_y - V_1'' - V_2 - V_3) \quad (27)$$

$\mathbf{u}=\mathbf{u}_\alpha$ 는 $z=z_\alpha$ 에서 정의된 유속이며, 아래첨자 x, y, t 는 각각의 방향 및 시간에 대한 미분을 의미한다. R^x, R^y 항은 바닥 마찰항이나 sponge layer에 의한 과량감쇄를 나타내는 항을 의미한다.

식 (24) - (27)의 $(U'_1, V'_1), (U''_1, V''_1), (U_2, V_2), (U_3, V_3), (U_4, V_4)$ 를 제시한다.

$$U'_1 = \frac{1}{2}(1-\beta)^2 h^2 (u_{xx} + v_{xy}) - (1-\beta)h [(hu)_{xx} + (hv)_{xy}] \quad (28)$$

$$V'_1 = \frac{1}{2}(1-\beta)^2 h^2 (u_{xy} + v_{yy}) - (1-\beta)h [(hu)_{xy} + (hv)_{yy}] \quad (29)$$

$$\begin{aligned} U''_1 = & - \left\{ \eta \eta_x (u_{tx} + v_{ty}) + \frac{1}{2} \eta^2 (u_{txx} + v_{txy}) + \eta_x [(hu)_{tx} + (hv)_{ty}] + \eta [(hu)_{txx} + (hv)_{txy}] \right\} \\ & - [\beta(1-\beta)h\eta_t - \beta^2 \eta \eta_t] (u_{xx} + v_{xy}) - \left[\beta(1-\beta)h\eta - \frac{1}{2} \beta^2 \eta^2 \right] (u_{txx} + v_{txy}) \\ & + \beta \eta_t [(hu)_{xx} + (hv)_{xy}] + \beta \eta [(hu)_{txx} + (hv)_{txy}] \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} V''_1 = & - \left\{ \eta \eta_y (u_{tx} + v_{ty}) + \frac{1}{2} \eta^2 (u_{txy} + v_{tyy}) + \eta_y [(hu)_{tx} + (hv)_{ty}] + \eta [(hu)_{txy} + (hv)_{tyy}] \right\} \\ & - [\beta(1-\beta)h\eta_t - \beta^2 \eta \eta_t] (u_{xy} + v_{yy}) - \left[\beta(1-\beta)h\eta - \frac{1}{2} \beta^2 \eta^2 \right] (u_{txy} + v_{tyy}) \\ & + \beta \eta_t [(hu)_{xy} + (hv)_{yy}] + \beta \eta [(hu)_{txy} + (hv)_{tyy}] \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} U_2 = & \{ (\beta-1)(h+\eta) [u((hu)_x + (hv)_y)_x + v((hu)_x + (hv)_y)_y] \\ & + \left[\frac{1}{2}(1-\beta)^2 h^2 - \beta(1-\beta)h\eta + \frac{1}{2}(\beta^2-1)\eta^2 \right] [u(u_x + v_y)_x + v(u_x + v_y)_y] \\ & + \frac{1}{2} [(hu)_x + (hv)_y + \eta(u_x + v_y)]^2_x \} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} V_2 = & \{ (\beta-1)(h+\eta) [u((hu)_x + (hv)_y)_x + v((hu)_x + (hv)_y)_y] \\ & + \left[\frac{1}{2}(1-\beta)^2 h^2 - \beta(1-\beta)h\eta + \frac{1}{2}(\beta^2-1)\eta^2 \right] [u(u_x + v_y)_x + v(u_x + v_y)_y] \\ & + \frac{1}{2} [(hu)_x + (hv)_y + \eta(u_x + v_y)]^2_y \} \end{aligned} \quad (33)$$

$$U_3 = -v\omega_1 - \omega_0 \left\{ \left[\left(\beta - \frac{1}{2} \right) (h + \eta) \right] [(hu)_x + (hv)_y]_y \right\}$$

$$+ \left[\left(\frac{1}{3} - \beta + \frac{1}{2} \beta^2 \right) h^2 + \left(\frac{1}{6} - \beta + \beta^2 \right) \eta h + \left(\frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{6} \right) \eta^2 \right] (u_x + v_y)_y \quad (34)$$

$$V_3 = u\omega_1 + \omega_0 \left\{ \left[\left(\beta - \frac{1}{2} \right) (h + \eta) \right] [(hu)_x + (hv)_y]_x \right. \\ \left. + \left[\left(\frac{1}{3} - \beta + \frac{1}{2} \beta^2 \right) h^2 + \left(\frac{1}{6} - \beta + \beta^2 \right) \eta h + \left(\frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{6} \right) \eta^2 \right] (u_x + v_y)_x \right\} \quad (35)$$

$$\omega_0 = v_x - u_y \quad (36)$$

$$\omega_1 = \{(\beta - 1)h_x + \beta\eta_x\} \{[(hu)_x + (hv)_y]_y + [(\beta - 1)h + \beta\eta](u_x + v_y)_y\} \\ - \{(\beta - 1)h_y + \beta\eta_y\} \{[(hu)_x + (hv)_y]_x + [(\beta - 1)h + \beta\eta](u_x + v_y)_x\} \quad (37)$$

$$U_4 = \left(\frac{1}{3} - \beta + \frac{1}{2} \beta^2 \right) h^2 (u_{xx} + v_{xy}) + \left(\beta - \frac{1}{2} \right) h [(hu)_{xx} + (hv)_{xy}] \\ + \left[\left(\frac{1}{6} - \beta + \beta^2 \right) h\eta + \left(\frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{6} \right) \eta^2 \right] (u_{xx} + v_{xy}) + \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \eta [(hu)_{xx} + (hv)_{xy}] \quad (38)$$

$$V_4 = \left(\frac{1}{3} - \beta + \frac{1}{2} \beta^2 \right) h^2 (u_{xy} + v_{yy}) + \left(\beta - \frac{1}{2} \right) h [(hu)_{xy} + (hv)_{yy}] \\ + \left[\left(\frac{1}{6} - \beta + \beta^2 \right) h\eta + \left(\frac{1}{2} \beta^2 - \frac{1}{6} \right) \eta^2 \right] (u_{xy} + v_{yy}) + \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \eta [(hu)_{xy} + (hv)_{yy}] \quad (39)$$

Shi et al.(2012)이 제시한 분산항과는 (U'_1, V'_1) , (U''_1, V''_1) , V_3 , ω_1 항이 다르다. Shi et al.에 의한 FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1과 식 (22) - (39)를 사용하여 수정된 FUNWAVE-TVD 모형을 비교한 결과는 (다) 절에 제시한다.

(나) Erduran et al. (2005)의 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법 적용

FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1에서는 Yamamoto and Daiguji(1993)가 제안한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 사용하지만, Abadie et al. (2012)은 FUNWAVE-TVD 모형에서 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 사용 할 때 수치적으로 불안정성하다는 문제를 제기한 바 있다. 본 과제에서는 Erduran et al. (2005)이 제안한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 적용하여 FUNWAVE-TVD 수치모형을 개선하였으며, Yamamoto and Daiguji (1993)가 제안한 기법보다 수치적으로 안정적인 결과를 보였다.

Erduran et al. (2005)이 제안한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법은 다음과 같다.

$$\varphi_{i-1/2}^L = \varphi_{i-1} + \frac{1}{6} \left[\nu(\gamma_1) \Delta^* \varphi_{i-3/2} + 2\nu\left(\frac{1}{\gamma_1}\right) \Delta^* \varphi_{i-1/2} \right] \quad (40)$$

$$\varphi_{i-1/2}^R = \varphi_i - \frac{1}{6} \left[2\nu(\gamma_2) \Delta^* \varphi_{i-1/2} + \nu\left(\frac{1}{\gamma_2}\right) \Delta^* \varphi_{i+1/2} \right] \quad (41)$$

$$\Delta^* \varphi_{i-1/2} = \Delta \varphi_{i-1/2} - \frac{\Delta^3 \bar{\varphi}_{i-1/2}}{6} \quad (42)$$

$$\Delta \varphi_{i-1/2} = \varphi_i - \varphi_{i-1} \quad (43)$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta^* \varphi_{i-1/2}}{\Delta^* \varphi_{i-3/2}} \quad (44)$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta^* \varphi_{i+1/2}}{\Delta^* \varphi_{i-1/2}} \quad (45)$$

$$\Delta^3 \bar{\varphi}_{i-1/2} = \Delta \bar{\varphi}_{i+1/2} - 2\Delta \bar{\varphi}_{i-1/2} + \Delta \bar{\varphi}_{i-3/2} \quad (46)$$

$$\Delta \bar{\varphi}_{i+1/2} = M(\Delta \varphi_{i+1/2}, \Delta \varphi_{i-3/2}, \Delta \varphi_{i-1/2}) \quad (47)$$

$$\Delta \bar{\varphi}_{i-1/2} = M(\Delta \varphi_{i-1/2}, \Delta \varphi_{i+1/2}, \Delta \varphi_{i-3/2}) \quad (48)$$

$$\Delta \bar{\varphi}_{i-3/2} = M(\Delta \varphi_{i-3/2}, \Delta \varphi_{i-1/2}, \Delta \varphi_{i+1/2}) \quad (49)$$

여기서 M 과 ν 는 각각 minmod limiter와 van-Leer limiter를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$M(j, k, \ell) = \text{sign}(j) \max[0, \min\{|j|, 2\text{sign}(j)k, 2\text{sign}(j)\ell\}] \quad (50)$$

$$\nu(r) = \frac{r+|r|}{1+r} \quad (51)$$

φ 는 η , \mathbf{u} , $H\mathbf{u}$, U_4 , V_4 를 의미하며, 상첨자 L , R 은 cell interface를 기준으로 각각 좌측값과 우측값을 의미한다.

(다) FUNWAVE-TVD 모형의 검증

수정, 개선된 FUNWAVE-TVD 모형을 검증하기 위하여 Vincent and Briggs (1989) 실험에 적용하여 실험 관측치와 비교하였으며, Luth et al. (1994)의 수치실험 결과와도 비교하였다. FUNWAVE-TVD 모형의 run-up을 검증하기 위하여 Thacker (1981)의 정확해와 비교하였다.

① Vincent and Briggs (1989) 실험의 적용

쇄파 실험에 적용하였으며, 적용한 실험안은 표 3.2.1과 같다.

표 3.2.1 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 검증에 사용한 Vincent and Briggs 실험안

Case ID	Frequency spreading	Peak period (s)	Significant wave height (m)	γ	σ
M3	Monochromatic	1.3	0.135	-	-
N5	Narrow (Irregular wave)	1.3	0.190	20	10

수치실험에 사용한 수심은 그림 3.2.1과 같다. 수중천퇴를 제외한 영역의 수심은 0.4572 m로 일정하며, 중심의 수심은 0.1542 m이다. x=0 m에 내부조파기를 설치하여 각 실험안의 파랑변형 실험을 수행하였다. 실험영역 경계에서의 반사파 생성을 방지하기 위하여 실험영역의 왼쪽 경계와 오른쪽 경계에 sponge layer를 설치하였다.

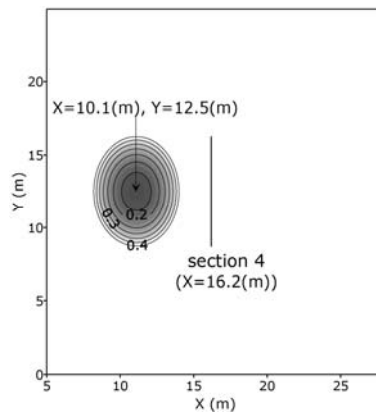


그림 3.2.1 수심도

Vincent and Briggs는 수중천퇴의 중심으로부터 6.1m 떨어진 천퇴 후면(transect 4)에서 무차원화된 파고값을 제시하였는데, case M3는 36.4 s, case N5는 260 s 동안의 기록된 수면변위를 이용하여 파고값을 계산하였다. 본 수치실험에서도 transect 4에서 동일한 시간 간격동안 저장된 수면변위를 이용하여 무차원화된 파고값을 계산하여 수치실험값과 비교하였다.

Case M3의 결과부터 제시한다. 규칙파를 사용한 실험이며, 입사파의 주기는 1.3 s, 파고는 0.135m이다. 수면변위를 이용한 파고값을 계산하기 위하여 zero-up cross 방법을 이용한 H_{rms} 를 이용하였다. Eddy viscosity type의 breaking scheme을 사용하였으며, 관측치와 비교한 결과를 제시한다.

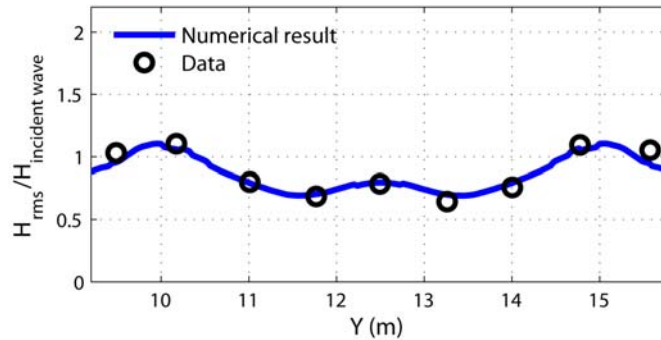


그림 3.2.2 수치실험 관측치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 수치해와 비교(case M3)

본 과제를 통하여 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 36.4 s 간격으로 계산된 무차원 파고값과 파랑 쇄파로 인하여 형성되는 wave-induced currents를 그림 3.2.3과 그림 3.2.4에 제시한다. 또한 그림 3.2.5에 분산향에 관련된 항들을 수정하기 전의 FUNWAVE-TVD 버전 2.1로 계산된 wave-induced currents를 제시하였다. 개선된 FUNWAVE-TVD 모형은 시간이 지남에도 모의영역 $y=12.5$ m를 중심으로 대칭인 wave induced currents 분포를 유지했지만, FUNWAVE-TVD 버전 2.1 모형에서는 대칭인 분포가 유지되지 않았다.

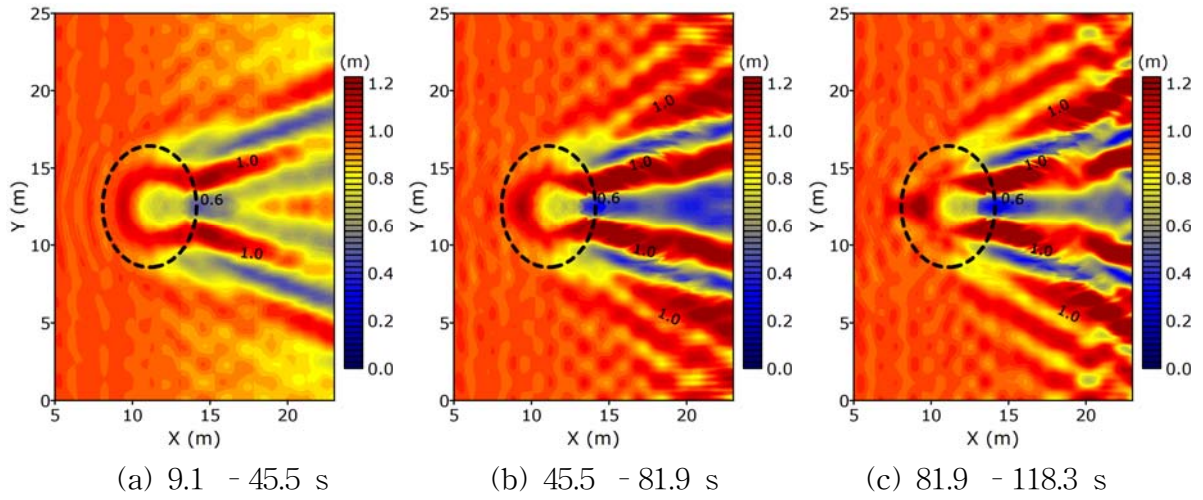


그림 3.2.3 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 36.4 s 간격으로 계산된 무차원 파고 분포

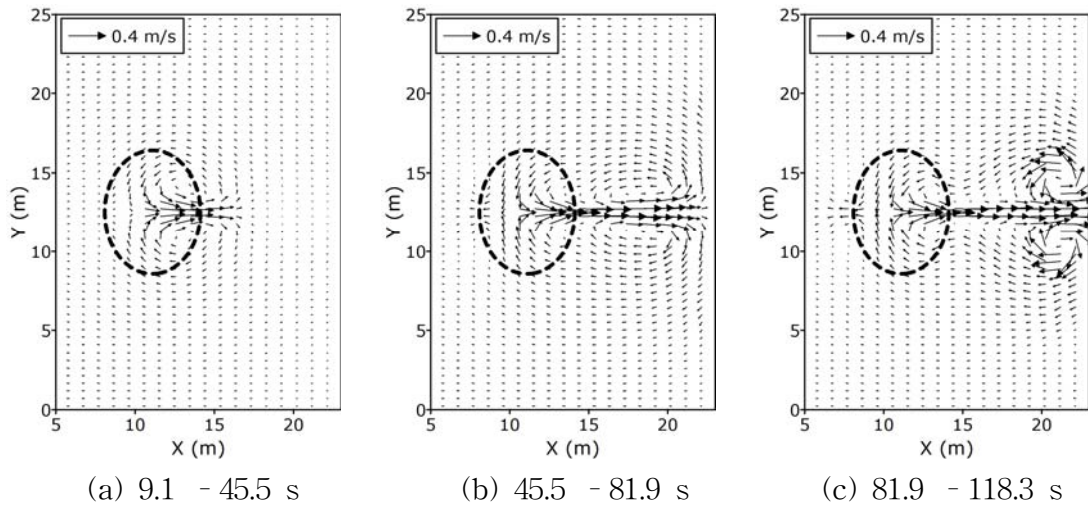


그림 3.2.4 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 36.4 s 간격으로 계산된 wave-induced currents

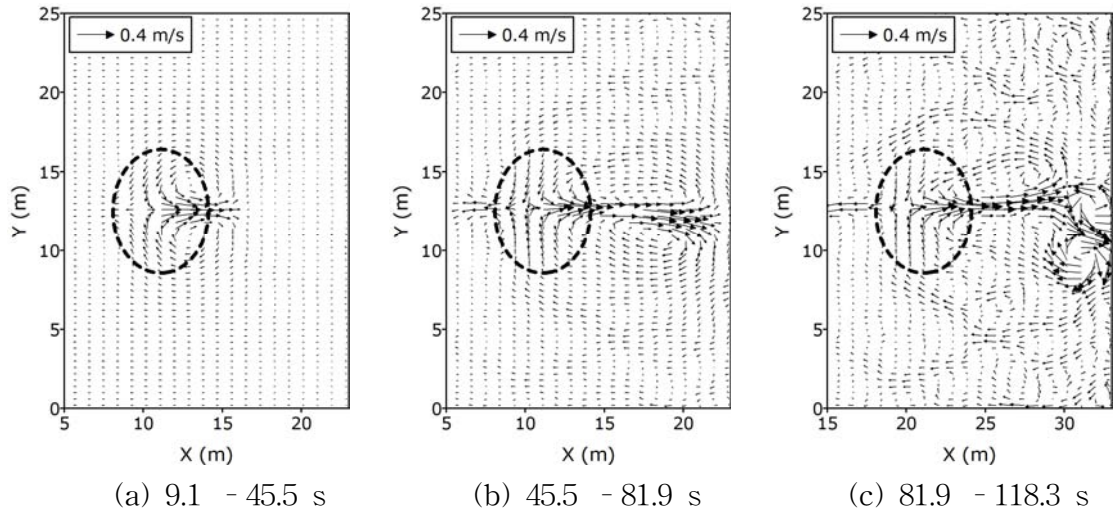


그림 3.2.5 FUNWAVE-TVD 버전 2.1 모형의 36.4 s 간격으로 계산된 wave-induced currents

개선된 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 불규칙파 실험에 해당하는 case N5 실험을 수행하였다. 표 3.2.1에 제시된 실험안과 같이 narrow banded spectrum을 사용하였으며, 유의파주기는 1.3 s, 유의파고는 0.190m이다. 수면변위를 이용한 파고값을 계산하기 위하여 다음 식을 이용하였다(Goda, 2000).

$$H_{mo} = 4.004 \sqrt{m_o}, \quad m_o = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \eta^2 dt \quad (52)$$

Eddy viscosity type의 breaking scheme을 사용하였으며, case N5에 대한 관측치와 비교한 결과를 그림 3.2.6에 제시한다. 그림 3.2.7에 무차원화된 파고와 wave-induced currents를 제시한다.

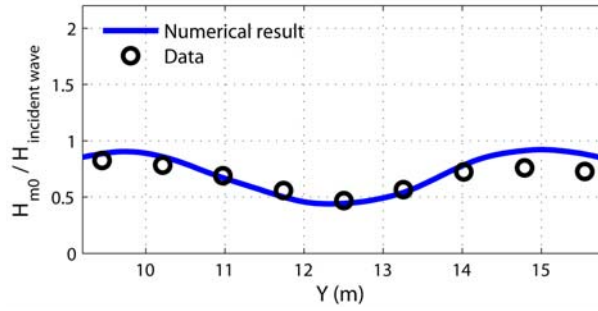
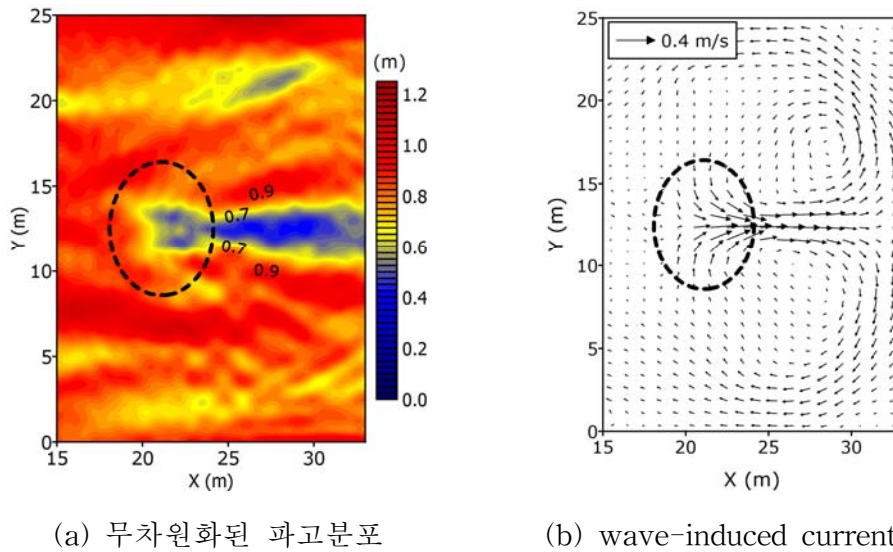


그림 3.2.6 수리실험 관측치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 수치해와 비교(case N5)



(a) 무차원화된 파고분포

(b) wave-induced currents

그림 3.2.7 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 260 (s) 동안의 계산된 무차원화된 파고와 wave-induced currents 분포(case N5)

그림 3.2.7에 쇄파로 인하여 wave-induced currents가 발생하는 것과 wave-induced currents가 발달된 부분에서는 무차원화된 파고가 낮게 형성되는 결과가 나타난다.

② Luth et al. (1994) 실험의 적용

Beji and Battjes (1993)와 Luth et al. (1994)은 수면하 구조물을 통과하는 파랑의 수리 실험을 수행하였다. 수치실험에 사용한 수면하 구조물을 그림 3.2.8에 제시하였다. 그림 3.2.8에 관측치와 비교할 wave gauge의 위치를 제시하였다. $x=0$ m에 내부조파기를 설치하였으며, 모의영역 양 경계에 sponge layer를 설치하였다. 실험안을 표 3.2.2에 제시한다.

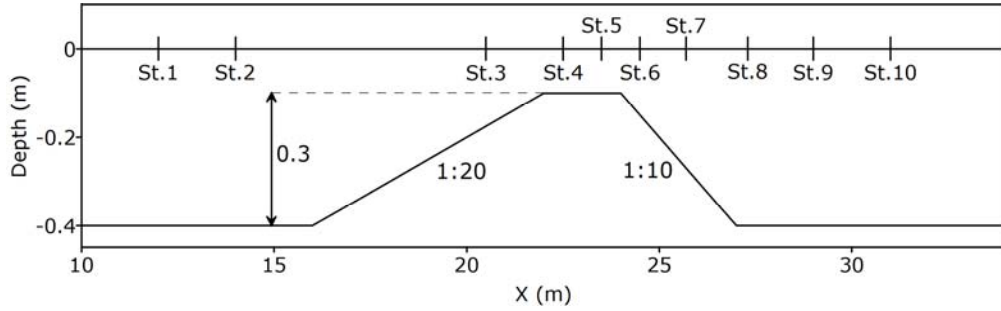
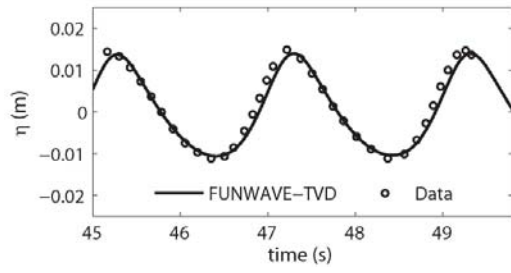


그림 3.2.8 Luth et al.의 실험

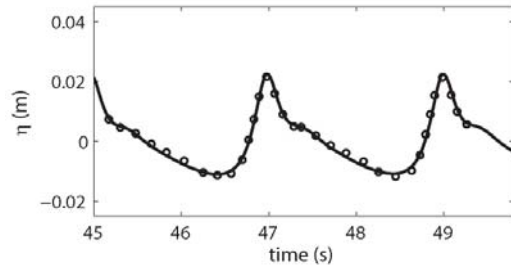
표 3.2.2 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 검증에 사용한 Luth et al.의 실험안

Case ID	Amplitude (m)	Period (s)	$\mu \equiv k_o h_o$	$\delta \equiv a_o / h_o$
A	0.01	2.02	0.67	0.025
C	0.0205	1.01	1.69	0.051

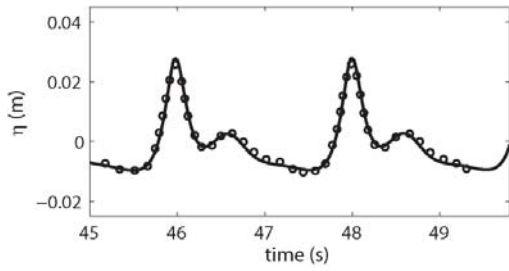
Case A에 대하여 관측치와 비교한 결과를 그림 3.2.9에 제시한다. 입사파는 규칙파이지만, St. 4 - 10에서는 파랑의 비선형 효과로 인하여 고주파 성분의 파랑이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 구조물 정상부에 나타났던 고주파 성분의 파랑은 다시 수심이 깊어지는 영역을 지나면서 중간파에서 심해파로 바뀌는데, St. 8 - 10에서는 FUNWAVE-TVD 모형의 결과와 관측치와의 차이가 나타난다. 이것은 FUNWAVE-TVD 모형의 지배방정식인 Boussinesq 방정식을 유도할 때 $O(\mu^2)$ 항까지만 고려되었기 때문인 것으로 판단된다. Gobbi and Kirby(1999)는 velocity potential을 이용하여 $O(\mu^4)$ 까지 전개한 강비선형 Boussinesq 모형을 유도하였는데, 이 모형을 이용하여 약간의 차이는 존재하지만, St. 8 - 10에서의 관측치를 재현한 바 있다. Case C는 Case A에 비하여 비선형성과 분산성이 모두 증가한 실험안이다. Case C의 관측치와 비교한 결과를 그림 3.2.10에 제시한다. Case A와 비슷하게 St. 1 - 7까지는 잘 재현하지만, St. 8 - 10에서는 관측치와 차이가 나타난다.



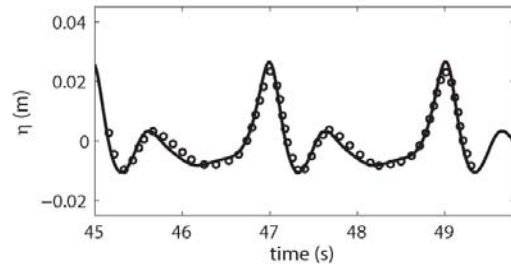
(a) St. 3



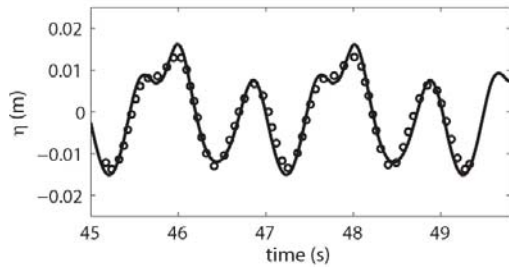
(b) St. 4



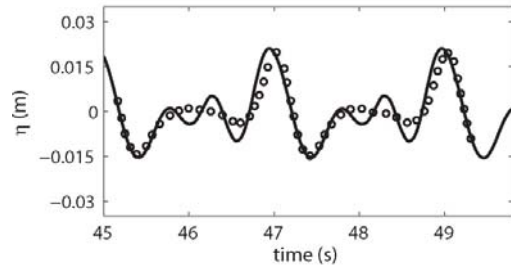
(c) St. 5



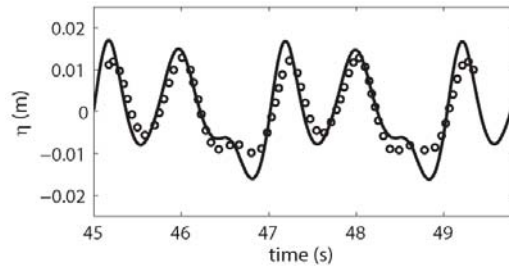
(d) St. 6



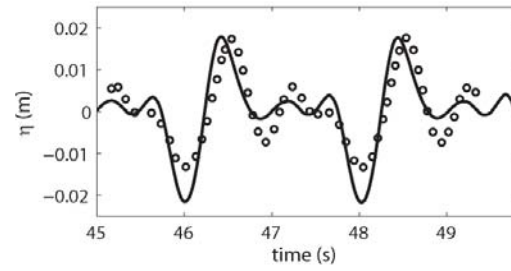
(e) St. 7



(f) St. 8

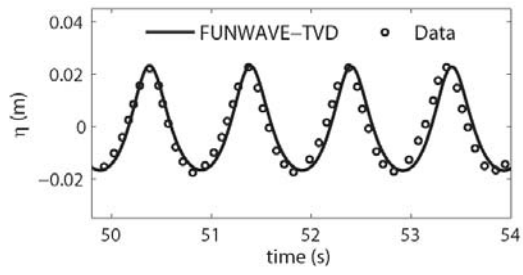


(g) St. 9

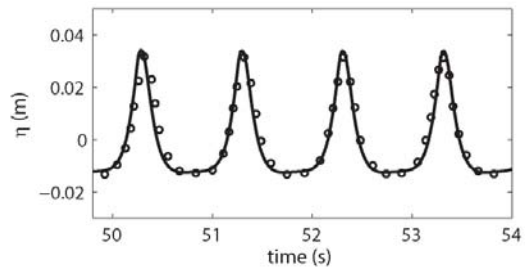


(h) St. 10

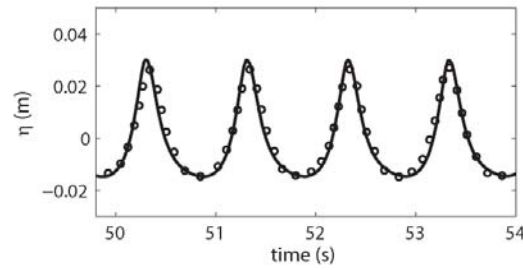
그림 3.2.9 Case A에 대한 수치모형 실험치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 비교



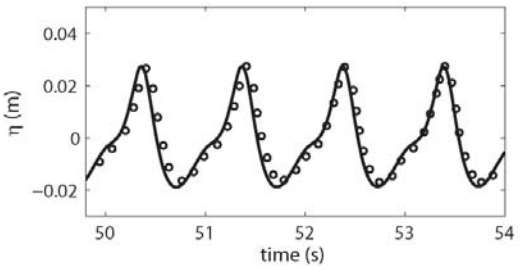
(a) St. 3



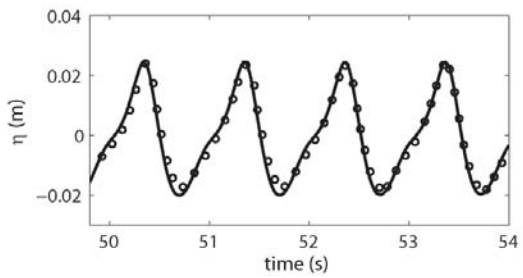
(b) St. 4



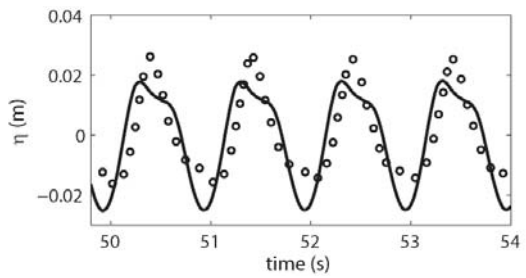
(c) St. 5



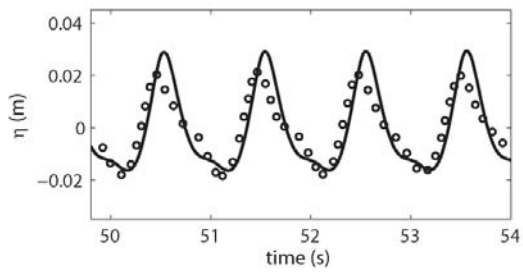
(d) St. 6



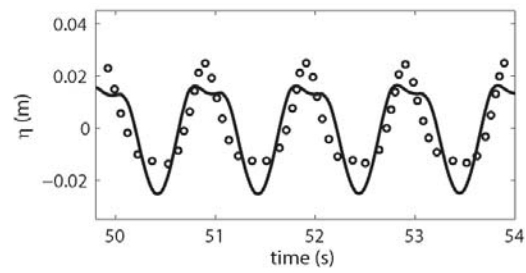
(e) St. 7



(f) St. 8



(g) St. 9



(h) St. 10

그림 3.2.10 Case C에 대한 수리모형 실험치와 개선된 FUNWAVE-TVD 모형의 비교

③ Thacker (1981)의 정확해와 비교

본 과제에서는 FUNWAVE-TVD 버전 2.1 모형의 wave run-up 계산루틴과 관련된 typo를 수정하였는데, 수정 후 검증을 위하여 Thacker의 정확해를 통하여 검증하였다. FUNWAVE-TVD 모형에서 DISPERSION=F 옵션을 이용하면 shallow water equations (SWE)을 이용한 모의를 수행할 수 있으므로 FUNWAVE-TVD 모형에서 SWE를 이용한 수치해와 Thacker의 정확해를 비교하였다.

Wave runup을 검증하기 위한 Thacker의 정확해는 다음과 같이 주어진다.

$$\eta = h_0 \left[\frac{\sqrt{1-A^2}}{1-A\cos\omega t} - 1 - \frac{r^2}{a^2} \left\{ \frac{1-A^2}{(1-A\cos\omega t)^2} - 1 \right\} \right] \quad (53)$$

$$h = h_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (54)$$

여기서 $A = (a^4 - r_0^4)/(a^4 + r_0^4)$, $\omega = \sqrt{8gh_0}/a$, $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ 이며, $(x_0, y_0) = (0, 0)$, $r_0 = 2000$ m, $a = 2500$ m, $h_0 = 1$ m을 사용하였다. 식 (53), (54)에 의한 초기조건을 그림 3.2.11에 제시한다.

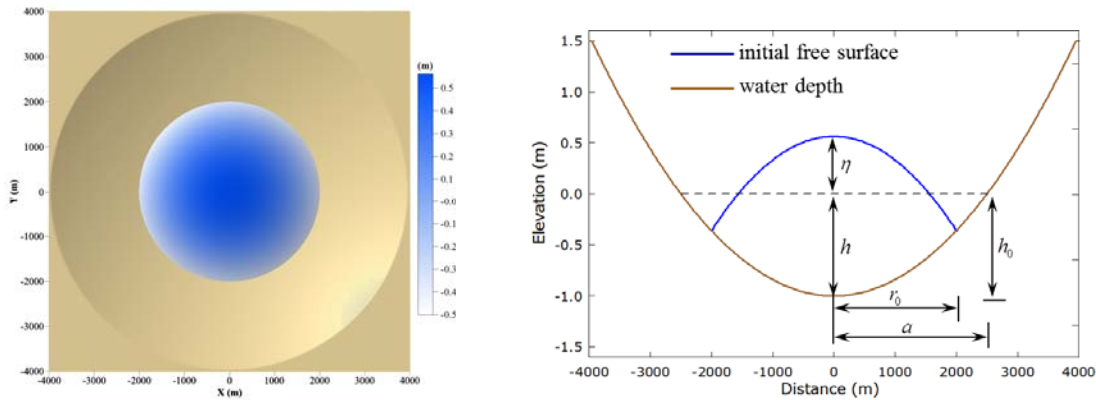
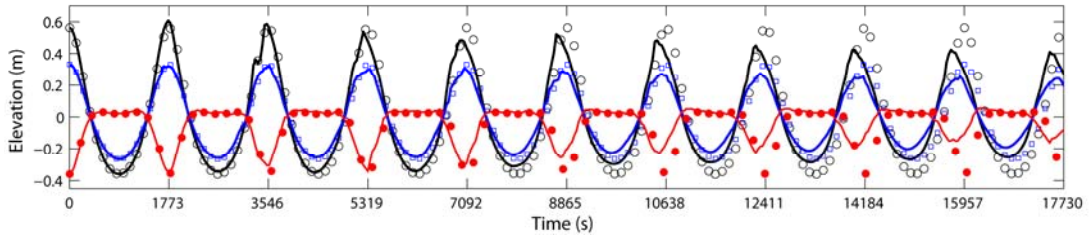


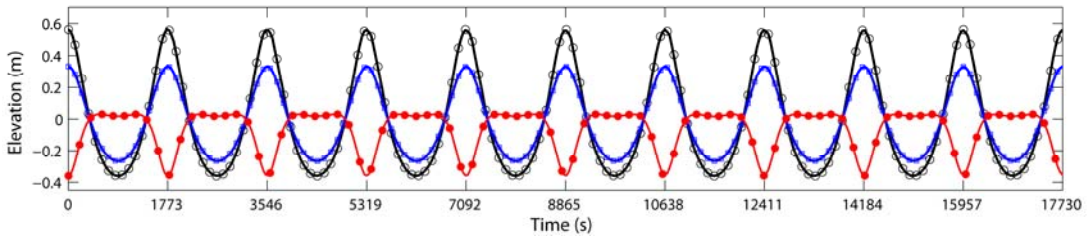
그림 3.2.11 Thacker의 정확해에 의한 초기조건

그림 3.2.12에 DISPERSION=F 옵션을 사용한 FUNWAVE-TVD 버전 2.1모형과 수정, 개선된 FUNWAVE-TVD의 세지점에서의 timeseries 결과를 제시하였다. 10T(주기)까지

모의한 결과 수정 전의 모형은 시간이 지남에 따라 수치해의 감쇄현상이 나타나지만, 수정 후의 모형은 정확해와 상당히 일치하는 결과를 보인다.



(a) FUNWAVE-TVD 모형 버전 2.1과 정확해의 비교 결과



(b) 수정, 개선된 FUNWAVE-TVD 모형과 정확해의 비교 결과

그림 3.2.12 $(x, y) = (0, 0)$, $(x, y) = (1000, 0)$, $(x, y) = (2000, 0)$ 에서 Thacker의 정확해와 수치해의 비교 결과

(라) Nesting 방법의 적용

개선된 FUNWAVE-TVD 모형에 one-way nesting 방법을 적용하였다. Nested domain의 경계에서 모든 time step마다 η , u , v 를 저장한 뒤 경계에서 저장된 η , u , v 를 이용하여 nested domain에서의 파랑 전파를 모의하였다. MPI programming을 이용하였으며, nested domain의 임의의 위치에 따라 임의의 cpu 간의 η , u , v 의 교환이 가능하도록 구성하였다.

① Dam-break 형태의 초기조건을 이용한 모의

Dam-break 형태의 초기조건을 사용한 결과를 제시한다. 초기조건을 그림 3.2.13에 제시하였다. 2개의 nested domain을 사용하였으며, 격자 크기는 1/2씩 작은 격자를 사용하였다. 시간에 따른 결과를 그림 3.2.14에 제시하였다. Nested domain이 있는 영역에서 dispersive wave가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

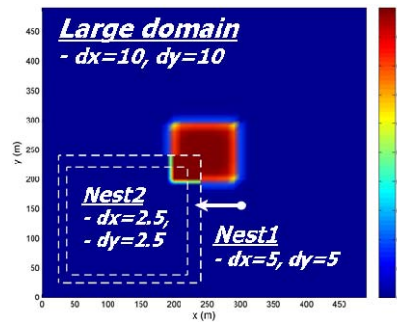


그림 3.2.13 수면변위의 초기조건

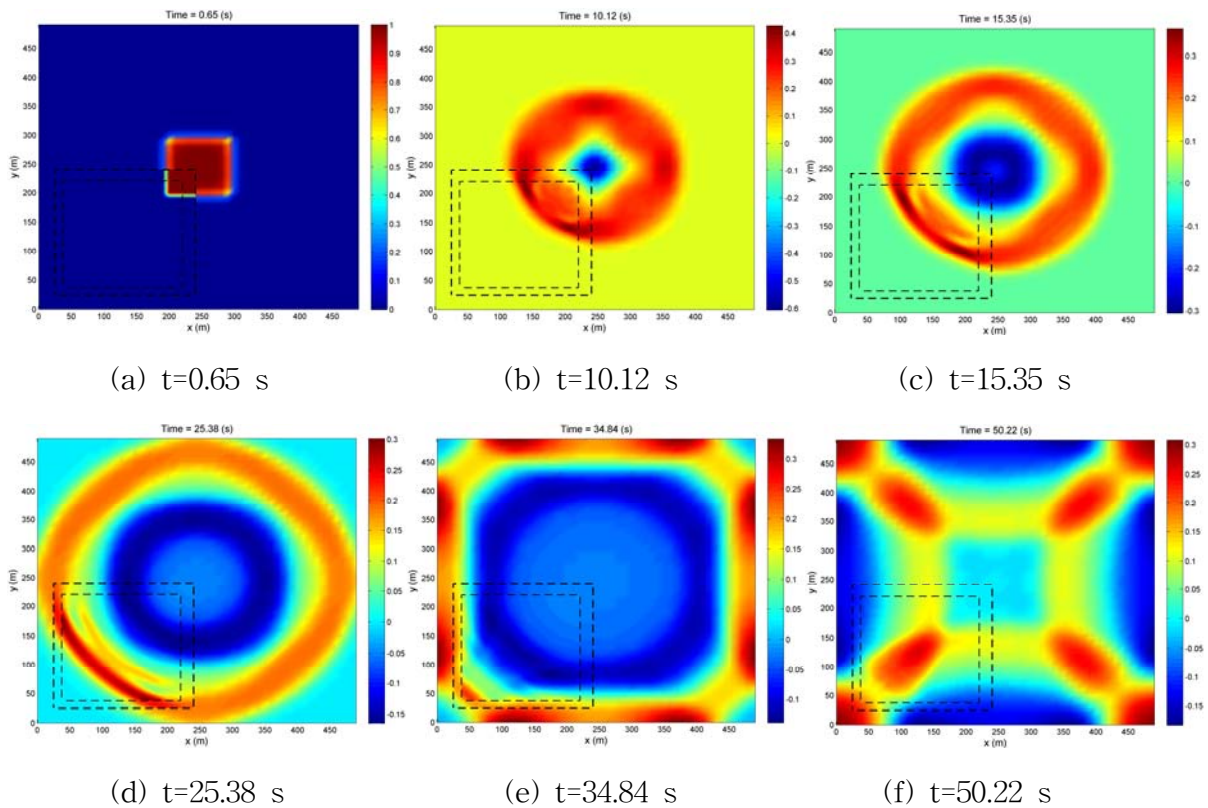


그림 3.2.14 Nesting 기법을 사용하였을 때 시간에 따른 수면변위 결과

② 수중천뢰가 있는 계산영역에서 조파 모의

Vincent and Briggs (1989)의 실험과 같이 수중천뢰가 있는 계산영역에서 내부조파기를 이용한 파랑 전파 실험을 수행하였다. 그림 3.2.15에 수심분포와 초기 실험안을 제시하였다. 2개의 nested domain을 사용하였으며, 격자 크기는 1/2씩 작은 격자를 사용하였다.

Nested domain 영역에서의 파랑 전파는 numerical dissipation 없이 파랑 진폭을 유지하며 전파하는 것을 확인할 수 있다.

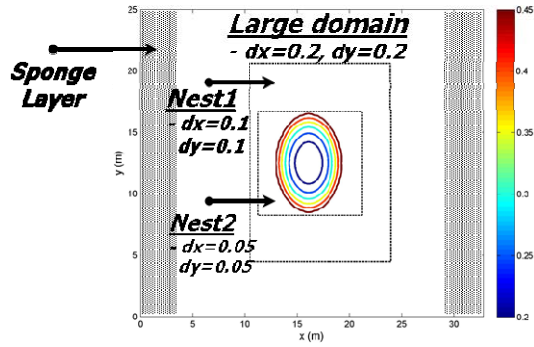


그림 3.2.15 수심분포와 nested domain을 이용한 실험안

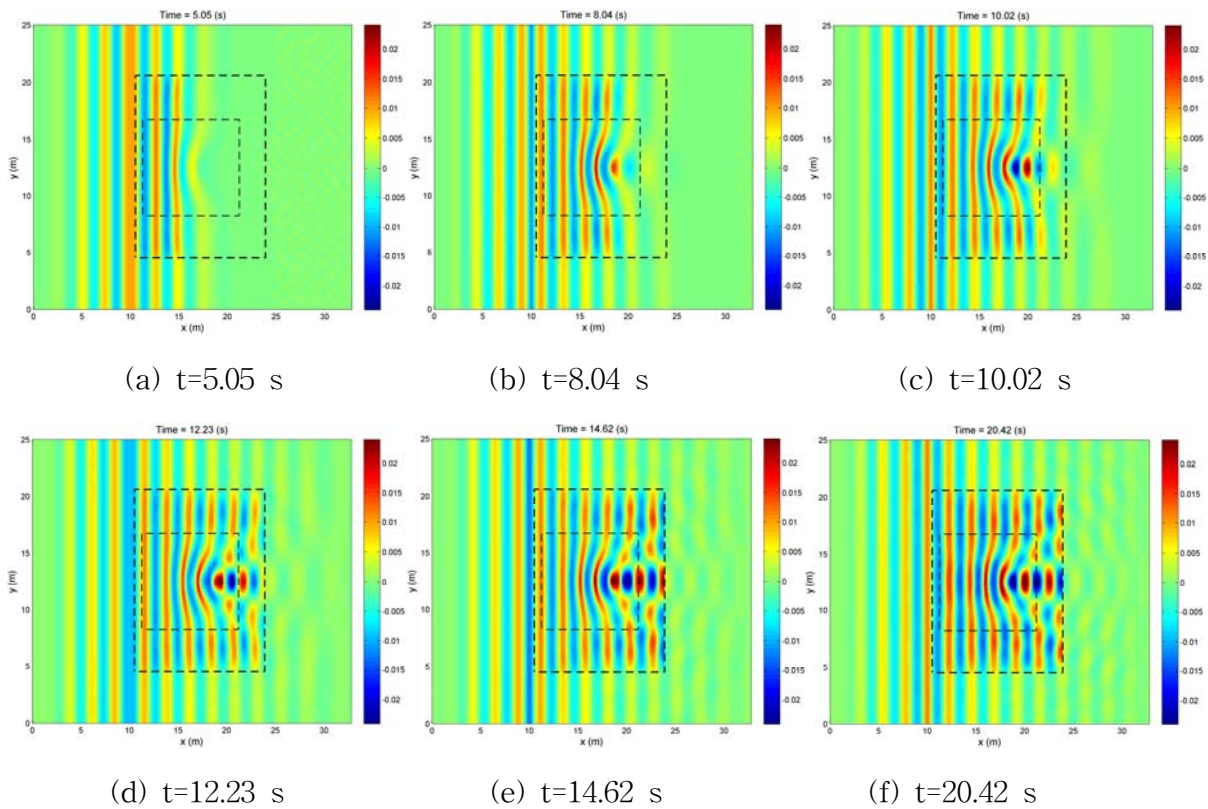


그림 3.2.16 Nested domain과 함께 내부조파 방법을 이용한 파랑 전파 모의

(2) 개선된 FUNWAVE-TVD 수치모형의 적용

본 과제를 통하여 최종 개선, 수정된 FUNWAVE-TVD 모형을 적용하였다. 또한 FUNWAVE-TVD 모형 버전 2.1 코드 내의 typo를 수정하였다. 특히 불규칙과 조파를 할 때 사용되는 wrapped normal distribution spreading function과 amplitude spectrum 을 계산하는 루틴에서의 typo를 수정하여 수치실험을 수행하였다.

(가) FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 천해설계파 산출 및 스펙트럼 모형과의 비교

074124 격자점의 50년 재현기간 설계파를 이용하여 부산항 인근의 천해설계파를 계산하였다. FUNWAVE-TVD 모형의 모의영역 및 수심도, 074124 격자점의 위치를 그림 3.2.17에 제시하였다. 074124 격자점에서부터 부산항 인근 해역 전까지 수심이 깊은 해역은 SWAN 모형을 사용하였으며, FUNWAVE-TVD 모형의 경계인 S1 정점에서 계산된 SWAN 모형의 파고, 주기, 파향을 FUNWAVE-TVD 모형의 입사파 조건으로 사용하였다.

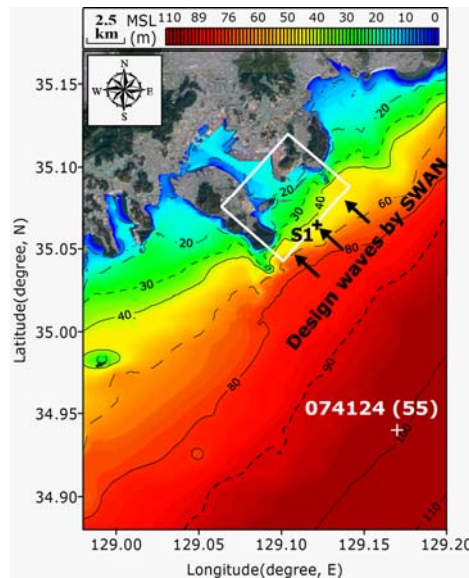
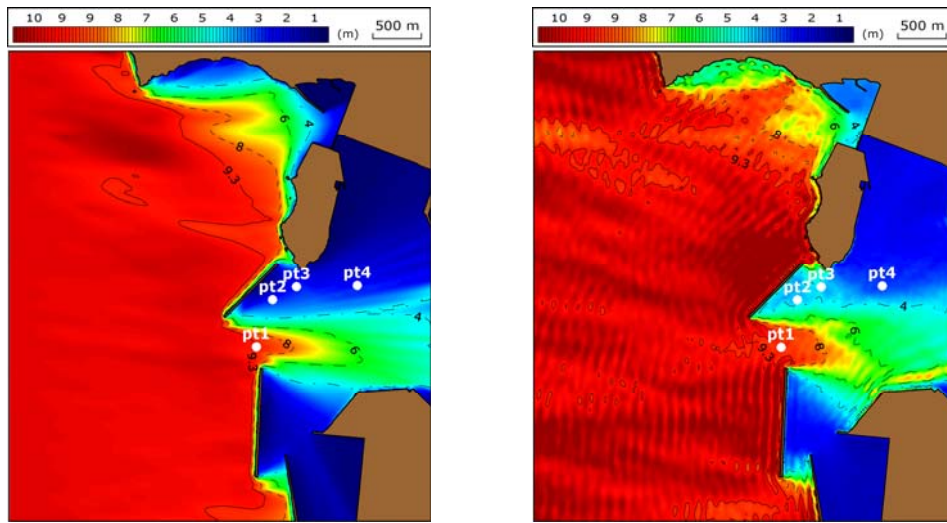


그림 3.2.17 FUNWAVE-TVD 모형의 모의영역(□) 및 수심도, 074124 격자점의 위치

074124 격자점의 SE 파향에 해당하는 설계파고와 주기는 각각 11.65m, 13.64 s이며, 설계파고와 주기를 이용하여 SWAN 모형에서 계산된 S1 정점의 파고, 주기, 파향은 각각 10.32m, 12.48 s, 128.6°이다. S1 정점에서 계산된 파고, 주기, 파향을 FUNWAVE-TVD

모형의 입사파 조건으로 사용하였으며, FUNWAVE-TVD 모형에서 불규칙파를 조파할 때 최단파의 적절한 재현을 위하여 $\Delta x = \Delta y = 2$ m로 구성하였다. 또한 S1 정점에서 계산된 파고, 주기, 파향을 SWAN 모형의 입사파 조건으로 사용하여 FUNWAVE-TVD 모형의 결과와 비교하였다. 두 모형의 결과를 그림 3.2.18에 제시하였다. 그림 3.2.18의 pt1 - pt.4에서의 유의파고 계산결과를 표 3.2.3에 제시, 비교하였다. FUNWAVE-TVD 모형에서의 유의파고 계산은 식 (52)를 사용하였다.



(a) SWAN 모형의 결과

(b) FUNWAVE-TVD 모형의 결과

그림 3.2.18 SWAN 모형과 FUNWAVE-TVD 모형 결과의 비교

표 3.2.3 SWAN 모형과 FUNWAVE-TVD 모형에서 계산된 파고 결과 비교

Hs (m)	SWAN	FUNWAVE-TVD
pt1	9.25	9.20
pt2	2.22	3.64
pt3	2.17	3.79
pt4	2.04	2.58

pt1 인근에서의 파고는 두 모형간의 큰 차이가 없었지만, SWAN의 경우 항 내에서 파랑 회절 현상을 재현하는데 정확도가 낮으므로 (The SWAN team, 2016) pt2, pt3,

pt4와 같이 회절의 영향이 크게 나타나는 구간은 FUNWAVE-TVD 모형의 파고가 SWAN에서 계산된 파고보다 크게 나타났다.

(나) SWAN, FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 반폐쇄 내만에서의 설계파 실험

반폐쇄 내만에서의 설계파 실험을 수행하기 위하여 한국해양과학기술원 남해연구소 인근해역의 파랑변형 실험을 수행하였다. 심해에서부터 전파해오는 파랑은 SWAN을 이용하여 계산하였으며, SWAN으로부터 계산된 대표 파고, 주기, 파향을 FUNWAVE-TVD 모형의 입사파로 사용하였다. SWAN과 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 설계파 실험의 모의영역을 그림 3.2.19에 제시하였다.



그림 3.2.19 부산항 내측의 세 정점에서 관측치와 비교한 결과

SWAN 모형으로 설계파 모의실험을 할 때 남해연구소 인근 해역은 북서쪽으로 열려있는 만의 형태로 반차폐되어 있어 심해설계파(전해역 심해설계파 추정보고서 II, 2005)를 이용한 파랑전파 계산법 보다는 인근 해역의 설계풍속 및 지형, 수심을 고려하여 천해설계파랑을 산출하였다.

바람은 설계파 추산에 사용된 이상시 바람(태풍 및 계절풍)의 방향별 50년 빈도의 설계풍속을 사용하였다. SWAN을 이용한 수치실험은 항 주변의 지형과, 방파제의 방향 그리고 심해 설계파의 크기를 분석하여 5개 방향 (W - N) 에서 실시하였다.

SWAN 모형의 결과로부터 FUNWAVE-TVD 모형 계산영역의 경계에서 입사파의 유의파고, 첨두주기를 산정하였으며, 수심 11 m에 위치한 내부조파기를 이용하여 유의파고

0.85m, 첨두주기 3.8 s인 불규칙파를 입사하여 실험하였다.

FUNWAVE-TVD 모형의 내부조파 방법을 사용하기 위하여 모의 영역을 60° 회전하여 파랑변형 실험을 수행하였다. 내부조파기에서 형성되는 불규칙파 성분 중 최단파 성분의 재현을 위하여 $\Delta x = \Delta y = 0.4m$ 의 정방격자를 구성하였다.

FUNWAVE-TVD 모형의 수면변위 결과를 그림 3.2.20에 제시하였다. $t=400T_p$ s 이후 100 T_p s 동안의 수면변위를 이용한 유의파고 계산 결과를 그림 3.2.21에 제시하였다.

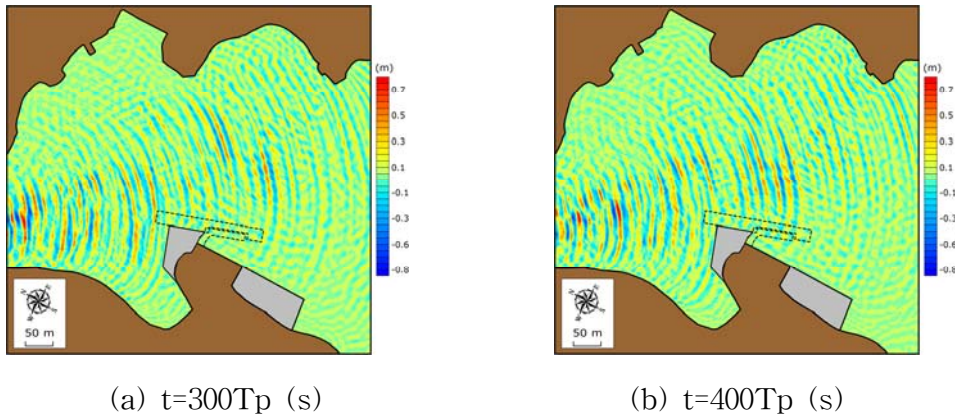


그림 3.2.20 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 불규칙파 모의 결과

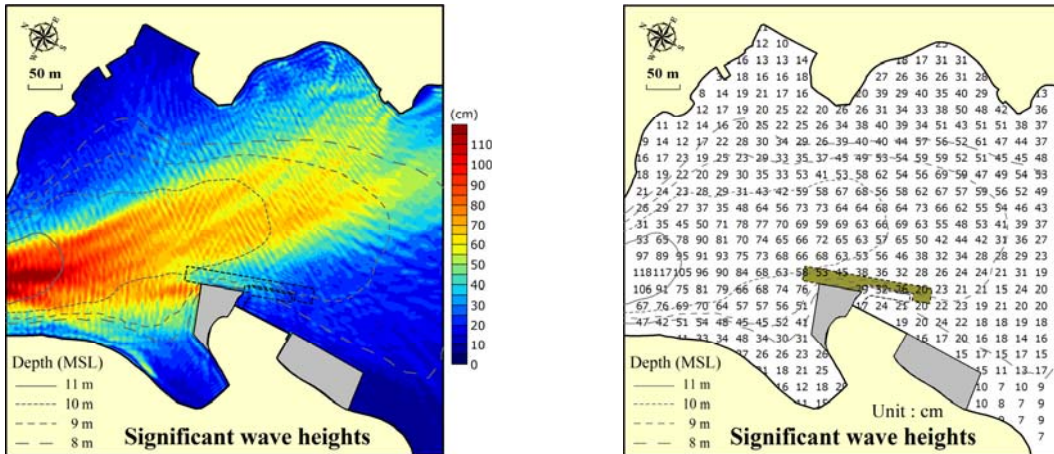
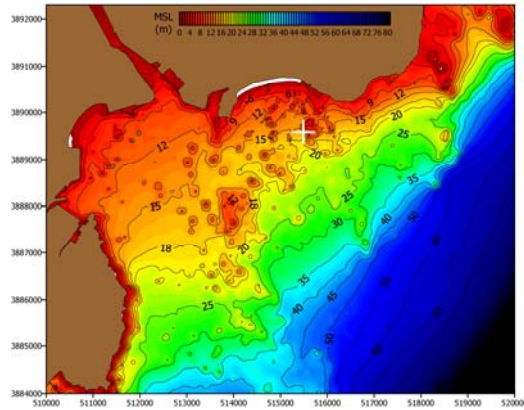


그림 3.2.21 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 유의파고 계산 결과

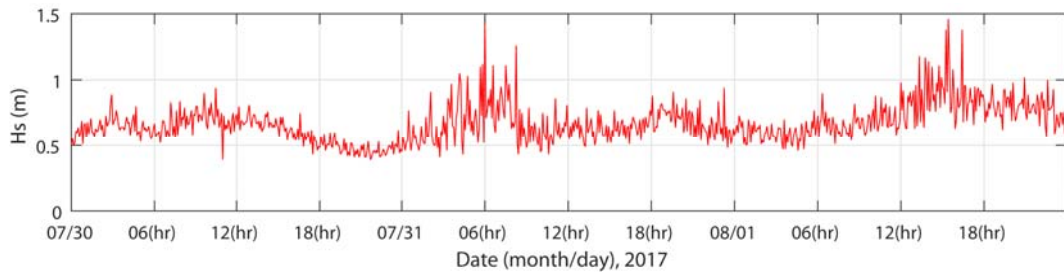
(다) FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 해운대 해역의 이안류 수치모의

부산 해운대 해역의 이안류 재현실험을 위하여 FUNWAVE-TVD 모형을 적용하였다.

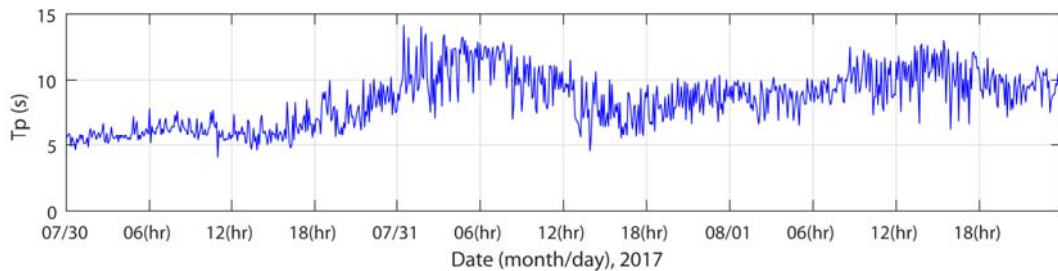
2017년 7월 31일 13시 11분경 해운대 해역에서 이안류가 발생한 바 있으며, 해운대 해역의 국립해양조사원 부이에서 관측되고 있는 파고, 주기의 관측치와 부이의 위치를 그림 3.2.22에 제시하였다. 해운대 관측 부이에서 7월 31일 13시 10분경 0.50 m의 유의파고와 6.13 s의 유의파주기, 194°의 파향이 관측되었다.



(a) 부이 위치 (+)



(b) 이안류가 발생했을 당시의 부이에서 관측된 유의파고 시계열



(c) 이안류가 발생했을 당시의 부이에서 관측된 유의파 주기 시계열

그림 3.2.22 부산 해운대 해역의 국립해양조사원 부이 위치와 관측치

그림 3.2.23과 표 3.2.4에 FUNWAVE-TVD 모형의 모의영역과 실험안을 제시하였다.

내부조파 방법을 이용하기 위해서는 수심이 대체적으로 일정해야 하기 때문에 모의영역을 50 m 수심 부근의 해역까지 확장하였으며, 지형을 220° 회전하여 수치실험을 수행하였다. 해운대 관측 부이에서 유의파고 0.50 m가 관측되었으므로 경계에서 입사파의 파고는 0.51 m로 고정시킨 후 주기와 파향에 따른 실험을 수행하였다.

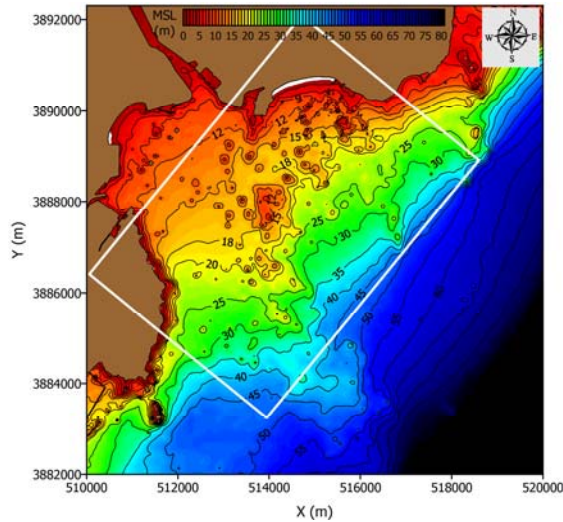


그림 3.2.23 FUNWAVE-TVD 모형의 계산영역(□)과 수심도

표 3.2.4 FUNWAVE-TVD 모형의 실험안

Significant wave height (m)	0.51
Peak wave period (s)	6, 8, 10, 13
Peak wave direction (deg)	170, 180, 190

$\Delta x = \Delta y = 1.5$ m를 사용하였으며, 최대 격자수는 22,453,310개를 사용하였다. 각 실험안마다 10,000 s까지 모의하였다. Wave breaking을 모의하기 위하여 $|\eta|/h > 0.8$ 을 만족하는 격자에서는 Boussinesq 방정식을 비선형 천수방정식으로 전환하여 비선형 천수방정식에 의한 breaking 현상을 모의하였다. 실험안 중에서 해운대 해역의 관측치와 가장 유사한 입사조건인 $H_s = 0.51$ m, $T_{peak} = 6$ s, $\theta_{peak} = 190^\circ$ 일 때의 유의파고 결과를 그림 3.2.24에 제시한다. 관측 부이 위치에서의 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 파고값은 0.51m이다.

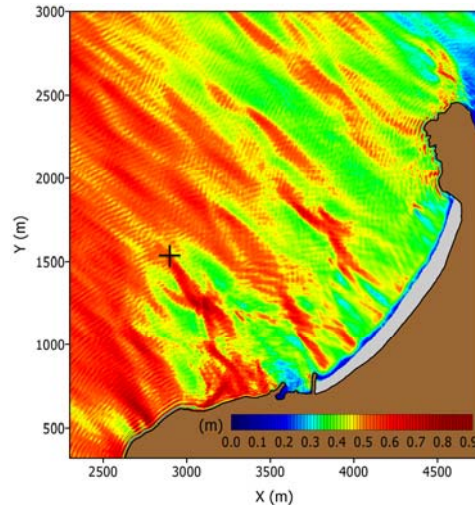


그림 3.2.24 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포

$$(H_s = 0.51 \text{ m}, T_{peak} = 6 \text{ s}, \theta_{peak} = 190^\circ)$$

각 실험안의 결과에서 wave-induced currents를 계산하기 위하여 FUNWAVE-TVD 모형에서 계산된 유속으로부터 $5T_p$ 동안의 유속 평균을 사용하였다. 실험결과 중에서 이안류 분포가 명확하게 나타나는 실험안은 $(T_{peak} = 6s, \theta_{peak} = 190^\circ)$, $(T_{peak} = 13s, \theta_{peak} = 190^\circ)$, $(T_{peak} = 6s, \theta_{peak} = 180^\circ)$, $(T_{peak} = 13s, \theta_{peak} = 180^\circ)$ 이며, 계산된 결과를 그림 3.2.25 - 3.2.28에 제시하였다. 각 실험결과의 이안류가 나타나는 구간에서 상대적으로 낮은 유의파고가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

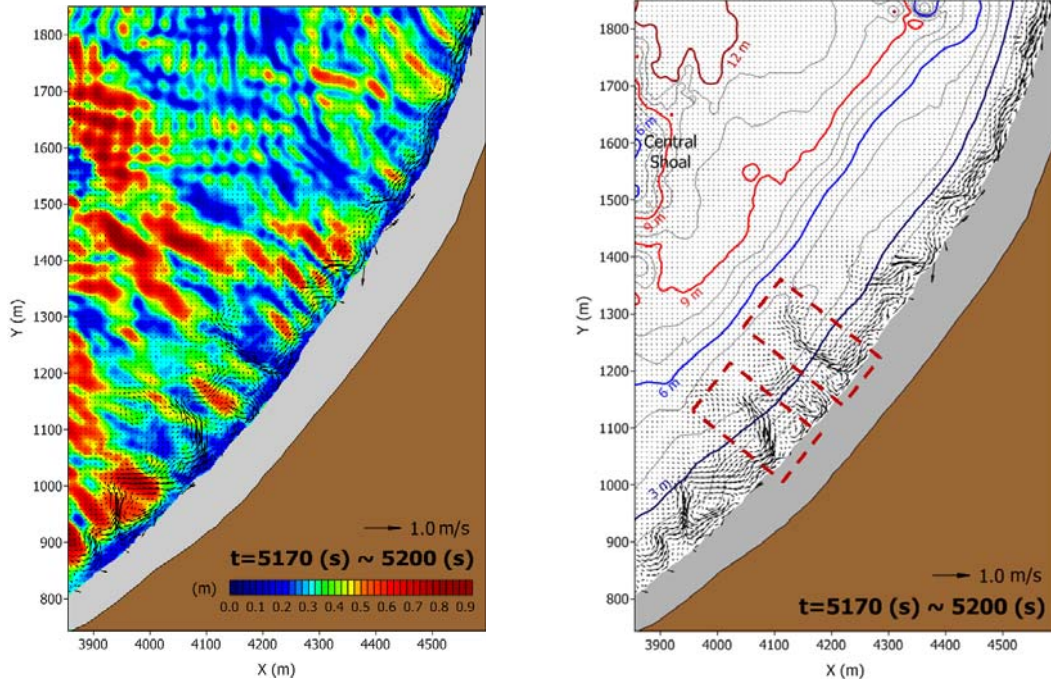


그림 3.2.25 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m$,

$$T_{peak} = 6s, \theta_{peak} = 190^\circ)$$

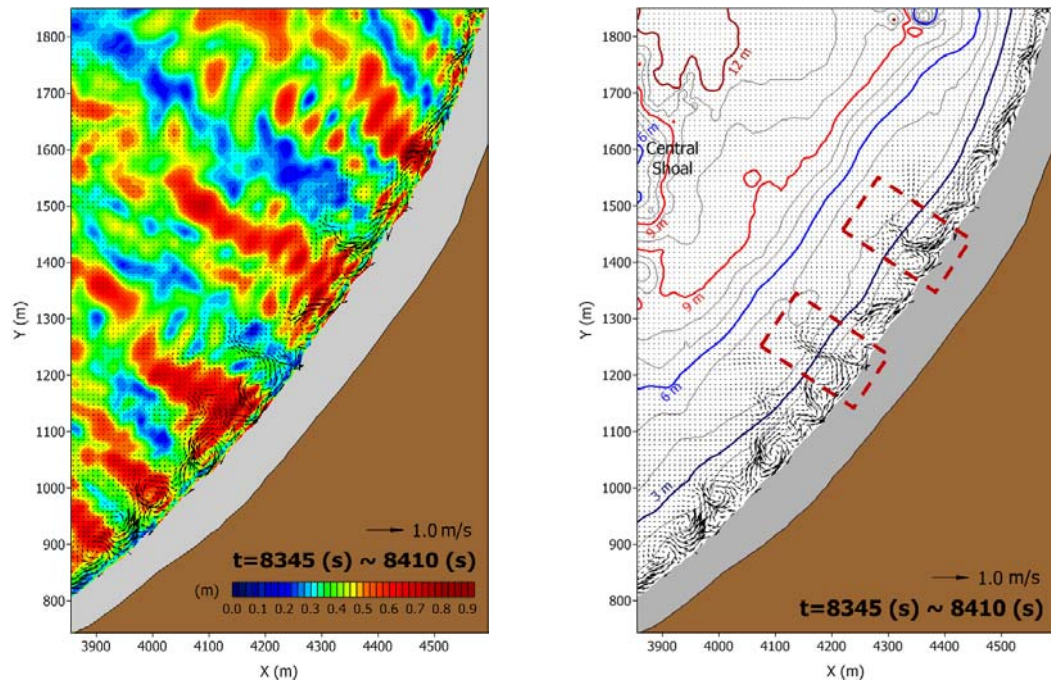


그림 3.2.26 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m$,

$$T_{peak} = 13s, \theta_{peak} = 190^\circ)$$

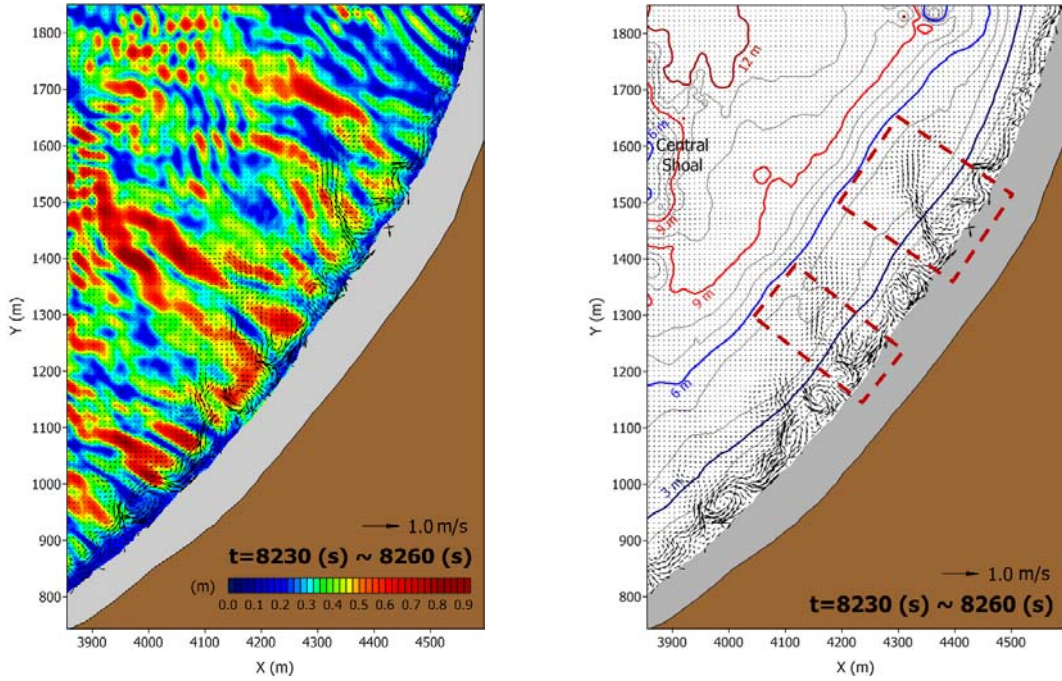


그림 3.2.27 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m$,

$$T_{peak} = 6s, \theta_{peak} = 180^\circ)$$

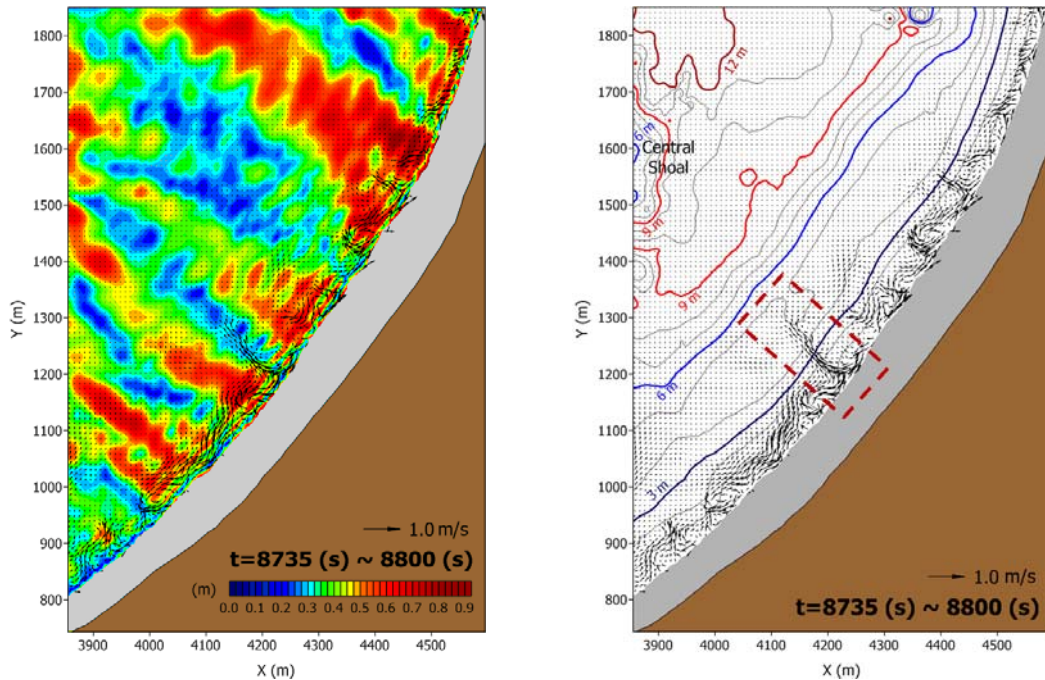


그림 3.2.28 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 유의파고 분포 (입사파 조건 : $H_s = 0.51m$,

$$T_{peak} = 13s, \theta_{peak} = 180^\circ)$$

(라) FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 제주 월정리 해역의 파랑 전파, 변형 및 연안류 모의

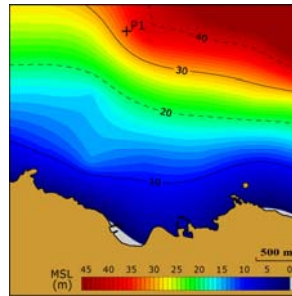
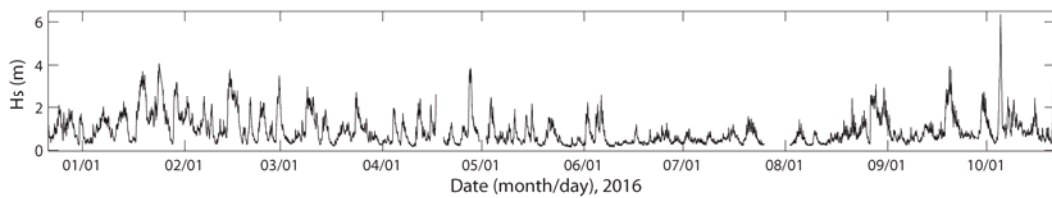
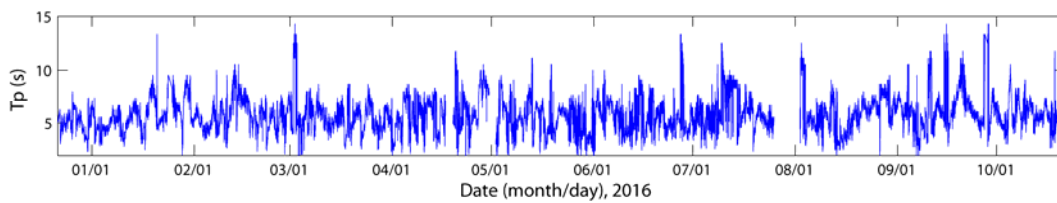


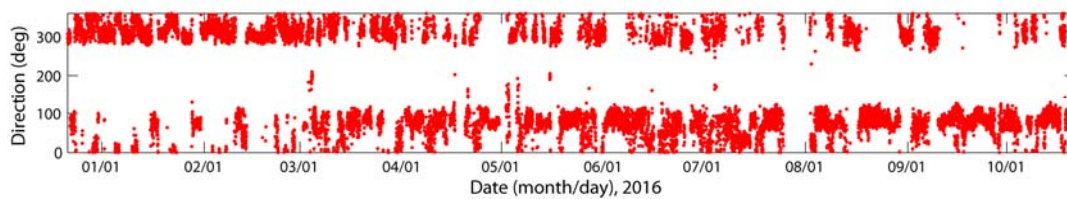
그림 3.2.29 제주 월정리 해역의 파고, 주기, 파향의 관측위치 (P1)



(a) 관측된 유의파고 시계열



(b) 관측된 첨두주기 시계열



(c) 관측된 첨두파향 시계열

그림 3.2.30 제주 월정리 해역 P1 지점에서의 파랑 관측치

FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 제주 월정리 해역의 파랑 전파 및 연안류 모의를 수행하였다. 2015년 12월 21일부터 제주 월정리 해안으로부터 3 km 외측 (P1 정점)에서 파랑 관측을 수행하였으며, 관측된 위치와 관측된 파고, 주기, 파향을 각각 그림 3.2.29와 3.2.30에 제시하였다. 최대 관측 유의파고는 태풍 차바가 온 시점인 2016년 10월 5일 4시 30분경 6.35 m가 관측되었으며, 이 때의 침두주기는 10 s 이다.

내부조파 방법을 사용하기 위하여 지형을 90° 회전하였으며, 입사파 경계에서 유의파고 2m, 침두주기 8s의 불규칙파를 입사파로 사용하였다. 그림 3.2.31과 3.2.32에 FUNWAVE-TVD 모형에 의하여 계산된 수면변위 결과와 유의파고 분포, 연안류 분포를 제시한다.

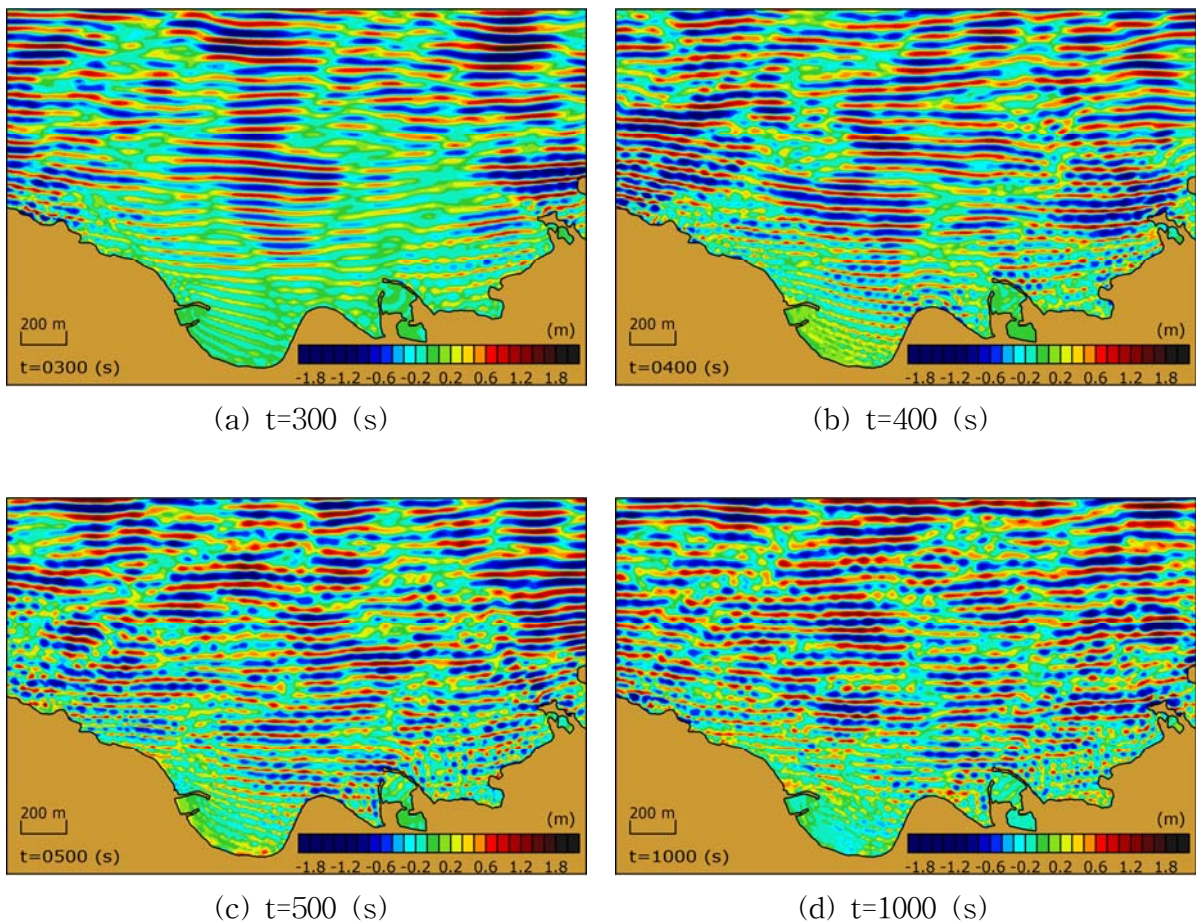
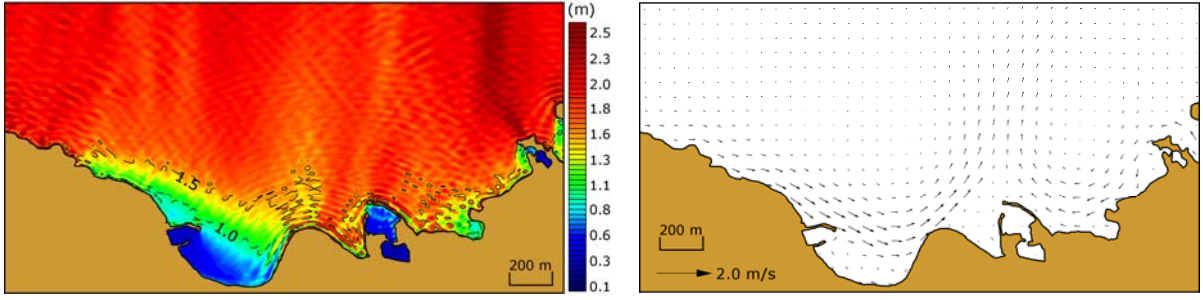


그림 3.2.31 제주 월정리 해역의 FUNWAVE-TVD 모형에 의한 수면변위 결과



(a) 유의파고 분포

(b) 연안류 분포

그림 3.2.32 FUNWAVE-TVD 모형을 이용하여 계산된 유의파고(좌)와 연안류(우)

나. 이동하는 대기압에 의하여 발생하는 파랑의 전파, 변형 모의

이동하는 대기압에 의하여 발생하는 파랑의 전파 및 변형 실험을 수행하기 위하여 shallow water equations (SWE)을 이용한 유한체적모형을 개발하였다. 유한체적기법을 사용할 때 flux항과 source항의 수치적인 불균형에 의한 수치진동 현상을 방지하기 위하여 Liang and Marche (2009)가 제안한 well-balanced method를 사용하였으며, well-balanced property를 만족시키기 위하여 flux항과 surface gradient 항을 정리하여 나타낸 SWE는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_a \quad (55)$$

여기서,

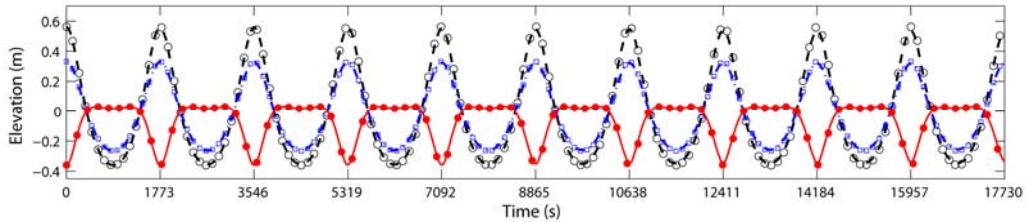
$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} \eta \\ Hu \\ Hv \end{Bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} Hu \\ Hu^2 + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) \\ Huv \end{Bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} Hv \\ Huv \\ Hv^2 + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) \end{Bmatrix}, \mathbf{S}_b = \begin{Bmatrix} 0 \\ g\eta h_x \\ g\eta h_y \end{Bmatrix}, \mathbf{S}_a = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{H}{\rho}(P_a)_x \\ -\frac{H}{\rho}(P_a)_y \end{Bmatrix}.$$

η 는 수면변위, h 는 수심, $H = \eta + h$ 이며, u , v 는 수심 평균된 유속을 의미한다. P_a , ρ 는 각각 대기압과 해수밀도를 나타낸다.

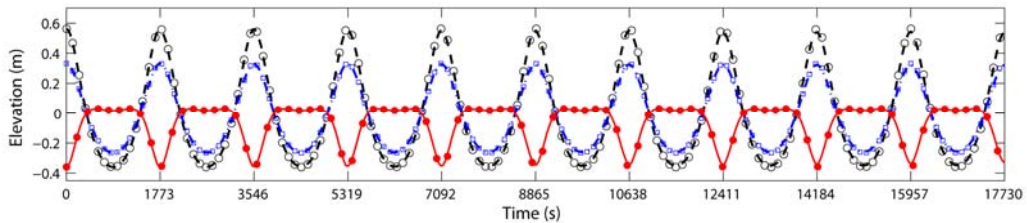
식 (55)의 flux항을 계산하기 위한 numerical flux는 Jiang and Shu (1996)의 5차 정확도의 WENO 기법과 HLL 기법 (Zhou et al., 2001)을 사용하여 계산하였다. \mathbf{S}_b 와 \mathbf{S}_a 항은

cell averaged finite volume method를 적용하여 수치이산화를 하였다. 시간 적분 방법으로 2차 정확도의 TVD Runge-Kutta 방법을 적용하였다 (Gottlieb and Shu, 1998). 개발된 SWE에 의한 유한체적모형을 검증하기 위하여 Thacker (1981)의 정확해와 비교하였으며, Synolakis(1986)의 고립파의 run-up 실험에 적용하여 실험관측치와 비교하였다. 또한 WENO 기법에 의한 결과를 비교하기 위하여 MC limiter (van Leer, 1977), minmod limiter (LeVeque, 2004)를 이용한 2차 정확도의 TVD-MUSCL 기법과 비교하였다.

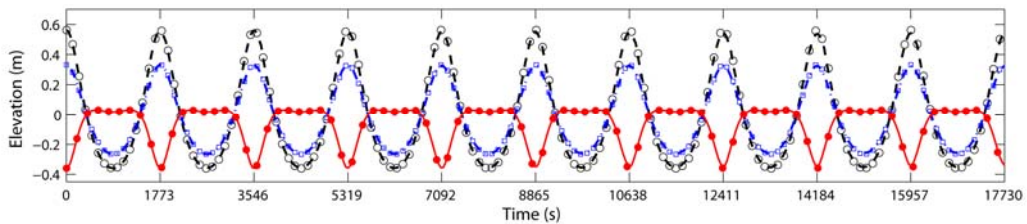
Thacker의 정확해는 식 (53), (54)와 같고, 초기조건은 그림 3.2.11과 같다. 그림 3.2.33에 $(x, y) = (0, 0)$, $(x, y) = (1000, 0)$, $(x, y) = (2000, 0)$ 에서 Thacker의 정확해와 수치해를 비교하였다.



(a) Second order TVD-MUSCL with minmod limiter



(b) Second order TVD-MUSCL with MC limiter



(c) Fifth order WENO

그림 3.2.33 Shock capturing scheme을 이용한 shallow water equations 결과와 Thacker의 정확해와 비교(--: $(x, y) = (0, 0)$, --: $(x, y) = (1000, 0)$, --: $(x, y) = (2000, 0)$)

그림 3.2.39에 제시된 바와 같이 개발된 shallow water equations 모형은 Thacker의 정확해와 잘 일치하는 것을 보였다.

다음으로 고립파의 run-up 실험을 수행하여 Synolakis (1986)의 실험 관측치와 비교하였다. 초기조건은 식 (56)과 같다.

$$\eta(x,0) = \frac{H}{h} \operatorname{sech}^2 \sqrt{\frac{3H}{4h}} (x - X_1), \quad u(x,0) = -\eta(x,0) \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (56)$$

여기서, H , X_1 은 각각 파고와 고립파의 초기 위치를 나타낸다. $X_0 = x/h = 19.85$, $X_1 = X_0 + L$ 이며, L 은 다음과 같이 주어진다.

$$L = \sqrt{\frac{4h}{3H}} \cosh^{-1} \left(\sqrt{\frac{1}{0.05}} \right) \quad (57)$$

그림 3.2.34에 Synolakis (1986)의 실험 관측치와 WENO 기법을 사용한 개발된 모형의 수치해를 비교하였다. 현재 수립된 shallow water equations 모형에서는 고차의 분산항이 없으므로 $t\sqrt{g/h} = 15, 20$ 일 때 수치해의 결과와 관측치의 차이가 나타난다. 그 외의 결과에서는 수치해와 관측치의 결과가 잘 일치함을 보인다.

이동하는 대기압에 의하여 발생하는 파랑의 전파, 변형 모의를 위하여 식 (55)에서 다음과 같은 대기압 성분을 고려하였다 (An et al., 2012).

$$P_a = \Delta P \exp \left[-\frac{(x - x_0 - Ut)^2 + y^2}{R^2} \right] \quad (58)$$

여기서, ΔP 는 대기압의 크기, U , x_0 , R 는 각각 대기압의 이동속도와 초기 위치, 반경 (effective radius)을 의미한다. 본 연구에서는 경사진 지형에서 대기압에 의하여 발생하는 파랑의 run-up을 보기 위하여 수심 $h = (1/400)x$ 로 하였다. 첫 번째 실험으로 shock capturing scheme에 의한 결과를 비교하기 위하여 $\Delta P = -20$ hPa $R = 200$ km, $U = -50$ m/s, $x_0 = 1000$ km를 사용하였다. $\Delta x = \Delta y = 2500$ m의 격자 간격을 사용하였다.

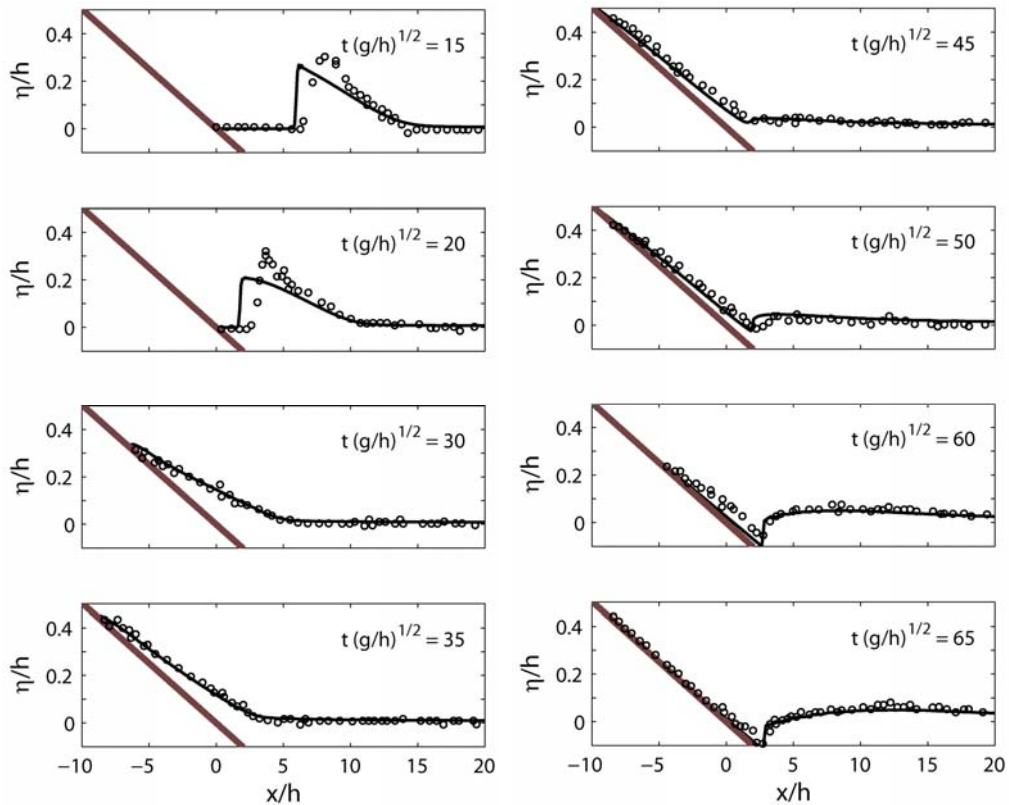
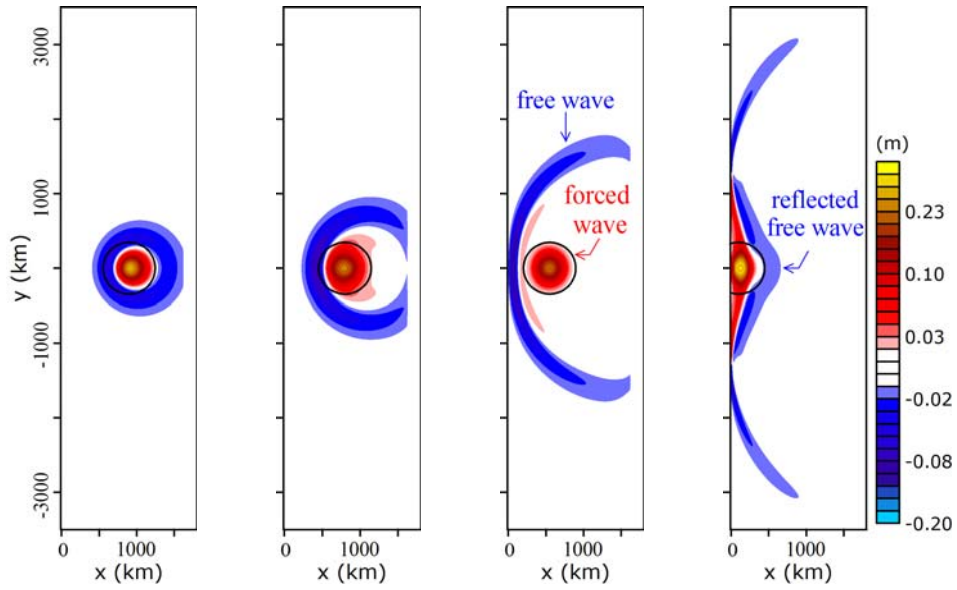


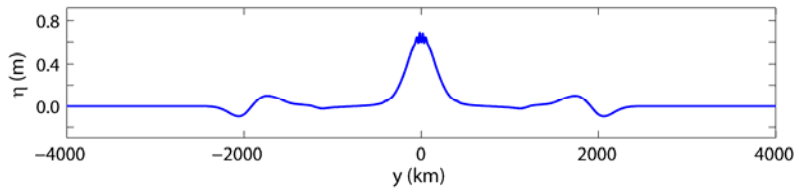
그림 3.234 고립파의 Run-up과 run-down 실험 ($H/h=0.3$, 1:19.85 경사도, -:수치해, o:실험 관측치(Synolakis, 1986))

x_0 에서 Froude number($F_r = U/\sqrt{gh}$)는 0.32이며, \sqrt{gh} 의 속도인 free wave는 U 의 속도로 전파하는 forced wave 보다 빨리 전파하게 되어 free wave와 forced wave가 완벽히 분리되는 현상이 나타난다. 또한 forced wave의 경우 해안으로 접근함에 따라 F_r 이 커지게 됨에 따라 Proudman resonance에 의하여 증폭이 나타난다. 전반적인 파랑의 전파 변형 과정을 그림 3.235에 나타내었다. 그림 3.236에는 $x=2500$ m를 통과하는 파랑의 단면을 각 기법에 따라 비교하였다. MC limiter를 사용한 TVD-MUSCL 기법에서 수치진동 현상이 심하게 나타났으며, WENO 기법에서 가장 안정적인 결과가 나타났다.

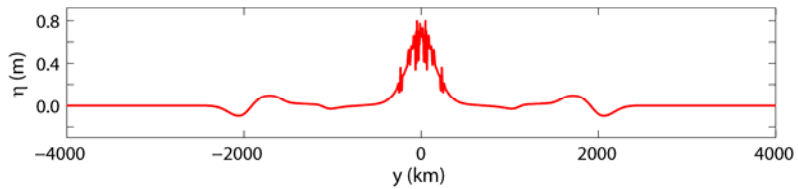


(a) $t=33.3$ min (b) $t=66.7$ min (c) $t=150.1$ min (d) $t=300$ min

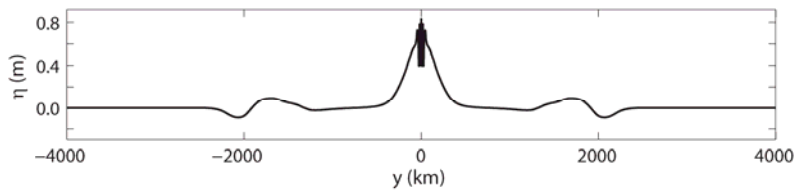
그림 3.2.35 Forced wave와 free wave의 전파, 변형 과정



(a) WENO



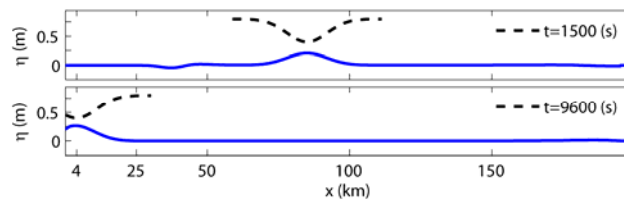
(b) Second order TVD-MUSCL with MC limiter



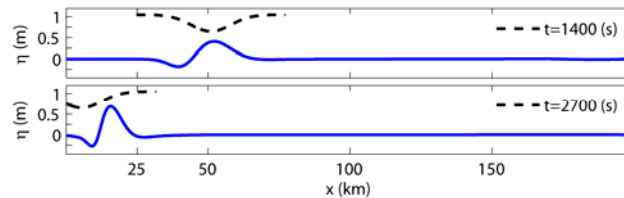
(c) Second order TVD-MUSCL with minmod limiter

그림 3.2.36 $x = 2500$ m를 통과하는 파랑의 단면 비교

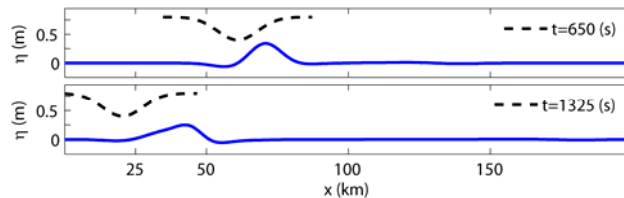
WENO 기법을 이용하여 경사면에서 이동하는 대기압에 의하여 전파하는 파랑의 run-up을 검토하였다. $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ 의 격자간격을 사용하였으며, $x_0 = 100\text{m}$, 대기압의 이동속도 $U = -10, -35, -60\text{m/s}$ 에 따른 결과를 비교하였다. 이동속도에 따라 Froude number는 각각 0.20, 0.71, 1.21에 해당한다. 그림 3.2.37에 각 이동속도에 따른 파랑의 전파 양상을 나타내었다.



(a) $U = -10$ (m/s)



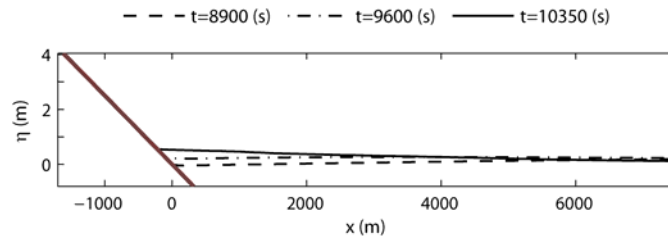
(b) $U = -35$ (m/s)



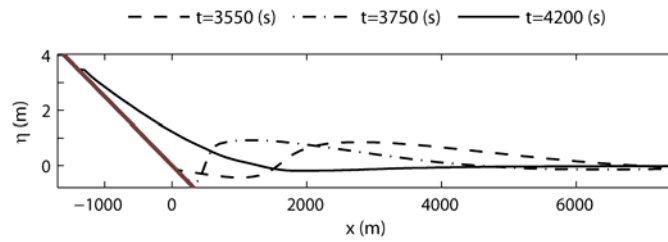
(c) $U = -60$ (m/s)

그림 3.2.37 $h = (1/400)x$ 경사수심에서 대기압의 이동속도에 따른 파랑의 전파 변형과정 비교

그림 3.2.37에서 $U = -10$ m/s일 때 forced wave는 $x = 4.08$ km에서 Proudman resonance에 의하여 증폭이 나타나며, $U = -35$ m/s일 때는 $x = 49.97$ km에서 Proudman resonance에 의하여 파랑이 증폭되어 증폭된 파랑이 연안으로 전파하게 된다. $U = -60$ m/s일 경우에는 x_0 에서 Froude number는 1보다 크기 때문에 Proudman resonance는 발생하지 않는다. 그림 3.2.38에 $U = -10, -35$ m/s 일 때 증폭된 파랑에 의한 run-up을 비교하였다. $U = -10$ m/s 일 때보다 파랑의 증폭이 더 크게 형성된 $U = -35$ m/s일 때 run-up이 더 크게 나타난다.



(a) $U=-10$ m/s



(b) $U=-35$ m/s

그림 3.2.38 증폭된 파랑의 run-up 비교

x_0 에서 Froude number에 따른 최대 run-up을 그림 3.2.39에 비교하였다. 최대 run-up이 3.3 m 보다 높게 나타나는 Froude number는 0.65, 0.70, 0.75인데, 각각 Proudman resonance가 나타나는 지점은 $x=42.25, 49.0, 56.25$ km에 해당된다. 이 지점들은 대기압의 초기 위치인 $x_0=100$ km의 대략 반에 해당되는 위치로 각 지점에서 Proudman resonance에 의하여 증폭된 파랑이 amplification factor가 1보다 큰 지역을 전파하면서 더욱 증폭되었으며, 경사면에서는 쇄파되면서 run-up이 크게 나타난 것으로 판단된다.

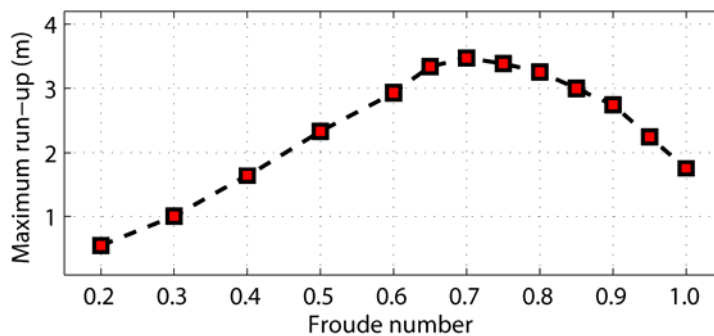


그림 3.2.39 Froude number에 따른 최대 run-up 비교

2. 파랑 및 폭풍 해일 장기예측

가. 파랑 장기예측

지구 온난화에 의한 기후변화로 인해 기후 시스템을 이루는 모든 구성요소가 변화하여 자연재해의 위험도가 증가하고 있다. IPCC 보고서에 따르면 지구 표면 온도는 21세기 전반에 걸쳐 상승할 것으로 전망되고 있으며 많은 지역에서 폭염의 발생 빈도와 지속 기간뿐만 아니라 극한 강수 현상의 발생 빈도 및 강도도 증가할 것으로 예상하고 있다. 또한 해양에서도 온난화가 지속되고 전지구 평균 해수면 높이는 계속해서 상승할 것이다.

기후변화에 따른 미래 파랑 전망에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나 다른 요소에 비해 그리 활발하지 못하고 있다. 이는 기후모델에서 생성되는 해상풍의 격자크기가 실제 해상풍의 충분하지 못하여 관측자료에 비해 저평가되는 경향이 있어 미래의 파랑을 제대로 모의하지 못하고 있기 때문이다. 특히 파랑에 의한 재해 위험도를 평가하기 위해서는 파랑의 극치를 정확히 모의할 수 있는 산출체제를 구축하여야 한다. 본 연구에서는 미래의 파랑을 장기예측하기 위한 수단으로 과거의 기상자료를 정밀분석한 기상모델자료를 활용하여 파랑을 수치모의하고 파랑의 장기적인 경향성을 분석하여 미래의 파랑에 의한 위험도의 상승 경향을 파악하고자 하였다.

(1) 과거 기상자료의 생산

파랑은 주로 해상풍 등의 기상조건과 수심 등의 지형조건에 의해 결정된다. 수치모델에 의한 파랑 산출을 위해서는 기본적으로 기상자료가 필요하며, 이 중에서 가장 영향을 크게 미치는 요소는 해상풍이다. 정확한 파랑을 산출하기 위해서는 정밀한 해상풍 자료가 필요하며, 파랑의 장기적인 경향성을 파악하기 위해 장기간의 파랑 산출자료가 요구되므로 장기간의 기상 자료가 필요하다. ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 중규모 유럽 기상예보센터), NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration, 미국 해양대기청), JMA(Japan Meteorological Agency, 일본기상청) 등 전 세계 기상관련기관에서는 과거 기상 조건들을 재분석하여 전 지구 재분석 기상자료를 제공한다. 본 연구에서는 이들 기관에서 제공하고 있는 기상모델 자료를 수집하였으며, ECMWF 자료는 그 중에서 가장 신뢰성이 높은 것으로 평가되고 있어 정밀기상자료 생산을 위한 입력자료로 ECMWF 자료를 사용하였다.

우리나라의 경우 해안 구조물에 대한 피해, 해안선 변형 등 파랑에 의한 재해는 주로 태풍에 의해 발생한다. 따라서 태풍에 대한 정밀 파랑분석이 무엇보다도 중요하며 이와 더불어 태풍에 의한 및 해상풍을 정확히 산출하는 것이 요구된다. 수치모델의 기능향상과 전산기기의 속도향상과 더불어 기상모델의 성능은 발전해 왔지만, 공간변화의 규모가 작고 변화가 심한 태풍의 경우 10 km 이상의 공간 해상도의 기상모델의 결과로는 태풍시 해상풍을 정확하게 재현하기 어렵다.

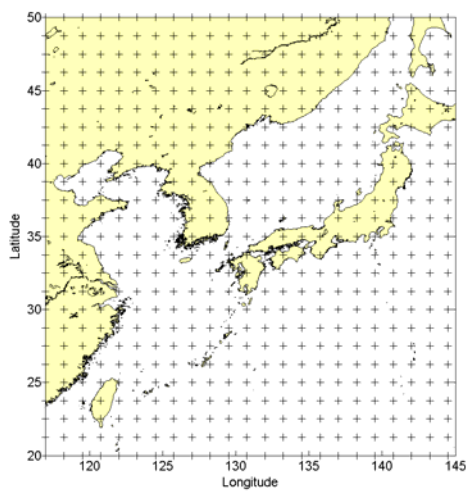
태풍은 일반적인 온대성 저기압 및 고기압과는 달리 해면기압과 바람의 분포가 중심부근에서 변화가 크므로 실제 관측된 기상자료를 얻기 힘든 해상지역을 태풍이 이동할 때는 기상모델에서 태풍 중심 부근의 기압 및 해상풍을 구하는 것은 큰 오차를 낼 수 있다. 이러한 태풍 중심역에서의 기압분포에 대한 추산오차를 줄이기 위해 태풍영향권내의 등압선을 동심원으로 가정하여 태풍의 기압분포를 몇 개의 파라미터(중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 등)로 표시하는 태풍 기압분포모형이 여러 형태로 제시되어 왔다. 일반적으로 가장 널리 사용되는 태풍 기압장 모델은 태풍중심 부근의 임의의 위치에서의 해면기압을 태풍 파라미터와 태풍 중심과의 거리의 함수로 나타낸다. 이러한 방법은 태풍중심권에서의 급격한 풍속 변화를 나타내는 데 유효한 방법인 반면에, 일반 기상모델은 태풍 부근의 정밀한 공간적 변화를 잘 나타내지 못하지만, 태풍 영향권 밖의 해상풍 추산에는 유효한 방법이라 할 수 있다. 두 가지 산출 방법을 복합하여 태풍 주위에서는 태풍 파라미터에 의한 태풍 모델로 계산한 것을 더 큰 비중을 두어 고려하고 태풍 주변의 기압과 해상풍은 일반 기상모델의 결과를 이용하는 방법으로 파랑모델의 입력자료를 산출하였다.

(가) 전지구 기상모델자료

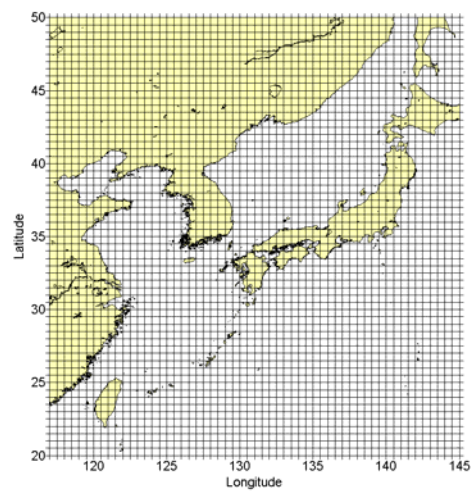
현재 ECMWF, NOAA, JMA의 홈페이지에서는 자료동화기법을 적용하여 수치기상모델에 의한 과거 전지구 기상자료를 산출한 결과를 공개하고 있으며, 공개된 자료보다 더 해상도가 높은 자료에 대해서는 유료로 제공하고 있다. 해상도와 신뢰도 등을 고려하였을 때 ECMWF의 자료가 파랑 산출에 적합하므로 심해설계과 산출이나 장기파랑 산출에 ECMWF의 기상자료를 사용되어 왔다.

ECMWF 바람자료는 1일 4회, 매 6시간 간격으로 00Z, 06Z, 12Z, 18Z에 대하여 지상 10m에서의 바람벡터의 동서성분과 남북성분으로 구성되어 있다. ECMWF Reanalysis 자료는 예보모델을 기반으로 관측자료를 자료동화하여 산출된 자료이며, 예보모델의 해상도

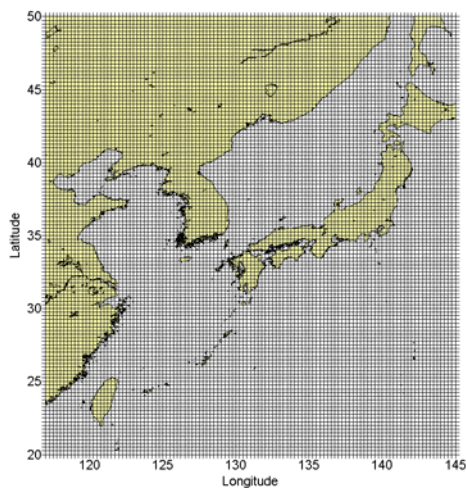
가 계속 향상되므로 해상도가 생산년도에 따라 상이하다. 반면에 ERA-Interim 자료는 특별한 목적으로 일시적으로 생산된 자료로 사용한 모델과 해상도가 같은 장점이 있으나, 장기간의 분석을 일정기간 내에 수행해야 하므로 현재 산출되는 모델의 해상도보다 떨어지는 단점이 있다. 그림 3.2.40에 본 연구에서 사용한 ECMWF 바람자료의 격자점을 나타내었으며, 표 3.2.5에는 본 연구에서 사용한 자료의 년도별 격자 해상도를 비교하여 나타내었다.



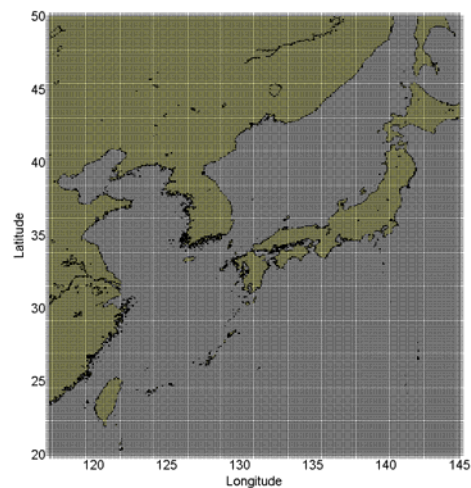
(a) 1.125도 격자간격



(b) 0.56125도 격자간격



(c) 0.25도 격자간격



(d) 0.125도 격자간격

그림 3.2.40 기간에 따른 ECMWF 자료의 격자망

표 3.2.5 ECMWF 재분석 자료의 기간별 해상도

순번	ECMWF Interim		ECMWF Reanalysis	
	기간	해상도	기간	해상도
1	1979.01 ~ 2013.12	0.75°	1979.01 ~ 1993.12	1.125°
2	-	-	1994.01 ~ 2000.12	0.5625°
3	-	-	2001.01 ~ 2006.02	0.3515°
4	-	-	2006.03 ~ 2012.01	0.250°
5	-	-	2012.02 ~ 2013.12	0.125°

최근에는 공간 해상도의 향상으로 공간적 태풍 재현에는 정확도가 향상되었지만, 과거의 해상도가 낮은 기상모델의 결과는 태풍 강도를 제대로 나타내지 못하고 있다. 태풍의 강도는 태풍의 중심기압에 의해 결정된다고 볼 수 있으므로 태풍 중심기압이 수치기상모델에서 잘 재현되는지를 검토함으로써 기상모델에 의한 태풍의 재현성을 검증해 볼 수 있다.

그림 3.2.41은 수치기상모델에서 나타난 태풍 중심기압과 일본기상청 태풍파라미터자료(RSMC)의 태풍 중심기압의 자료를 비교한 것이며, 수치기상모델의 해상도에 따라 수치기상모델의 태풍 중심기압이 일본기상청 태풍파라미터자료의 태풍 중심기압과의 차이가 다르게 나타남을 보여 주고 있다. 즉 태풍 강도가 큰 경우(RSMC의 중심기압이 작은 경우)일수록 해상도의 영향이 크게 나타나며, 수치기상모델과 태풍파라미터의 차이가 격자간격이 클수록 크게 나타난다. 이는 해상도가 낮을수록(격자간격이 클수록) 수치기상모델에서 태풍강도를 제대로 표현하지 못한다는 것을 보여주는 것이다. 아직까지는 수치기상모델의 기상자료가 태풍을 표현할 수 있을 만큼 해상도가 충분하지 않기 때문에 태풍시에는 별도의 태풍해상풍 모델이 요구된다.

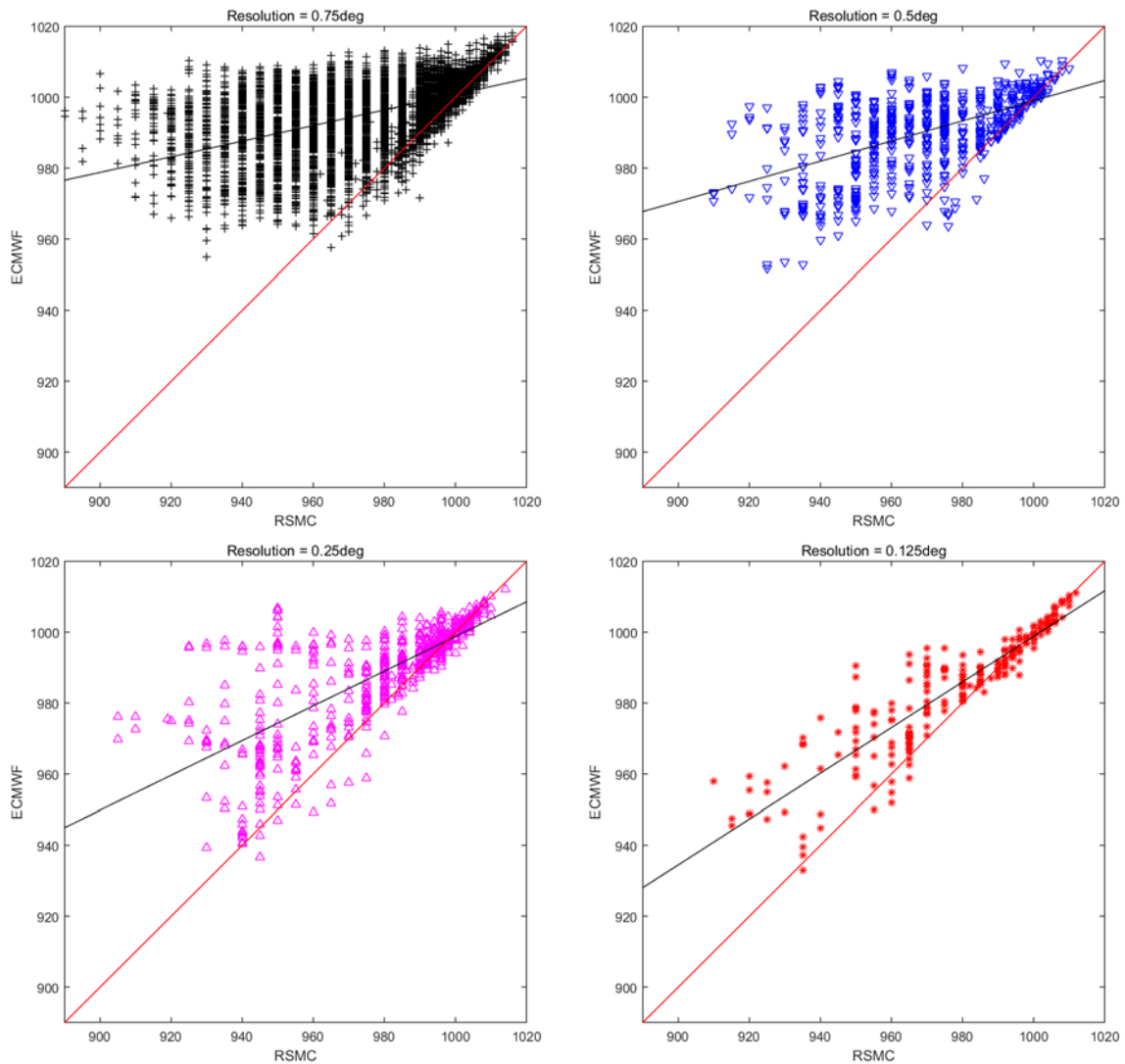


그림 3.2.41 일본기상청 태풍자료(RSMC)와 수치기상모델(ECMWF)의 태풍중심기압의 비교

수치기상모델 자료는 태풍과 같이 태풍중심 부근에서 기압과 풍속의 변화가 큰 경우에 대해서는 해상도에 따라 정확도의 차이가 크게 나타나고 있다. 그러나 비태풍의 경우에는 태풍과는 달리 그 규모가 수백km 이상인 경우가 대부분이어서 해상도의 영향을 크게 받지 않는다. 그러나 봄철이나 가을철에 발생하는 온대성 저기압은 규모가 비교적 작고 서해 또는 동해로 진입하면서 갑작스럽게 발달하면서 파랑이 크게 발생하는 경우가 있다. 이러한 경우에는 온대성 저기압 부근에서 기압경도력이 크고 풍속의 변화가 커서 낮은

해상도의 기상자료로 파랑모델의 입력자료로 사용하는 것은 오차를 발생시킬 수 있다.

해상도가 높은 기상자료를 산출하기 위해서는 격자간격과 시간간격을 줄여 기상모델을 실행(downscaling)하여야 하는 데, 이 때 신뢰성있는 결과를 산출하기 위해서는 자료동화가 반드시 필요하다. 위성관측기술이 계속 발전됨에 따라 위성관측자료의 질적인 향상과 양적인 증가가 지속적으로 이루어져 왔기 때문에 최근에는 수km의 해상도까지 수치모델의 downscaling이 가능하나 오래된 과거일수록 관측자료가 충분하지 않기 때문에 해상도를 높이는 데 한계가 있으며 신뢰도도 떨어질 수밖에 없다.

현재 신뢰도가 인정되고 있는 수치기상 모델자료는 ECMWF, NOAA, JMA 등이 생산하고 있는 전지구 모델자료가 있으며, 그 중에서도 ECMWF 모델자료가 가장 우수한 것으로 평가받고 있다. ECMWF Reanalysis 자료는 앞에서 기술한 바와 같이 여러 해상도의 자료가 섞여 있어 1979년 이후 35년간의 기후변화 등을 분석하기에는 적절하지 않다. ECMWF Interim 자료는 0.75도 격자간격으로 다소 해상도가 떨어지기는 하지만, 단일 격자체계와 단일 모델에 의한 35년간의 장기간 수치모델자료로 의미가 크다. ECMWF Interim자료의 35년간 년 최대풍속의 변화는 비교적 작게 예측되었으나, ECMWF Reanalysis 자료에 의한 년 최대풍속의 년변화는 비교적 큰 것으로 파악되었다(표 3.2.7). 이는 해상도가 높을수록 공간적인 풍속의 변화를 더 잘 표현할 수 있기 때문에 년 최대풍속이 더 크게 나타나는 영향을 받은 것으로 생각된다. 하지만 현실적으로 관측자료가 충분치 못한 과거에 대해서는 자료동화 기법에 의한 수치기상모델의 해상도를 높이는 데 한계가 있다.

표 3.2.6 해역별 격자점에서의 기상모델 자료에 따른 년최대풍속의 년변화율

해역	격자번호	년 최대풍속의 연간 변화율 ($\frac{m/sec}{year}$)	
		ECMWF Interim	ECMWF Reanalysis
서해	106196	0.0335	0.1114
	106179	0.0164	0.0609
남해	127169	0.0166	0.0800
	144178	-0.0332	0.1027
동해	154197	-0.0385	0.0201
	156211	-0.0342	-0.0696

(나) 정밀 기상자료의 생산

ECMWF의 기상자료의 신뢰성은 전세계적으로 검증이 이루어져 왔으나, 우리나라에서는 해상에서의 관측자료가 많지 않아 제대로 검증되지 않은 상태로 ECMWF 기상자료를 사용해 왔다. 그러나 최근 들어 기상청의 해양기상부이가 지속적으로 확대 설치됨에 따라 ECMWF 기상자료를 검증할 수 있는 자료가 어느 정도 확보되어 있다고 할 수 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 기상모델의 해상도에 높아질수록 태풍 등의 재현성이 향상되므로 정밀한 과량산출을 위해서는 해상도가 높은 기상모델 자료가 요구되고 있다. 그러나 전지구를 해상도가 높은 모델을 수행하는 것은 슈퍼컴퓨터를 사용해야 가능한 일이므로, 원하는 영역에 대해서만 해상도를 높은 지역 기상모델을 수행하게 된다. 기상현상은 전지구적으로 서로 연동되어 있기 때문에 지역 기상모델을 수행하기 위해서는 경계조건으로 전지구 모델결과가 필요하다. 이와 같이 전지구 모델자료를 경계조건으로 지역 기상모델을 사용하여 더 높은 해상도의 기상자료를 생산하는 것을 downscaling이라고 한다.

앞에서 언급한 전지구 자료동화 재분석 자료인 ECMWF ERA-Interim 자료를 경계조건으로 이용하여, WRF모델을 사용하여 우리나라 주변 해역에 대하여 10km 격자의 해상도로 역학적 규모축소법(dynamical downscaling)을 수행하였다 (그림 3.2.42, 표 3.2.7). 한반도 주변에서의 보다 상세한 과거의 기상상태 재현을 위해서는 전지구 재분석자료를 지역 모형의 경계 자료로 활용하여 지역 규모의 상세한 기후를 추정할 필요가 있다. 이를 위해서는 전지구 재분석 자료부터 지역 모형의 초기/경계조건에 적용되는 역학적 규모축소법을 사용하였다. 지역 모형을 사용한 역학적 규모축소법의 적용은 일반적인 전지구 재분석 자료의 시간 간격이 6시간인데 반해 원하는 시간 간격으로 자료를 생산할 수 있다는 장점도 있다.

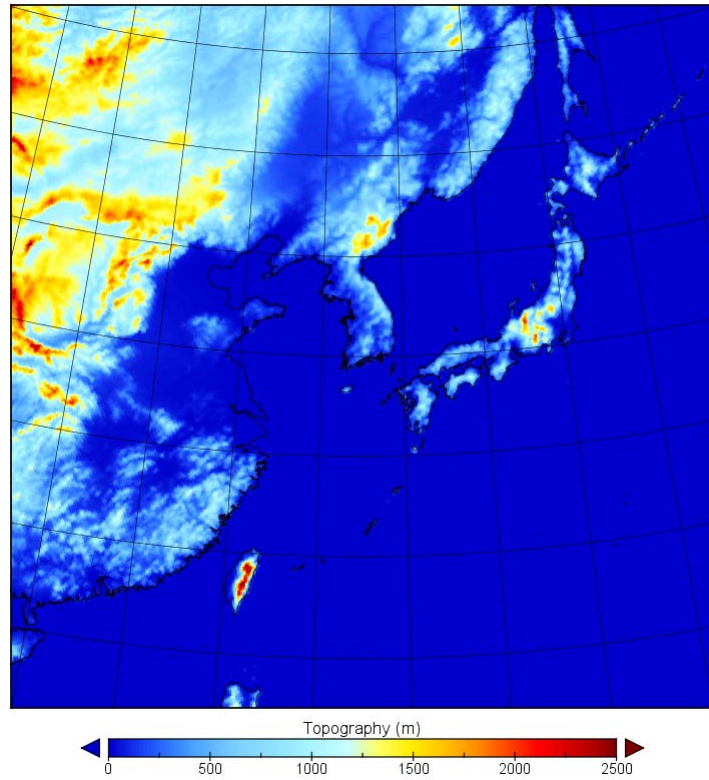


그림 3.2.42 10km 해상도의 자료 생산 영역 및 지형 고도(m)

표 3.2.7 역학적 규모축소법에 사용된 WRF 모델의 개요

수평 해상도	10 km
수평 격자 수	436 x 436
연직 층수	60
적운 모수화 방법	Kain-Fritsch
미세물리 과정	WSM6
복사과정	RRTM/Dudhia
육상 모델	Noah LSM
경계층 모수화 방법	YSU Scheme
초기/경계자료	ERA-Interim
자료 생산 기간	1979~2016

해양모델의 입력자료를 생산하기 위해 해양기상 예측모델인 WRF모델에 의한 기상입력자료 산출시스템을 기반으로 하여, 10km 해상도로 높이고 3DVAR(3D Variational Data Assimilation) 자료동화 시스템을 사용하여 매 6시간마다 가용한 모든 관측자료를 적용함으로써 파랑 산출에 적합한 시스템으로 개선하였다(그림 3.2.43, 그림 3.2.44). 초기/경계자료로는 ECMWF에서 1979년부터 매 6시간 간격으로 0.75도의 공간해상도로 생산된 전지구 재분석 자료인 ERA-Interim 자료를 경계조건으로 사용하였으며, 파랑 모델의 격자간격(1/12도)와 유사한 10km 간격의 격자에서 매 1시간 간격으로 기상모델결과를 생산하였다.

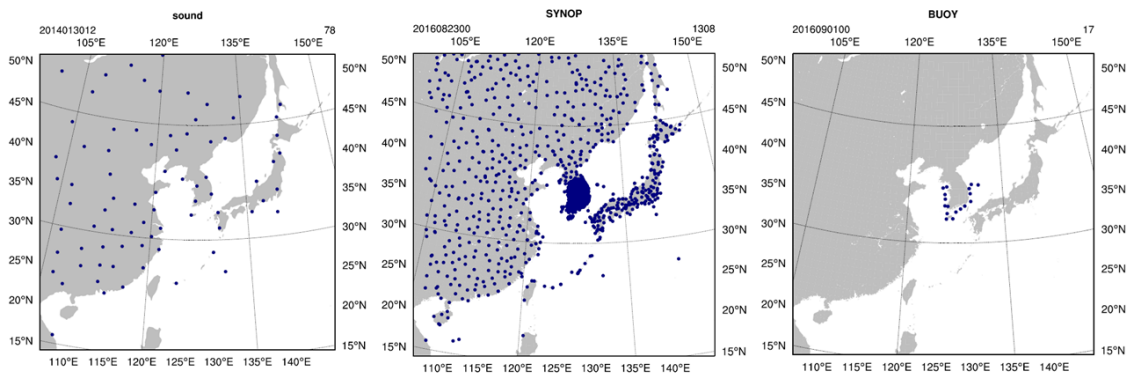


그림 3.2.43 자료동화에 사용된 지상관측자료 station 위치 예. 고층기상관측(좌), 지상기상관측(중간), 부이 기상관측(우)

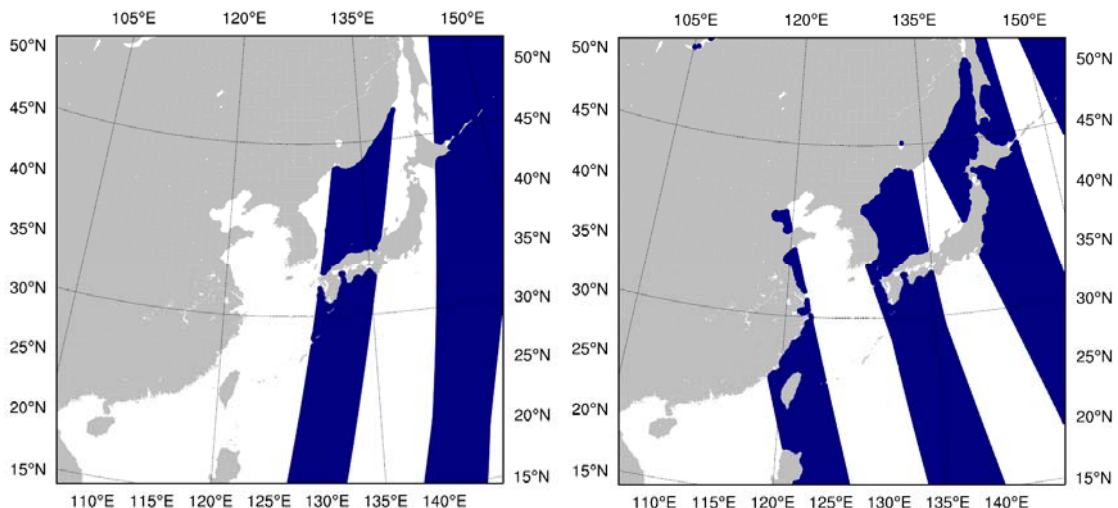


그림 3.2.44 자료동화에 사용된 12.5 km 해상도의 ASCAT 위성 해상풍 관측지점. 낮시간(좌), 밤시간(우). 각각 약 40,000여개의 관측자료가 사용됨.

3DVAR 자료동화 시스템은 모델에서 발생할 수 있는 오차를 줄여주는 기법 중의 하나로써 역학적 규모축소법을 적용하여 과거의 상세 기후를 재현할 때 반드시 필요한 방법이다. 자료동화란 현재의 대기상태를 설명하기 위해서 지구상의 유용한 모든 기상관측자료를 사용하여 최적의 수치모델 초기자료를 생성하는 과정을 말한다. 아무리 완벽한 수치예보모델이라고 하더라도 예보시간이 지날수록 예보오차는 증가할 수밖에 없는데, 자료동화 과정은 수치모델의 예보오차가 커지는 것을 막는 안전장치라고 할 수 있다. 만약 기상관측자료를 융합하는 자료동화 과정이 없다면, 모델의 오차를 줄일 수 있는 정보가 전혀 없기 때문에 예보시간이 지남에 따라 예보오차는 계속 증가할 것이다. 그러나 자료동화 과정을 통해서 6시간 또는 12시간마다 수집되는 관측자료를 모델과 융합시키면 수치예보의 오차가 지남에 따라서 커지는 것을 막을 수 있는 것이다(그림 3.2.45). 이때, 관측자료를 융합하는 과정에는 단순히 자료만을 섞는 것이 아니라, 수치예보모델이 요구하는 물리법칙, 역학적 조건 등을 잘 사용하여, 노이즈가 없고 조화로운 모델 초기자료를 만드는 과정이 포함되어 있다. 자료동화 기법은 거의 모든 전지구 재분석자료에도 적용되어 있으며, 현업 기상예보체계에도 포함되어 있는 방법이다. 자료동화 기법을 적용할 때에는 사용되는 모델의 특성 및 수행영역, 해상도에 따라 관측자료가 적용되는 가중치가 달라지므로 초기/경계자료로 사용되는 전지구 재분석자료에 자료동화기법이 적용되었다하더라도 상세한 과거 기후를 재현할 때에도 다시 적용해주는 것이 오차를 줄이는데 중요한 역할을 한다.

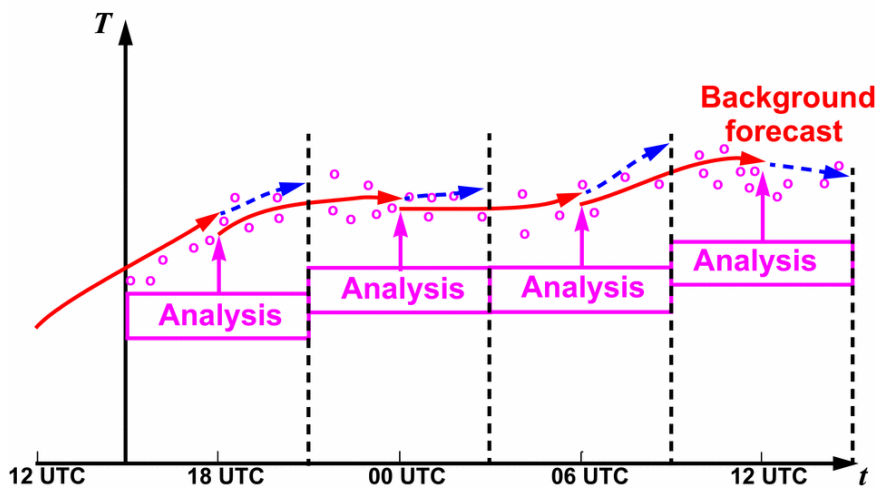


그림 3.2.45 3DVAR 자료동화 방법에 대한 개요

상세 과거 기후 생산은 초기/경계자료인 6시간 간격의 전지구 재분석자료를 기반으로 하지만 결국 역학적 규모축소법에 사용된 수치모델에 의한 단시간 모의결과 또한 포함하고 있기 때문에 과거의 기상 상태를 기록하고 있으면서도, 나름대로의 역학적, 물리적 균형을 가지고 있다. 따라서 자료동화 과정에서는 무조건 관측 자료만을 반영하는 것이 아니라 모델에서 산출된 단시간 예보결과를 배경으로 사용하고 그 위에 관측값에 의한 보정치를 적절히 반영하는 방식으로 상세 과거 기후를 산출한다. 이 때, 자료동화의 복잡한 기술은 관측자료의 종류에 따라, 관측자료의 상태에 따라, 모델 예보결과의 질에 따라 모델값과 관측값 중 어디에 더 많은 가중치를 주고, 분석자료를 만들지를 저울질하게 된다. 여기서 사용된 3DVAR 자료동화 시스템은 역학적 규모축소법에 사용된 모델 자체가 가지고 있는 배경장 오차(background error)와 사용되는 관측자료가 가지고 있는 오차 및 관측장비의 오차의 함수로 이루어진 비용함수(cost function)을 반복적으로 계산하여 이 비용함수가 최소가 되는 상태의 관측자료와 모델자료를 적절히 융합하게 된다.

역학적 규모축소법과 자료동화 시스템을 적용한 상세 과거 기후 생산 방법은 그림 3.2.46에 도식화 하였다. 먼저 6시간 전 전지구 재분석 자료와 관측자료를 통해 모델의 초기장을 만들고 총 30시간동안 상세 기상장을 모의하게 된다. 이 때, 6시간마다 관측자료를 통한 자료동화 시스템을 적용하여 모델에서 만들어질 수 있는 오차를 줄여주게 되며 초기 6시간의 자료는 Spin-up 자료로써 제외한다. 나머지 24시간 동안의 자료를 모두 누적하여 최종적으로 상세 과거 기후자료로 활용하게 되는 것이다.

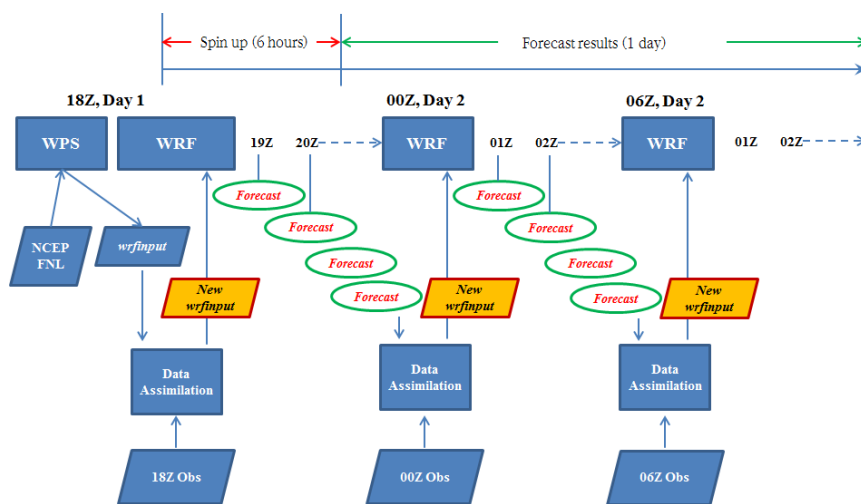


그림 3.2.46 역학적 규모축소법 및 자료동화 시스템의 적용

역학적 규모축소법과 자료동화 시스템을 적용한 2014년 상세 과거 기후 자료와 기상청 해양기상부이(그림 3.2.47)의 관측자료의 비교 분석 결과를 제시하였다(표 3.2.9). 여기서 절편과 기울기는 모델자료와 관측자료의 직선회귀식의 계수이며, R은 상관관계, MBE(Mean Bias Error)와 RMSE(Root Mean Square Error)는 각각 평균편차오차와 평균제곱근오차를 의미한다. 통계분석 결과 상관계수(R)는 모두 0.8 이상이며, 최대 0.88을 기록하였다. 초기/경계자료로 사용된 ERA-interim 자료보다는 개선되었으나 지역모델이 가지고 있는 태풍 모의의 한계는 여전히 내포하고 있는 것으로 사료된다.

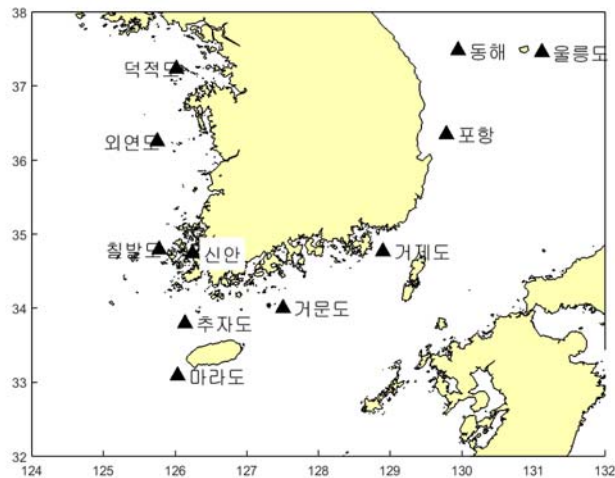


그림 3.2.47 기상청 해양기상부이의 위치도

표 3.2.8 2014년 상세 과거 기후 자료와 관측자료의 비교 분석 결과

위치	부이	절편 (m/s)	기울기	R	MBE (m/s)	RMSE (m/s)	자료수
서해	덕적도	0.29	0.81	0.82	0.64	1.95	8639
서해	외연도	0.52	0.83	0.87	0.4	2.08	8426
서해	칠발도	-0.19	0.88	0.86	0.83	2.03	8571
서해	신안	0.0	0.72	0.80	1.58	2.83	8354
남해	마라도	0.94	0.86	0.88	0.0	2.89	7782
남해	거문도	0.70	0.85	0.86	0.19	2.10	8475
남해	거제도	1.0	0.80	0.83	0.27	2.31	8491
동해	포항	1.14	0.80	0.83	0.24	2.91	8498
동해	동해	1.2	0.73	0.81	0.36	2.87	8019
동해	울릉도	1.01	0.74	0.82	0.61	2.19	8680

(다) 태풍 해상풍 산출

태풍은 일반적인 온대성 저기압과 고기압과는 달라서 태풍 중심 부근에서의 해면기압과 바람의 분포의 변화가 크다. 10km 이상의 해상도를 가지고 있는 기상모델로는 태풍을 재현하는 데에는 한계가 있을 수 있다. 이에 태풍 중심역에서의 기압분포에 대한 추산오차를 줄이기 위해 태풍영향군내의 등압선을 동심원으로 가정하여 태풍의 기압분포를 몇 개의 파라미터 (중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 등)로 표시하는 태풍 기압분포모형이 아직까지도 활용되고 있다. 태풍의 바람추정은 등압선을 동심원으로 간주하고 기압분포를 태풍의 몇 개의 파라미터(태풍 중심 위치, 중심기압, 최대풍속대 반경, 외부기압 등)로 수치적으로 나타내어, 이로부터 경도풍을 해석적으로 구한 후 이를 태풍의 이동 속도 영향, 해면 마찰 영향 등을 고려하여 보정하는 방법이 일반적으로 이용되었다. 그러나 태풍의 이동 속도, 해면 마찰 등의 영향을 경험식에 의해 보정하는 방법이 일반적으로 사용되어 왔으나, 본 연구에서는 이러한 영향을 수치모델로 산출하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 태풍 해상풍 모델의 기본 모형은 Chow(1971)에 의해 개발되었고 Cardone 등(1992)에 의해 수정된 이 모형은 대기경계층(Planetary boundary layer; PBL)내에서 연직 평균된 수평방향 운동 방정식에 기초하고 있다 (한국해양연구원, 2005).

Arya(1977)의 유사 모형(Similarity model)에 기초한 표면마찰공식(surface drag formula)과 Cardone(1969)의 해수면에서의 조도(roughness) 공식을 결합하였으며, 태풍의 중심을 원점으로 이동식 격자시스템을 적용하여, 태풍의 중심에서는 5km 간격의 세부격자를 설정하고 태풍 중심에서 멀어질수록 2배씩 격자간격이 커지는 Nest 격자시스템을 사용하여 분석과 계산능률을 최적화 하였다(그림 3.2.48).

$$\frac{d\hat{V}}{dt} + fk \times \hat{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (K_H \nabla \hat{V}) - \frac{C_D}{h} |\hat{V}| \hat{V} \quad (59)$$

여기서, $p = p_c + \bar{p}$, $p(r) = p_0 + (p_\infty - p_0)e^{-R/r}$, $fk \times \hat{V}_g = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p}$ 로 놓으면

$$\frac{dV}{dt} + fk \times (V - V_g) = -\frac{1}{\rho} \nabla p_c + \nabla \cdot (K_H \nabla V) - \frac{C_D}{h} |V + V_c| (V + V_c) \quad (60)$$

여기서, $V = \hat{V} - V_c$, $V_g = \hat{V}_g - V_c$, V_c 는 태풍의 이동속도, h 는 대기경계층의 높이를 나타낸다.

Cardone 등(1992)은 관측자료(Moss와 Rosenthal, 1975)로부터 1958년의 Hurricane Daisy와 1966년의 Inez 태풍의 PBL 높이의 이론적 추정(Chang, 1977)을 검토하여 그 값이 380~700m의 범위를 갖는다고 밝혔다. 이 범위에서 h 에 대한 CE 바람 모형의 민감도는 Hurricane Camille에 대하여 조사되었고, 500~625m의 범위가 정확한 바람을 계산하는 것으로 나타났다(Cardone 등, 1992). h 는 태풍에 따라 변화할 수 있는 모형 매개변수이지만 정확한 값을 측정하기 어렵다. 보통 500m의 값으로 주어졌을 때 폭풍 중심 근처에서 다소 안정적인 결과를 제공하는 것으로 추천되었다.

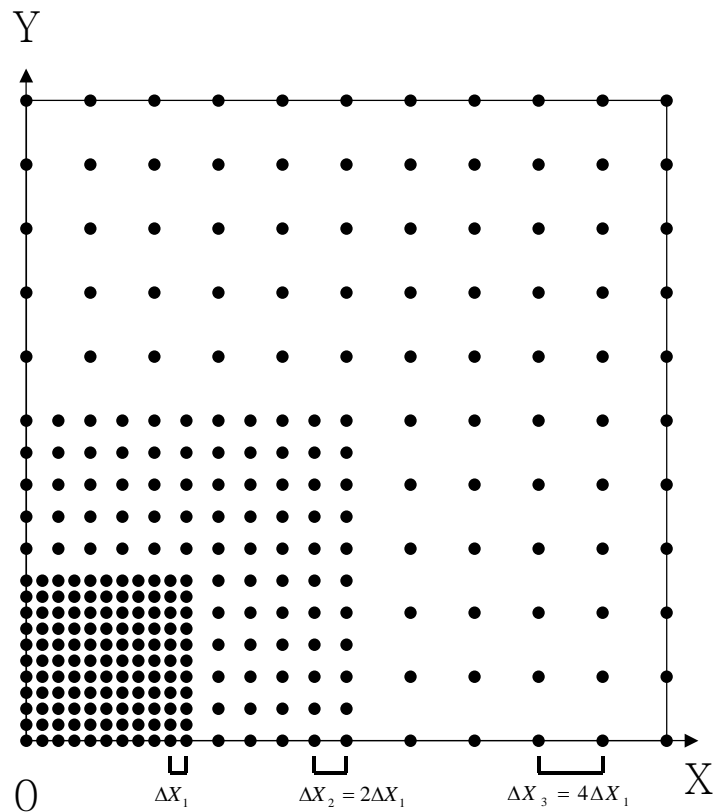


그림 3.2.48 Nested Grid System

식 (60)에서 태풍중심 기압 p_0 , 태풍 주변기압 p_∞ , 최대풍 반경 R 등은 모델의 중요한 입력자료이며, 이 중에서 태풍 중심기압은 각국의 기상청에서 고시를 하고 있으나 태풍 주변기압과 최대풍 반경 등은 본 연구에서 각종 기상자료를 활용하여 추정하고 있다. 그림 3.2.49는 태풍 볼라벤 시의 태풍 해상풍을 산출한 결과를 예로 나타낸 것이다.

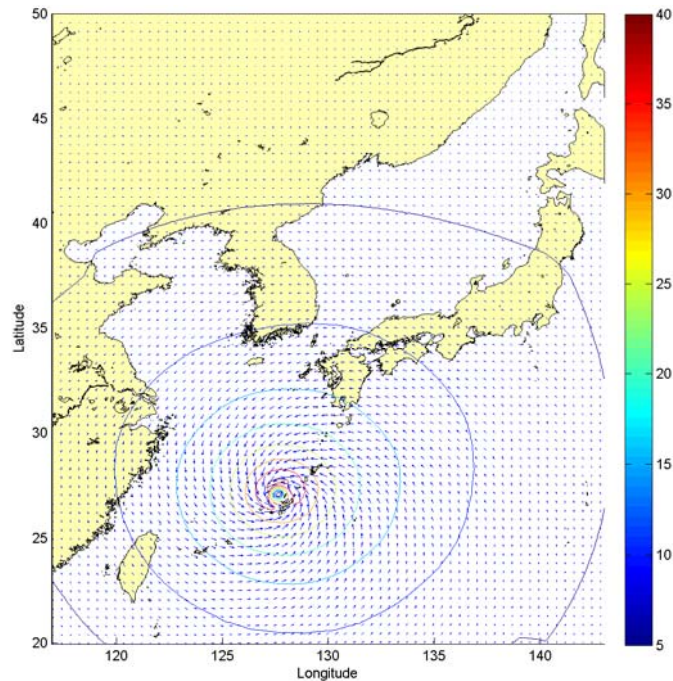


그림 3.2.49 태풍 해상풍 모델의 결과 예 (2012년 태풍 볼라벤 시)

태풍의 진로 중심 기압 등 중요한 태풍 파라미터는 태풍 통과시에 기상예보센터에서 관측 및 예측 자료를 발표하며 그 이후에 다시 정밀 분석하여 정리한다. 한국, 중국, 일본, 미국 등 각국에서 정리한 자료를 모아 정리했다.

일본기상청 RSMC(Regional Specialized Meteorological Center) 도쿄 센터의 태풍자료는 1951년 이후의 태풍에 대하여 태풍 파라미터 자료를 제공하고 있다. 태풍 파라미터는 태풍중심의 위경도와 중심기압과 태풍최대풍속, 50kt, 30kt의 강풍반경(장반경, 단반경) 및 장반경의 방향(8개) 등으로 구성되어 있다. 미국 해군해양기상센터의 JTWC(Joint Typhoon Warning Center)에서는 1945년 이후의 태풍자료를 제공하고 있으며, 2000년까지는 태풍중심의 위경도와 태풍최대풍속 등을 제공하였으나 2001년 이후부터는 태풍중심

기압과 35, 50, 65, 100kt의 강풍대의 반경 및 방향과 최대풍 반경 등이 추가로 제공되고 있다.

태풍 파라미터 자료는 각 국가별로 기상자료와 위성자료 등을 분석하여 산정하기 때문에 서로 차이를 보이고 있다. 일반적으로 일본 기상청에서 재분석한 자료가 주로 이용되고 있으며, 매 6시간마다의 태풍의 중심 위치, 중심 시도 등의 태풍 파라미터 자료로부터 태풍 이동 속도를 고려하여 매시간 간격의 태풍 파라미터를 내삽하여 산출한다.

우리나라 각 기상 관측소에서 측정된 태풍 통과시의 해면 기압 및 바람 관측 자료는 1951년에서부터 2014년까지의 고층관측소와 기상관측소 및 AWS(Automatic Weather station)뿐만 아니라 부이에서 관측된 모든 자료를 이용하였다. 중국과 일본의 지상 관측 자료는 최근 30여 년간의 자료를 수집하여 태풍 중심에서 최대풍 반경을 구하는데 이용했다. 과거 태풍에 대한 정보는 지극히 제한적이므로, 입수 가능한 자료를 최대한 이용하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 우리나라 주변의 해상에서 태풍에 의한 해상풍 현장 관측 자료는 9개의 부이가 전부이므로, GEOSAT, TOPEX, ADEOS 및 ERS-1, ERS-2 등 위성에 의한 해상풍의 원격 관측 자료를 활용하였다. 태풍 통과시의 원격탐사에 의한 해상풍 자료를 분석하여 최신 태풍 해상풍 모델을 적용하여 태풍 파라미터 분석에 적용하였다.

관측자료가 충분하지 않은 경우에는 각 태풍에 대해 태풍 주위의 기압과 바람장을 구하기 위해서는 태풍시의 지상 일기도와 ECMWF의 기압 및 바람장 자료를 이용하여 계산했다. 특히, 태풍이 육지에서 멀리 떨어져 있을 때에 해상의 관측자료가 거의 없기 때문에 태풍 최대풍 반경을 구하기 위한 관측자료가 절대적으로 부족하다. ECMWF 기상 자료는 자료동화를 통한 재분석 자료이므로 관측자료가 충분히 반영되어 있다고 할 수 있으므로, ECMWF 자료를 관측자료 대신에 사용할 수 있다. 태풍해상풍 모델에서 사용되는 태풍 주변기압과 최대풍 반경은 ECMWF의 기압자료와 바람자료를 사용하여 추정하였다. 즉, 태풍중심에서 멀어지면서 기압이 최고점으로 증가하는 기압을 여러 방향으로 산출하여 이를 평균하는 방법을 사용하였으며, 최대풍 반경도 기상모델자료에서 나타난 태풍중심과 최대풍이 발생하는 지점까지의 거리를 산출하여 사용하였다.

(2) 파랑모델

초기의 파랑 모델은 유의파와 주기를 풍속과 취송거리(fetch) 등에 대한 경험적인 함수

로 표현하는 유의파 모델로 시작되었다. SMB법은 비교적 풍향, 풍속이 일정한 해역에 대해 적용될 수 있으며, Wilson법은 SMB법을 기초로 해상의 풍역이 시·공간적인 변화가 큰 태풍 등의 경우에 적용할 수 있도록 파랑추적법을 사용한 것이다. SPM은 천천히 움직이는 태풍에 대하여 최대 풍속이 나타나는 지점에서의 파고와 주기를 태풍파라미터에 의한 경험식으로 표시하였다.

실제 해상상태는 여러 불규칙한 풍파와 너울이 복합적으로 구성되어 있으므로, 이러한 해상상태의 재현과 해석을 위해서는 에너지 스펙트럼을 고려한 파랑모델을 사용하여야 한다. 에너지 스펙트럼 모델은 해상상태를 주기와 파향에 따라 여러 개의 성분파로 분리하여, 각 성분파의 발달, 소산 및 전파와 성분파간의 에너지 교환 등을 수치계산하는 것이다. DSA-5는 초기에 개발된 스펙트럼 모델로 성분파간의 비선형 에너지 교환은 무시하고 바람에 의한 에너지의 증가와 점성에 의한 에너지의 감소만을 고려하였다. HYPA 모델은 성분파간의 비선형 에너지 교환을 고려하기는 하지만 스펙트럼을 6개의 파라미터로 나타내어 스펙트럼 에너지 보존방정식을 사용하지 않고 파라미터에 대한 방정식을 수치적으로 계산하므로써 계산시간을 단축시키는 방법을 사용하고 있다.

(가) 파랑모델의 수립

파랑모델의 수심격자망을 구성하기 위하여 국립조사원의 수심자료를 입수하여 사용하였다. 국립해양조사원의 수심자료는 우리나라 해역에 대해서만 수심측량을 수행하므로 모델영역에서의 수심격자망을 구성하기 위해서는 전지구 수심자료가 요구된다. 본 연구에서 사용한 수심자료는 전지구 수심자료로 ETOPO1(1분 격자)와 GEBCO(30초 격자) 자료를 사용하였으며, 일본 근해의 영역에 대해서는 JODC의 500m 격자간격의 수심자료를 사용하였다. 또한 300여개의 수치지도에서 추출한 수심자료와 해안선자료를 사용하였으며, 우리나라 근해의 정확한 수심자료 산출을 위해 국립해양조사원에서 제공한 레벨2의 150m 격자간격의 수심자료와 레벨3의 900m 격자간격의 수심자료를 활용하였다.

파랑모델의 수심격자망을 구성하기 위해 사용한 수심자료는 해상도와 격자체계가 같지 않다. 즉, 전지구 자료는 ETOPO1은 1분(1/60도) 격자간격(약 2km)이며, GEBCO는 약 1km, 일본 JODC는 500m, 국립해양조사원 수심자료는 150m와 900m 격자간격의 자료이다. 따라서 각 자료의 영역이 겹치는 해역에서는 해상도가 높은 자료만을 사용하여 격자점에서의 수심자료를 산출하였으며, 모델의 수심은 격자점에서의 수심보다는 격자크기의

영역을 대표하는 수심으로 정하는 것이 일반적이므로, 격자점을 대표하는 영역의 모든 수심자료를 평균하여 격자점에서의 수심자료로 설정하였다. 본 연구에서는 WaveWatch III 모델로 장기파랑산출을 수행하였다. 모델 영역은 북위 20~50도, 동경 117~143도의 영역으로 설정하였으며, 격자 간격은 위도, 경도 1/12도 간격으로 하여 격자수는 313×361로 설정하였다(그림 3.2.50).

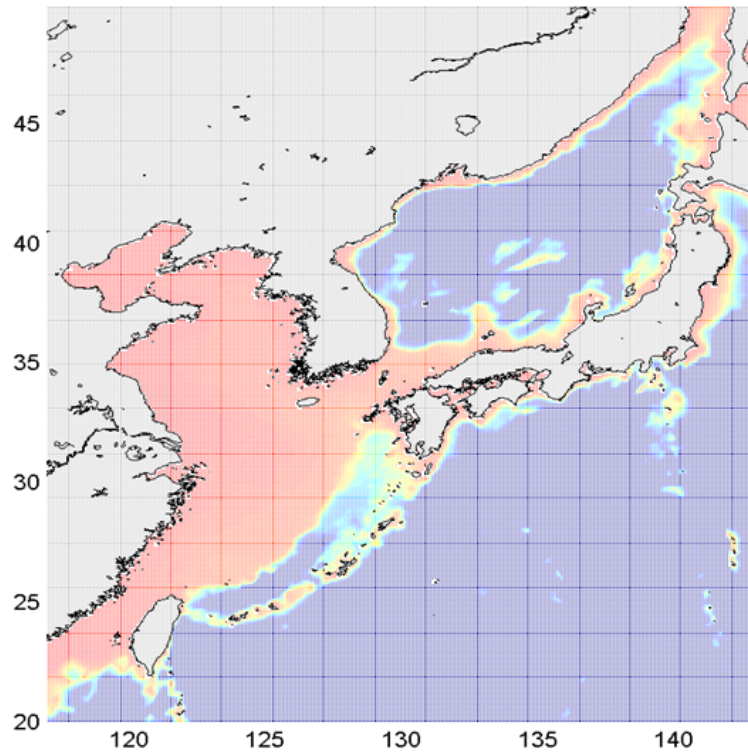


그림 3.2.50 1/12도의 파랑모델 격자망

WaveWatch III 모델의 기본 방정식은 에너지 평형방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{\mathbf{x}}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \quad (61)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}_g + \mathbf{U} \quad (62)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial d} \quad (63)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \quad (64)$$

여기서, 에너지평형방정식의 전파항에서 c_g 는 파의 군속도이며, 수심의 함수이다.
또한, 에너지 유입항은 다음과 같이 여러 항으로 표현될 수 있다.

$$S = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{xx} \quad (65)$$

S_{ln} 은 linear input source, S_{in} 은 wind input source (바람에 의한 에너지 유입항), S_{nl} 은 nonlinear wave-wave interaction (비선형 파랑간 상호작용)이다. S_{ds} 은 dissipation (백파에 의한 에너지 소산항), S_{bot} 은 bottom friction (저면 마찰항), S_{db} 은 depth-induced breaking (수심에 의한 쇄파)이며 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{k} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta) \quad (66)$$

$$S_{bot}(k, \theta) = -f_e u_b \frac{\sigma^2}{2g \sinh^2(kd)} N(k, \theta) \quad (67)$$

$$\bar{k} H_{\max} = \gamma_M \tanh(\bar{k}d) \quad (68)$$

S_{ln} , S_{in} , S_{nl} , S_{ds} , S_{db} 은 각각 3파 비선형 상호작용항, 저면 산란항, 빙하에 의한 감쇄항, 반사항 및 사용자 정의항을 의미한다.

위의 식에서 마찰에 의한 저면 마찰항과 수심에 의한 쇄파는 수심이 직접적으로 작용하며, 백파에 의한 에너지 소산항은 wave number S_{ln} 의 함수이므로 수심의 영향을 받는다.

스펙트럼 파랑모델은 기본방정식인 스펙트럼에너지의 평행방정식에서 스펙트럼에너지를 산출하는 것이며 스펙트럼에너지는 5차원 변수, 즉, 위도, 경도의 공간자표와 파향, 주파수 및 시간이다. 5차원 변수에 대한 모델 파라미터는 다음과 같이 설정하였다. 즉, 공간

좌표는 북위 20~50도, 동경 117~143도의 영역으로 격자 간격은 위도, 경도 1/12도 간격으로 하여 격자수는 313×361로 설정하였으며, 방향은 32개 방향으로 구분하고, 주파수는 0.0412~0.4056Hz 범위에서 주파수 증가율을 1.1로 25개 주파수를 설정하였으며, 최소 시간간격은 150초로 설정하였다.

(나) 파랑 모델의 민감도 실험

현재 약 14개 기관에서 전지구 예보시스템을 실시간 운영하고 있으며 수평/연직 해상도의 증가를 꾸준히 추진하고 있다. 그 중 유럽중기예보센터 (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 IFS (Integrated Forecast System) 은 가장 높은 해상도와 정확도를 가지는 현업 전지구예보시스템으로 알려져 있다.

ERA-Interim 재분석 자료는 ECMWF의 IFS를 기반으로 하는 전지구 재분석 자료로써 1979년부터 현재까지의 결과를 지속적으로 생산하고 있다. 이 시스템은 12시간 간격 분석창의 4-dimensional variational analysis (4D-Var) 자료동화방법을 채용하고 있으며 0.75° 간격의 공간해상도 및 0.1 hPa 고도까지 60개 연직 해상도를 가지고 있다. 또한 파랑 예측결과의 경우 유의파고, 평균주기, 평균파향을 6시간 간격으로 제공하고 있다.

예측모델에 대한 성능 평가 (skill assessment)는 자료의 비교를 통해 모델의 오차를 일련의 객관적인 통계량 혹은 스킬량으로 나타내는 과정이다. 또한 계산된 통계량의 수용임계값을 지정하여 예측 결과의 수용지표를 결정하는 과정이 필요하다. 본 연구에서 사용된 평가 통계량은 RMSE (Root Mean Square Error) 이며 다음과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (69)$$

여기서 S_{ln} 은 표본의 개수, S_{ln} 는 예측결과, S_{ln} 는 관측결과이다. RMSE는 적은 값일수록 양호한 예측성능을 지시하며, 일반화되지 않은 절대 오차를 계산하기 때문에 상대적으로 낮은 파랑에서의 오차를 양호하게 평가할 가능성이 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 일 평균 파고가 1m 이상인 경우에 한해서 예측모델 평가를 진행하였다. RMSE 수용임계값의 표준화된 기준은 존재하지 않으나 미국 NOAA 등 타 기관에서 사용되는 일반

적인 기준인 0.5 m를 RMSE의 수용임계치로 설정하였다. 기상청 각 관측 정점에 대응하는 예측결과는 ERA-Interim 재분석자료에서 선형 보간법 (linear interpolation)으로 추출되었다.

또한 RMSE에 기반하는 예측 정확도의 표준 지표로 Central Frequency (이하 CF%)를 정의하였다. CF%는 평가 범위의 총 자료 수에 대한 수용 임계값을 만족하는 빈도의 비율로 계산되며 예측모델의 용이성 (availability), 품질 (quality), 적시도 (timeliness)를 일반화하는 통계량으로 다음과 같이 정의된다.

$$CF\% = \frac{AF}{N} \times 100 (\%) \quad (70)$$

AF는 수용 빈도수 (acceptance frequency)를 나타내며 N은 평가통계량의 개수, 여기서는 일별 평가된 RMSE의 개수를 의미한다. 예를 들어 100일간 산출된 평가통계량 중에서 70일이 수용임계치 0.5 m 이하에 수렴하면 CF는 70%로 정의된다. 미국 NOAA의 해양예보시스템의 경우 예측성능의 최소 요구치로 75%의 CF 값을 요구하고 있으며 한국해양과학기술원에서 개발하고 있는 운용해양예보시스템 KOOS의 경우 2016년 현재 70% 이상을 유지하고 있으며 2017년까지 75%를 만족시키기 위한 연구를 진행하고 있다.

2011년부터 2015년까지 ECMWF Interim 재분석 자료와 기상청 해양관측부이 6개소(그림 3.2.53)를 비교하여 모델의 예측성능을 평가한 결과, 전구 예측모델이 가지는 시·공간적 해상도에 비해서는 양호한 예측결과를 보이고 있다. 또한 지역별, 시간별 예측성능이 비교적 일정하게 유지되고 있으나, 칠발도가 상대적으로 낮은 CF값을 나타내고 있으며, 마라도에서는 상대적으로 높은 값을 보이고 있다. 이는 칠발도 주변해역은 섬이 많은 지역으로 ECMWF Interim의 공간해상도(0.75도)로는 칠발도 해역의 파랑을 파악하기 어려우며, 마라도 해역은 남쪽으로 넓은 대양을 접하고 있어 지형적인 영향을 적게 받기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구에서는 ECMWF Interim 보다 고해상도의 공간격자(1/12도 간격)로 모델을 수행하므로, 표 3.2.9보다 정확한 예측결과를 획득할 수 있을 것으로 판단되며, 여기서 제시된 CF의 값이 모델산출 결과의 평가기준으로 활용될 수 있다.

격자 해상도에 따른 모델의 민감도를 실험하기 위해 같은 영역(위도 20~50도, 경도 117~143도)에 대하여 각각 1/4도, 1/6도, 1/12도 격자간격의 격자망을 설정하였다. 같은

바람자료를 사용하여 각 격자망에서 산출된 결과를 비교하기 0.5도 간격의 공통격자점에서의 자료를 추출하여 상호 비교하였다. 바람자료는 1979년~2013년 기간중 152개 태풍에 대해 태풍해상풍 모델로 산출된 바람장을 사용하였으며, 파랑모델은 모두 WaveWatch III(이후, WW3로 표기함)모델을 사용하였다.

표 3.2.9 ECMWF Interim 파랑자료의 년별 지점별 CF 값

년도 지점	2011	2012	2013	2014	2015	평균
외연도	67.4	54.5	54.7	56.0	57.3	58.0
칠발도	62.5	54.3	48.7	37.5	49.3	50.5
마라도	70.5	62.6	64.7	66.7	69.9	66.9
포항	58.3	59.9	54.9	60.0	51.3	56.9
동해	65.2	55.3	59.0	61.1	52.4	58.6
울릉도	50.0	60.7	59.5	57.4	51.3	55.8

각 격자망에서 태풍시 산출된 파랑자료에서 태풍별로 최대 유의파만을 추출하여, 아래 그림에서 보는 바와 같이 연안에 가까운 24개 격자점(그림 3.2.51의 '+', 격자번호 1~24)과 연안에서 0.5도 더 떨어진 24개 격자점(그림 3.2.51의 '*', 격자번호 25~48)의 두 그룹으로 나누어 각 격자망에서의 산출결과를 비교하였다(그림 3.2.52). 여기서 격자간격에 따라 산출된 결과는 거의 차이가 없었으며, 그림 3.2.52(d)에서 보는 바와 같이 외곽 연안격자점 중 일부 격자점에서 1/4도와 1/12도의 산출결과가 약간 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 1/4도 격자간격의 격자망에서는 대마도가 없는 것으로 표현되었으나, 1/6도와 1/12도 격자간격 격자망에서는 대마도가 표현되기 때문인 것으로 생각된다.

그림 3.2.52와 그림 3.2.53에서 보는 바와 같이 격자해상도에 따른 최대유의파의 차이는 거의 없었으며, 제주도과 대마도 주변 격자점에서의 격자해상도에 따른 차이를 검토하기 위해 섬 주변 격자점에서의 격자점별로 1/6도 격자망에서의 산출결과와 1/12도 격자망에서의 산출결과를 비교하였으나 대부분의 연안격자점에서는 대마도 동쪽 격자점(42번)을 제외하고는 격자간격에 따른 산출값의 차이는 거의 없었다.

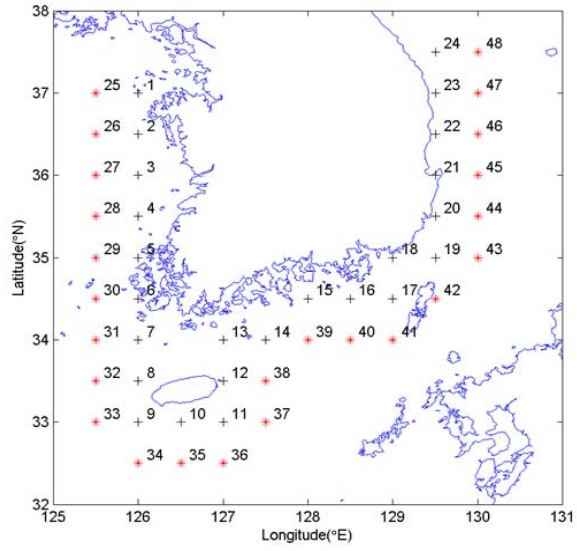


그림 3.2.51 격자해상도에 따른 결과 비교를 수행한 격자점

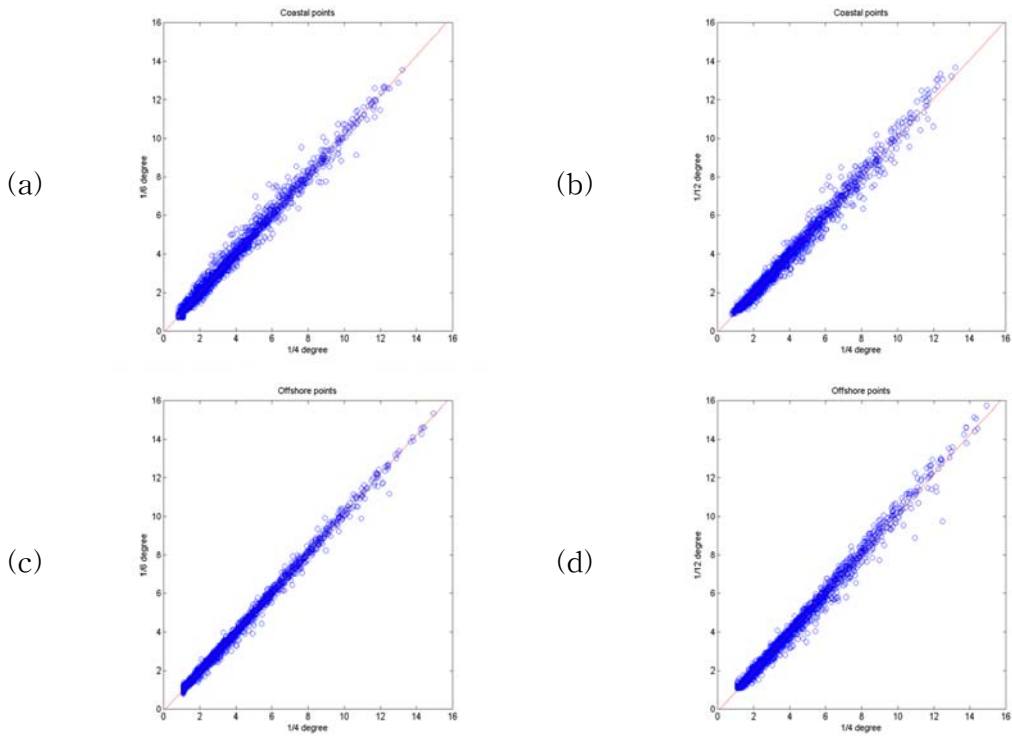


그림 3.2.52 연안격자점에서의 격자해상도에 따른 산출결과의 비교
 (a) 1/4도-1/6도, 내부연안격자점, (b) 1/4도-1/12도, 내부연안격자점,
 (c) 1/4도-1/6도, 외곽연안격자점, (d) 1/4도-1/12도, 외곽연안격자점

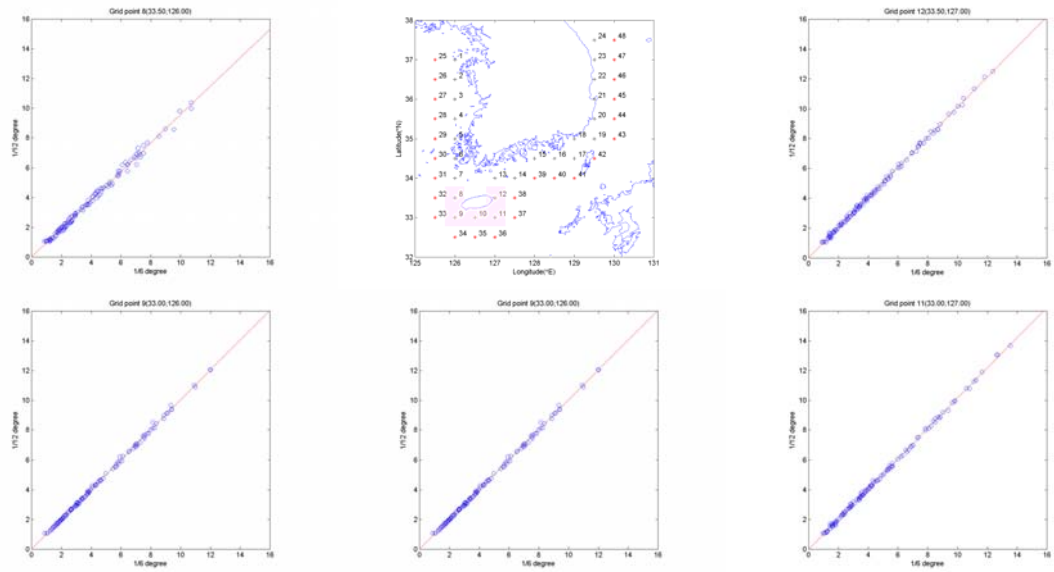


그림 3.2.53 제주도 주변 격자점에서의 1/6도, 1/12도 격자간격의 결과 비교

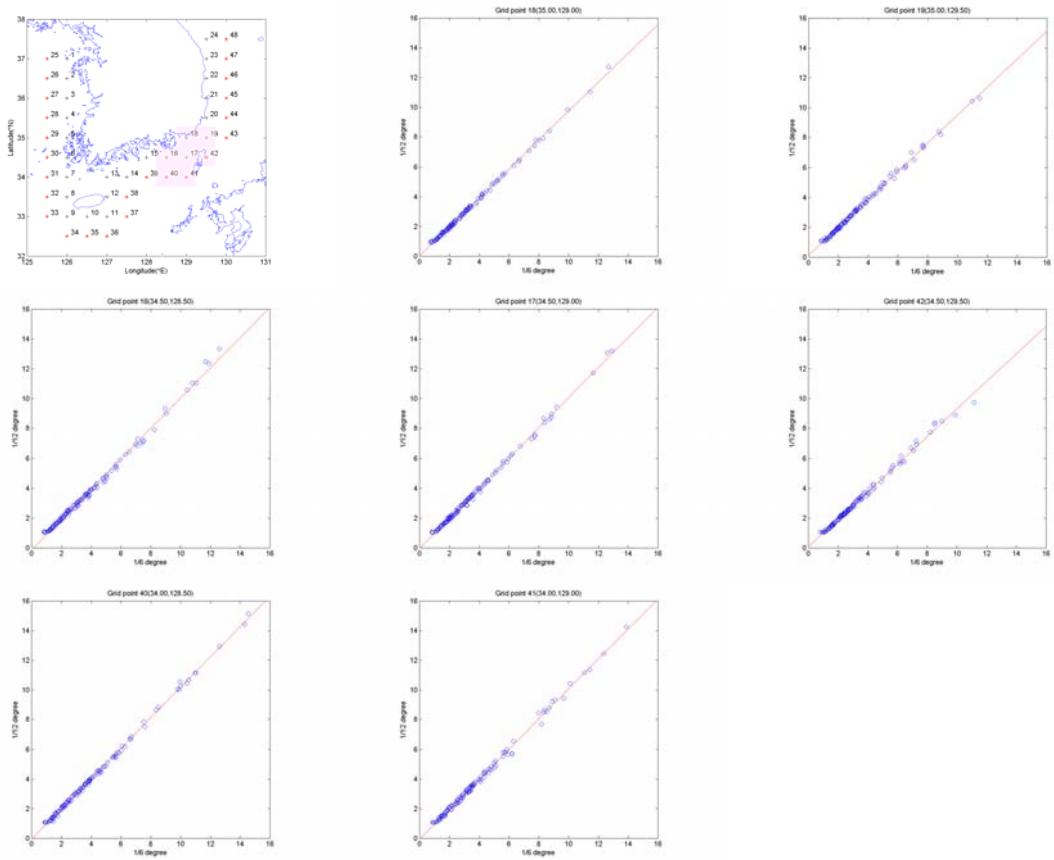


그림 3.2.54 대마도 주변 격자점에서의 1/6도, 1/12도 격자간격의 결과 비교

고해상도 바람자료를 활용한 파랑산출 결과의 효용성과 기상입력자료의 시공간 해상도의 영향을 평가하기 위해, 2005~2008년에 고파랑이 발생했던 사례를 선택하여 2005년 10월, 2006년 10월, 2008년 2월의 3개월간에 대하여 고해상도 바람자료를 생산하였다. 고해상도 바람자료는 미국 NOAA/NCEP의 전지구자료를 사용하여 downscaling한 결과이며 같은 기간의 ECMWF자료와 비교하였다. 그림 3.2.55은 2006년 10월의 각각 ECMWF 바람자료와 고해상도 NCEP-WRF 바람자료에서 동해안에서 고파랑 발생시에 대하여 바람장의 추이를 비교한 것이다. 여기서 고해상도 NCEP-WRF 자료는 ECMWF 보다 갑작스러운 풍속 변화를 잘 재현함을 알 수 있는데, 이는 고해상도 자료가 공간해상도 뿐만 아니라 시간해상도도 더 높기 때문인 것으로 판단된다. 즉, ECMWF자료는 매 6시간 간격으로 0.25도(약 27km)의 공간해상도의 자료이며, 고해상도 바람자료는 매 1시간 간격의 10km의 공간해상도의 자료이다.

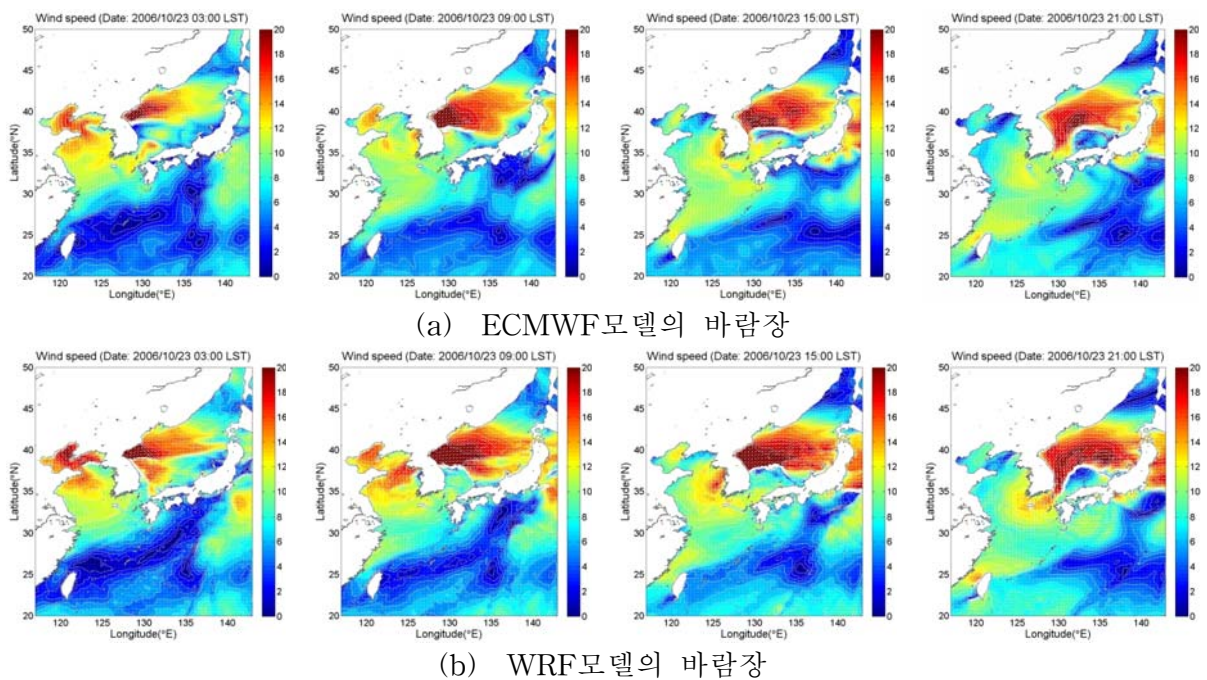
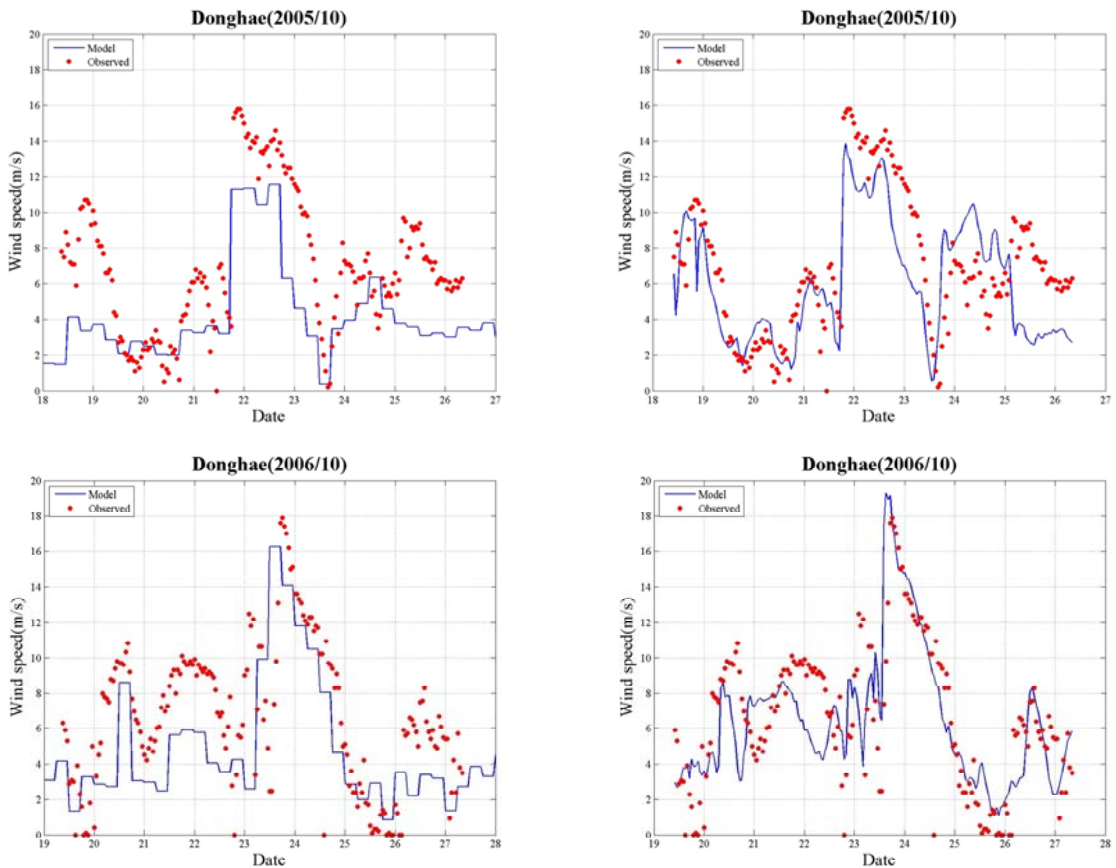


그림 3.2.55 한반도 주변의 ECMWF모델과 WRF모델의 바람장 비교

그림 3.2.56은 동해부이 관측지점에서의 고해상도 NCEP-WRF 바람자료 및 ECMWF 바람자료를 관측자료와 비교한 것이다. 여기서 보는 바와 같이 고해상도 바람자료가

ECMWF 바람자료에 비해 관측치와 유사한 결과를 나타내었다. 표 3.2.10에는 고해상도 바람자료를 생산한 전 기간(3개월)에 대하여 고해상도 바람자료와 ECMWF의 바람자료를 동해부이 관측지점에서의 관측자료와 비교한 통계자료를 나타낸 것이다. 여기서 관측자료와의 RMS 오차는 2008년 2월을 제외하고는 크게 줄어든 결과를 나타내었으며, 반면 월 최대풍속은 더 큰 값을 보여주었다. 이는 시공간적인 해상도가 높은 모델의 산출결과가 더 좋은 결과를 보임을 알 수가 있다. ECMWF 모델자료와 WRF 모델자료를 사용하여 산출한 파랑모델 결과를 관측자료와 비교한 결과에서도 바람자료의 비교와 마찬가지로 WRF 모델에 의해 산출된 바람자료로부터 산출된 파랑산출 결과가 관측치와 더 유사한 결과를 나타내었다(그림 3.2.57, 표 3.2.11).



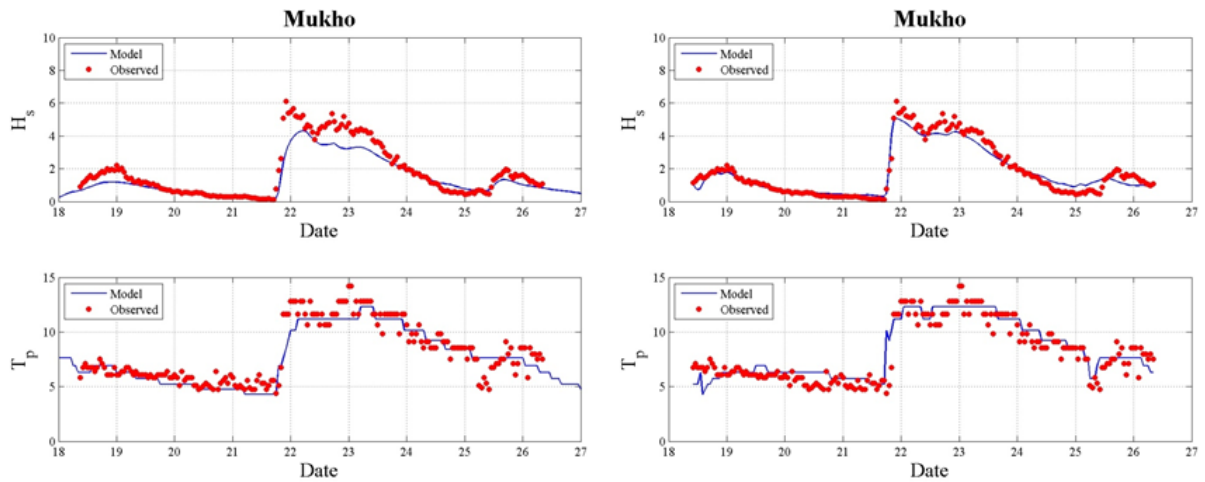
(가) ECMWF모델

(나) WRF모델

그림 3.2.56 동해부이 관측 자료와 기상모델 결과 비교

표 3.2.10 ECMWF와 고해상도 바람 자료의 비교

Wind speed	ECMWF		WRF-NCEP/FNL	
	최대풍속 (m/sec)	RMS Error (m/sec)	최대풍속 (m/sec)	RMS Error (m/sec)
2005/10	11.58	3.56	13.86	2.88
2006/10	16.26	3.61	19.28	2.71
2008/02	12.79	2.54	14.62	2.77



(가) ECMWF모델

(나) WRF모델

그림 3.2.57 묵호에서의 파랑모델 결과 비교

표 3.2.11 파랑모델 결과의 오차 비교

Wave height		ECMWF		WRF-NCEP/FNL	
		최대파고 (m)	RMS Error (m)	최대파고(m)	RMS Error (m)
2005/10	묵호	4.31	0.68	5.06	0.40
	진하	2.60	0.79	2.86	0.72
2006/10	묵호	6.63	0.50	8.49	0.49
	속초	8.49	0.67	8.65	0.65
2008/02	후포	5.49	0.45	6.76	0.72
	진하	3.73	0.54	4.29	0.47

(3) 장기파랑산출

본 연구에서는 장기파랑산출을 위한 입력자료로 기상모델 산출결과를 사용하였다. 앞서 기술한 바와 같이 ECMWF 전지구 기상모델자료인 1979년~2013년의 35년간 매 6시간 간격의 바람자료를 입수하였다. ECMWF 전지구 기상모델자료는 기간에 따라 0.75도~0.125도의 해상도를 갖고 있으며, 해상도가 낮을수록 태풍 등 고파랑을 발생시키는 기상현상에 대해 강도를 제대로 재현하지 못하고 있다(그림 3.2.47). 또한, 해상도가 높을수록 최대풍속이 커지는 경향이 있어, 기간에 따른 해상도의 차이로 인해 년 최대풍속의 연간 변화율이 왜곡되어 나타날 수 있다. 공간 해상도 뿐만 아니라 시간해상도도 최대풍속의 결정에 영향을 끼치는 것을 파악되었다(표 3.2.11).

해상도가 높은 기상자료를 산출하기 위해서는 격자간격과 시간간격을 줄여 기상모델을 실행(Down-scaling)하여야 하며, 고해상도로 수치기상모델을 수행하는 것은 슈퍼컴에 버금가는 컴퓨터 자원이 요구된다. 본 연구에서는 1979년부터 매 6시간 간격으로 0.75도의 공간해상도로 생산된 전지구 기상모델 자료로 ERA-Interim 자료를 경계조건으로 사용하였으며, 파랑모델의 격자간격(1/12도)와 유사한 10km 간격의 격자에서 매 1시간 간격으로 생산된 기상모델결과를 사용하였다.

태풍시에는 일본 기상청 RSMC의 태풍파라미터 자료를 사용하여 TP96모델로 산출한 바람자료를 사용하였으며, 1979년 이후에 대해서는 태풍파라미터 모델에 의한 바람장과 WRF의 바람장을 결합한 통합바람장을 사용하였다.

1951년~2013년의 기간 중 RSMC의 태풍자료는 총 1650개이며, 이중 파랑모델 영역을 통과한 태풍의 수는 905개 이다. 이 중에서 우리나라 연안에서 3.0m 이상의 파고를 발생시킨 277개 태풍에 대해서만 파랑산출을 수행하였다.

(가) 장기산출결과의 검증

ERA-Interim 자료를 경계조건으로 사용하여 WRF모델로 Down-scaling한 결과를 검증하기 위하여 기상청 해양기상부이 자료(그림 3.2.47)와 비교하였다. 그림 3.2.58은 2013년 12월의 ECMWF와 WRF모델 결과와 관측치의 시간변화도를 비교한 것이다.

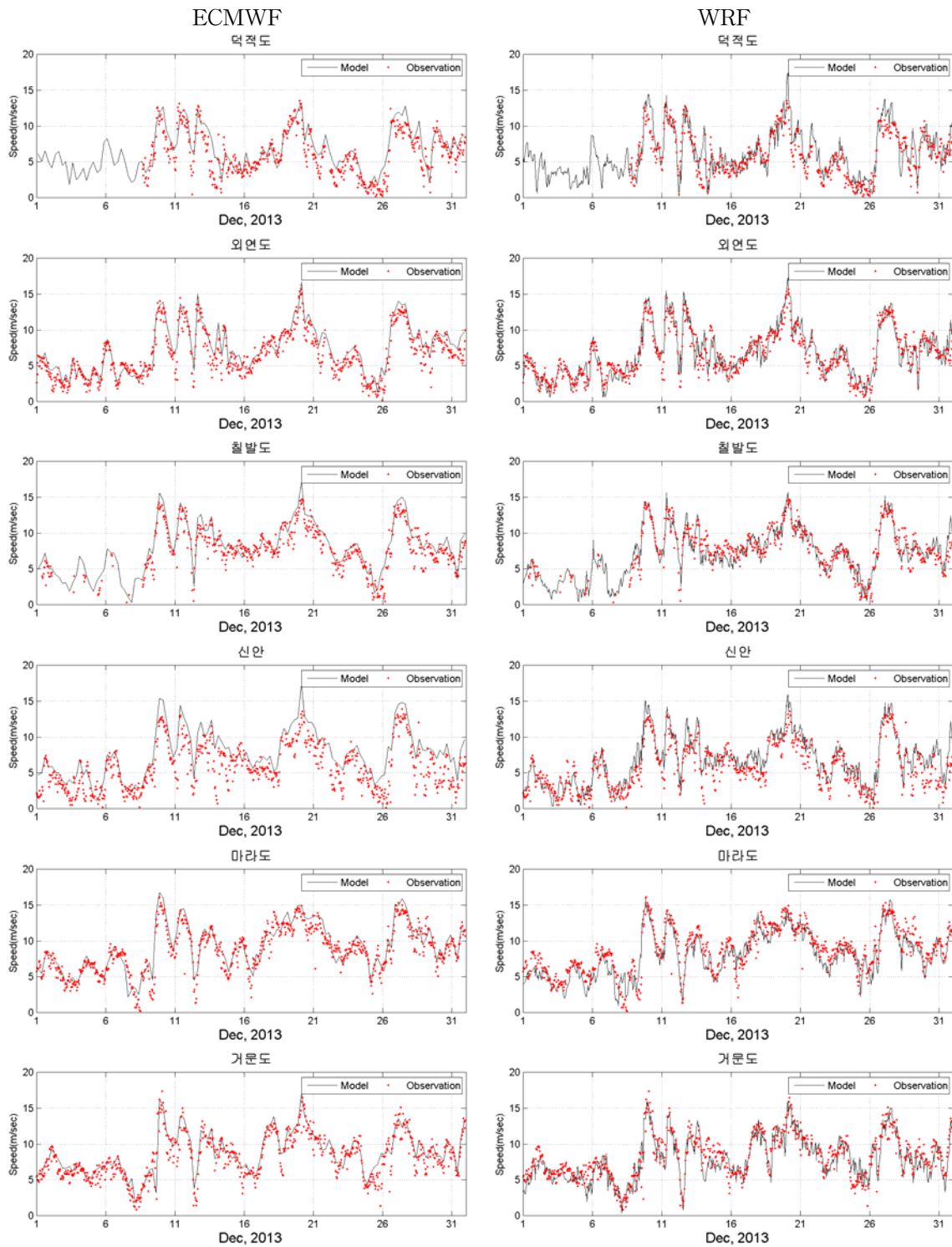
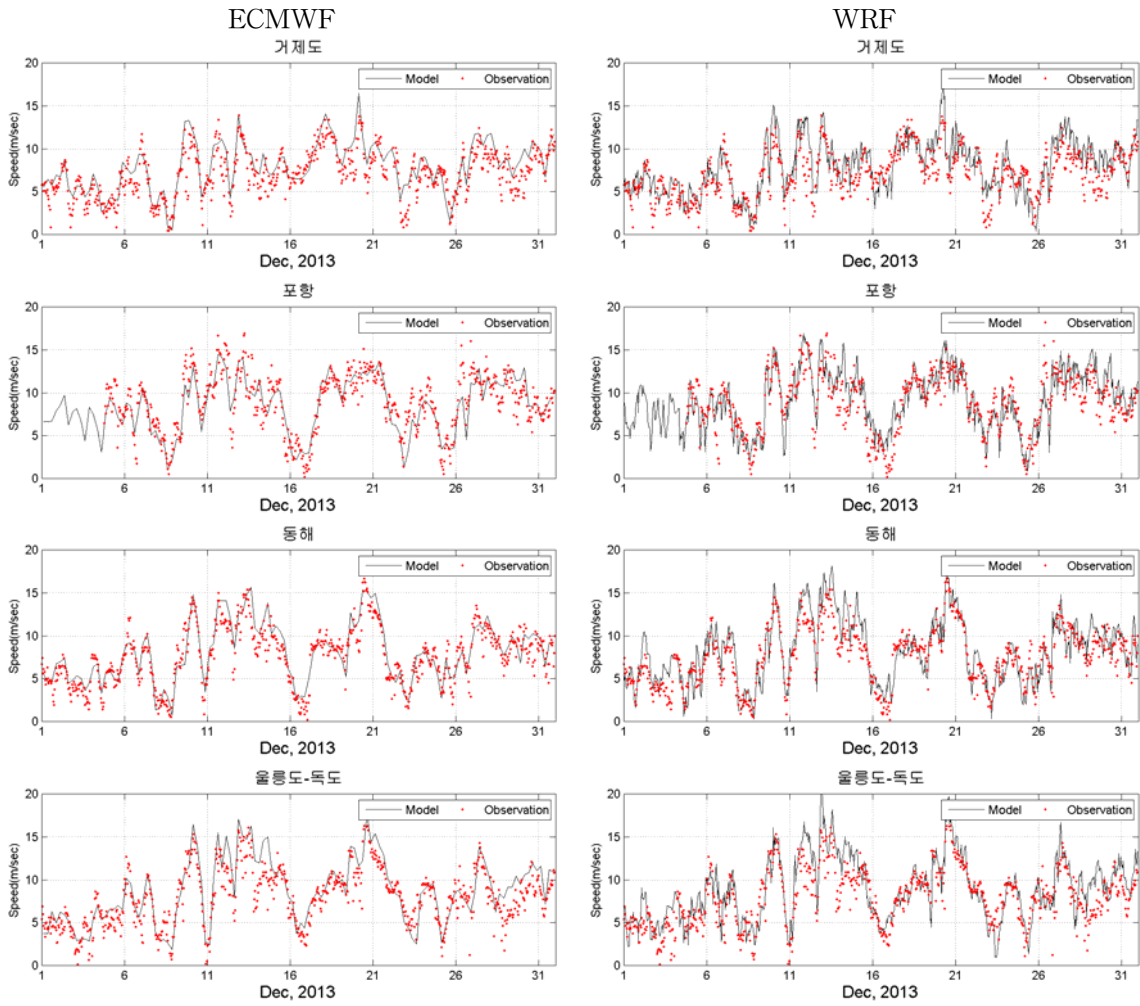


그림 3.258 ECMWF와 WRF모델결과의 관측자료와의 비교(2013년 12월)

(실선: 모델치, 점선: 관측치)



(계속)

위 그림에서 보는 바와 같이 ECMWF의 결과는 매 6시간 간격이므로 시간에 따른 변화가 크지 않은 반면에, WRF 모델결과는 매 1시간 간격으로 관측결과와 같이 시간적인 변화가 크게 나타나고 있다. 표 3.2.12과 표 3.2.13는 ECMWF와 WRF 모델결과를 관측치와 비교한 통계결과를 나타낸 것이며, 표 3.2.12은 전체관측치에 대한 통계결과이고 표 3.2.13은 최고풍속에 대한 통계결과이다. 여기서 RMSE, Bias는 각각 모델과 관측치의 차이의 표준편차와 평균이며, R은 상관관계, Ratio는 관측치에 대한 모델치의 비를 의미한다.

표 3.2.12 ECMWF와 WRF 모델결과의 관측치와의 비교 (전체 자료)

	ECMWF					WRF				
	N	RMSE	Bias	R	Ratio	N	RMSE	Bias	R	Ratio
덕적도	20,131	1.70	1.03	0.7716	1.1119	120,499	1.91	1.10	0.7329	1.1249
외연도	5,186	1.38	0.74	0.8652	1.0752	31,244	1.72	0.67	0.7991	1.0519
칠발도	19,603	1.78	1.45	0.7831	1.1883	117,391	1.96	1.27	0.7378	1.1371
마라도	6,184	1.57	0.39	0.8638	0.9788	37,059	1.93	0.42	0.7883	0.9441
거문도	18,818	1.73	0.66	0.8278	1.0070	112,678	1.99	0.66	0.7761	0.9784
거제도	20,083	1.89	0.93	0.7787	0.9467	120,271	2.16	0.75	0.7379	1.0092
포항	6,715	1.68	0.31	0.8295	0.9865	40,279	2.16	0.68	0.7378	1.0229
동해	14,158	1.64	0.39	0.8268	0.9914	85,207	2.14	0.62	0.7320	0.9960
울릉	2,237	1.61	0.76	0.8446	1.0773	13,396	2.01	1.09	0.7616	1.0975
합계	113,115	1.72	0.85	0.8053	1.0462	678,024	2.02	0.85	0.7486	1.0461

표 3.2.13 ECMWF와 WRF 모델결과의 관측치와의 비교 (최고풍속시)

	ECMWF				WRF			
	N	RMSE	Bias	Ratio	N	RMSE	Bias	Ratio
덕적도	1,127	1.61	-0.44	0.9480	1,127	2.05	1.08	1.0982
외연도	334	1.39	-0.20	0.9767	334	1.88	0.83	1.0760
칠발도	1,099	1.52	0.11	1.0040	1,099	2.12	0.95	1.0827
마라도	385	1.71	-0.77	0.9361	385	1.65	0.00	0.9977
거문도	1,175	1.87	-0.94	0.9085	1,175	1.83	0.20	1.0113
거제도	1,302	2.47	-1.63	0.8487	1,302	1.82	0.53	1.0431
포항	418	1.70	-1.06	0.9090	418	2.12	1.00	1.0855
동해	892	1.81	-0.97	0.9110	892	2.03	0.74	1.0667
울릉	129	1.53	-0.19	0.9838	129	2.44	1.47	1.1302
합계	6,861	1.83	-0.77	0.9256	6,861	1.96	0.69	1.0594

표 3.2.13은 최고풍속이 발생시 ECMWF 모델결과와 WRF 모델결과를 관측치와 비교한 통계결과를 나타낸 것이다. 여기서 표 3.2.12와 비교하여 ECMWF 결과는 Bias가 전체 자료에서는 0.85인데 반해서 최고풍속시의 결과에서 -0.77로 감소하였으며, Ratio도 전체

자료에서 1.0462에서 최고풍속에서는 0.9256으로 감소하였다. 그러나 WRF 결과는 ECMWF와 마찬가지로 전체자료의 통계치보다 최고풍속의 통계치가 Bias는 0.85에서 0.65로 약간 감소한 반면, Ratio는 1.0461에서 1.0594로 오히려 증가하였다. 이는 자료의 시간간격이 작을수록 최대값은 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

비태풍시 해상풍 자료로 ECMWF와 WRF자료를 비교한 결과 WRF자료가 더 관측치와 유사한 것으로 나타났기 때문에, WRF모델 결과를 입력자료로 파랑산출을 수행하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 파랑모델은 WW3를 사용하였으며, 경도 117~143도, 위도 20~50도 범위의 영역에서 1/12도 격자망을 구성하여 1979~2013년의 35년간에 대하여 파랑산출을 수행하였다. 파랑모델의 수행조건으로 파향스펙트럼의 방향성분 개수는 32개, 주파수 성분 개수는 25개로 설정하였으며, 적분시간 간격은 150초로 하여 파랑산출 결과는 매 1시간 간격으로 저장하였다. 저장되는 자료는 파랑모델의 전 격자점에서의 파고, 주기, 파향 뿐만 아니라 관측자료와의 정밀 비교를 위해 관측지점의 격자점에서는 파향스펙트럼을 저장하였다. 저장된 자료는 약 7만개의 계산격자점에서 35년간 매 1시간 간격의 파랑자료로 약 900GB의 저장공간을 차지하고 있다.

해상풍 산출결과와 관측자료를 비교한 것과 같이 파랑산출결과도 기상청 기상부이의 관측자료와 비교 검증하였다. 기상청 부이의 파랑관측자료는 관측시스템 구축 초기에는 설치 위치 등에 문제가 있는 것으로 파악되었다. 거문도, 거제도, 동해의 경우에는 어느 시점을 전후로 관측치에 대한 모델치의 비율이 큰 차이가 있으며, 이는 관측기기의 재설치 시기와 일치되어 있어 설치위치 또는 관측센서의 변경이 있었을 것으로 생각된다. 따라서 모델의 정확한 검증을 위해 거문도와 거제도의 관측자료는 2006년 10월 이후의 자료만을 사용하였고, 동해는 2010년 10월 이후의 자료만을 사용하였다. 그림 3.2.59는 2013년 12월에 대해 파랑모델 산출결과와 기상청 파랑 관측치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 고파랑 발생하는 시각에 대해서는 다소 차이가 있을 수 있으나 모델의 최고값과 관측치의 최고값은 비교적 유사한 결과를 보이고 있다. 표 3.2.14는 최고파랑 발생시에 대해서 WRF모델 결과로부터 산출된 파랑산출자료의 최고치와 관측자료의 최고치에 대한 비교결과를 나타낸 것이다.

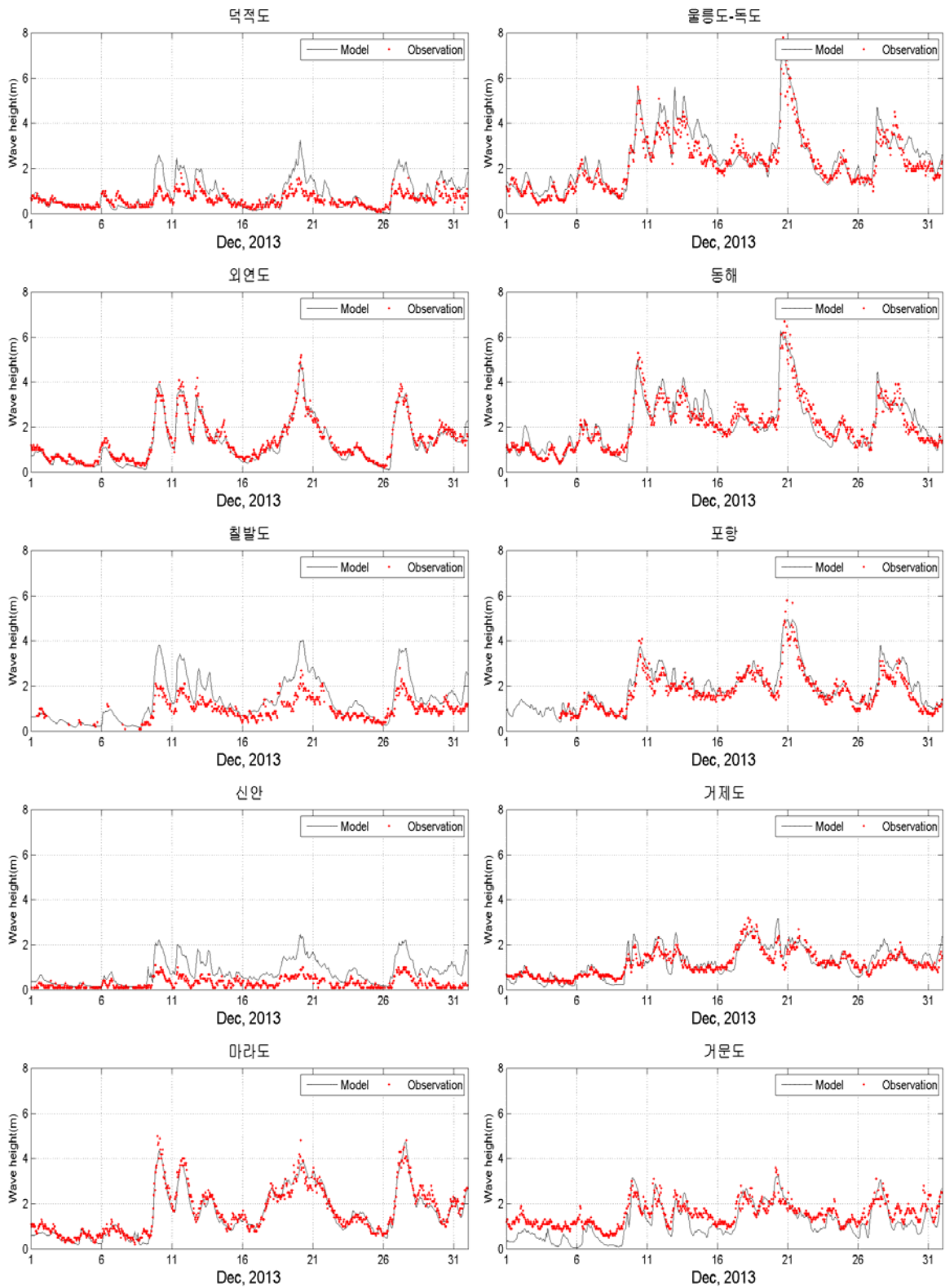


그림 3.2.59 ECMWF와 WRF모델결과의 관측자료와의 시간별 비교

표 3.2.14 WRF 모델결과에 의한 파랑산출 결과와 관측치와의 비교(최고파랑시)

	N	RMSE	Mean	Bias	Ratio
덕적도	11	0.78	3.41	0.42	1.1265
외연도	71	0.36	3.82	0.00	0.9981
칠발도	208	0.57	3.97	-0.22	0.9427
서해해역	290	0.53	3.69	-0.14	0.9632
마라도	110	0.58	4.01	0.01	0.9998
거문도	37	0.85	3.70	0.39	1.1045
거제도	46	0.81	3.85	0.29	1.0737
남해해역	193	0.68	3.83	0.15	1.0375
포항	90	0.65	4.02	-0.07	0.9743
동해	75	0.65	4.20	0.14	1.0239
울릉	39	0.98	4.37	0.61	1.1318
동해해역	204	0.71	4.22	0.13	1.0226
전체	687	0.63	3.98	0.02	1.0017

(나) 장기산출결과의 분석

앞에서 기술한 바와 같이 비태풍시에는 WRF 모델을 사용하여 산출한 정밀 기상자료를 사용하였고 태풍시에는 태풍해상풍모델에 의해 산출된 바람자료를 사용하여 WW3 모델을 수행하였다. 비태풍시는 1979~2013년의 35년간 장기간의 파랑산출자료를 생산하였으며, 태풍시에는 1951~2013년의 63년간 우리나라 주변해역에 영향을 끼친 277개 태풍을 선정하여 파랑산출을 수행하였다. 파향에 따라 파랑의 장기적인 통계특성의 차이가 크게 나타나므로 연안구조물의 설계에 있어서 파향은 매우 중요한 요소이다. 비태풍시와 태풍시의 파향에 따른 특성을 비교하기 위해 같은 기간의 자료를 사용하였다. 즉 태풍시에 파랑산출을 수행한 277개 태풍 중에서 1979~2013년의 35년간 152개 태풍자료만을 비교 분석에 사용하였다. 그림 3.2.60은 비태풍시와 태풍시의 파향별 최대파랑의 공간분포를 비교한 것이다. 그림 3.2.61은 비태풍시와 태풍시의 파향별 최대파랑의 차이에 대한 공간분포를 나타낸 것이며, 여기서 양의 값은 태풍시의 최대파랑이 비태풍시의 최대파랑보다 큰 것을 의미한다.

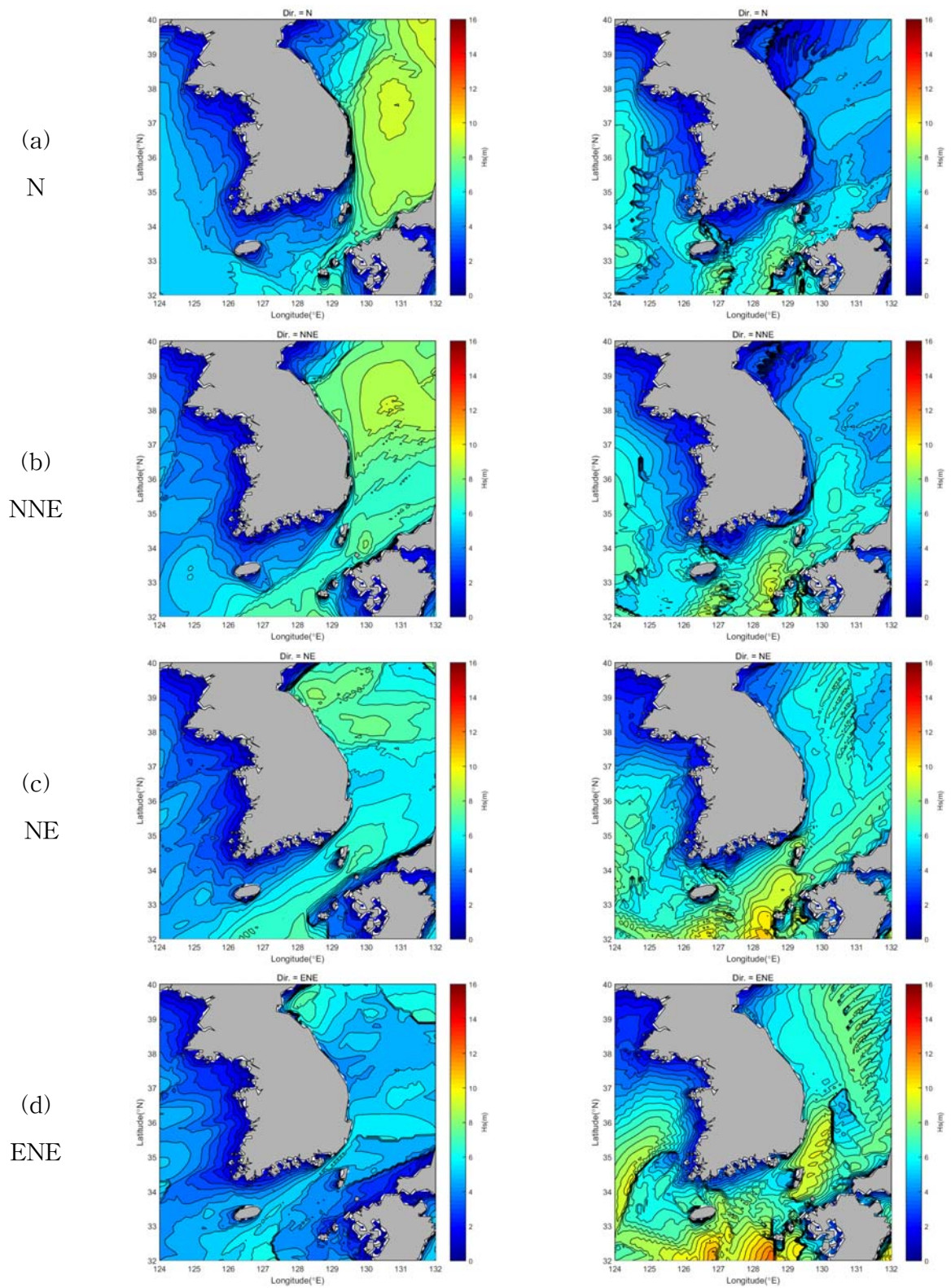
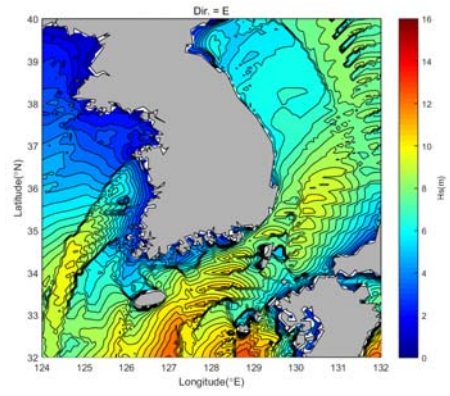
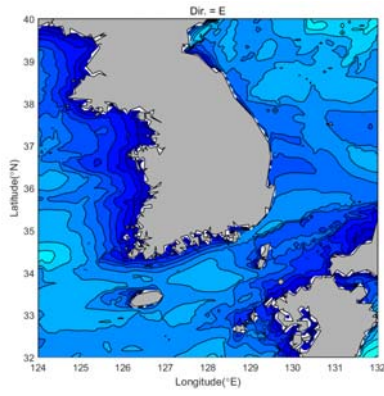
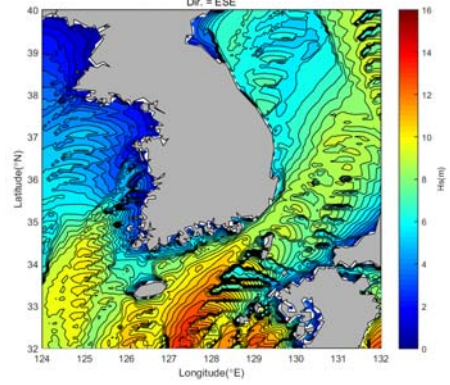
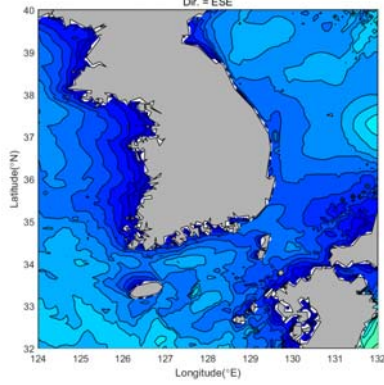


그림 3.2.60 16개 방향별 비태풍시(왼쪽)과 태풍시(오른쪽) 최대파랑의 비교

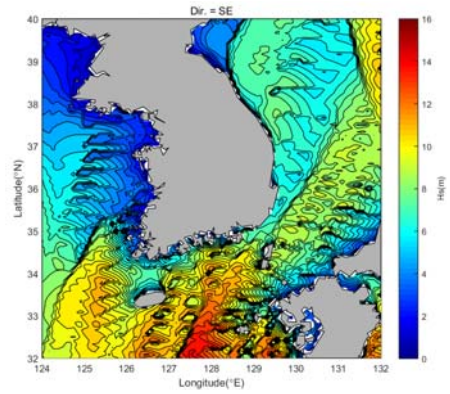
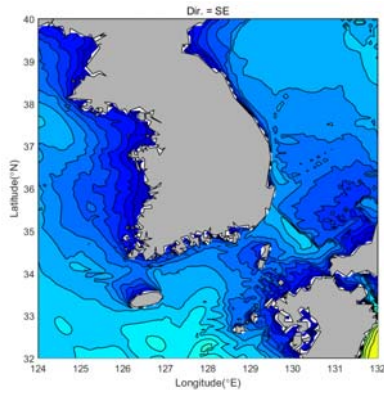
(e)
E



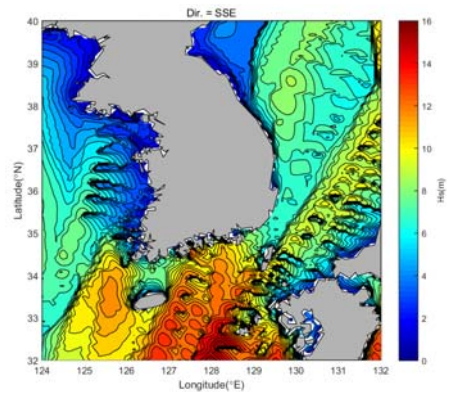
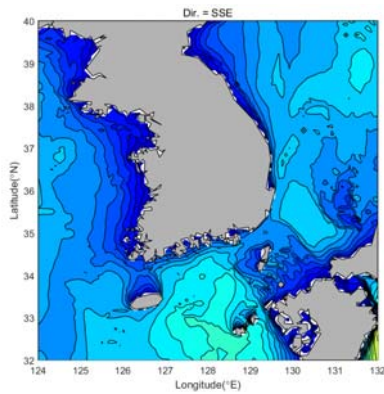
(f)
ESE



(g)
SE

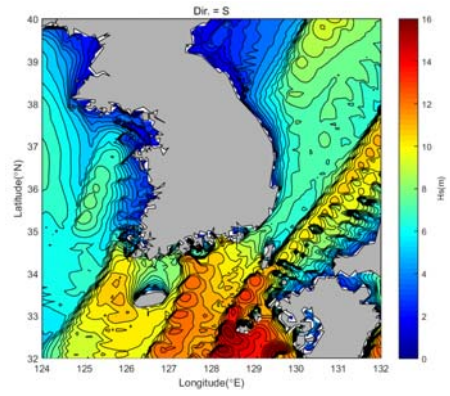
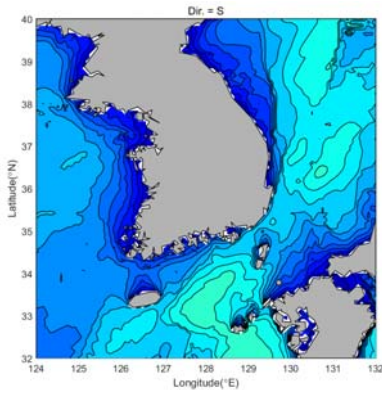


(h)
SSE

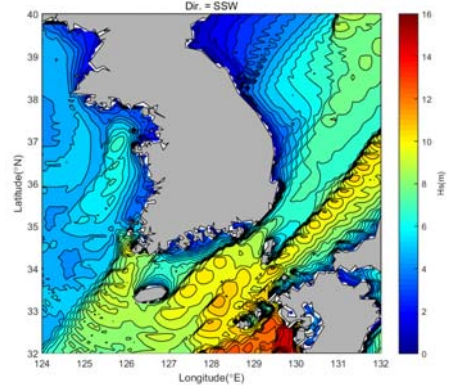
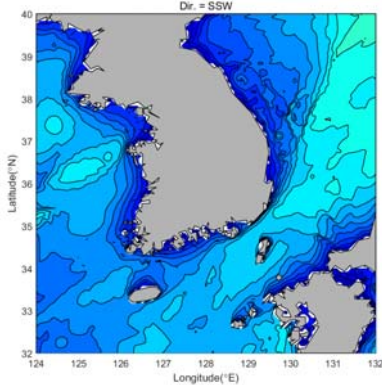


(계속)

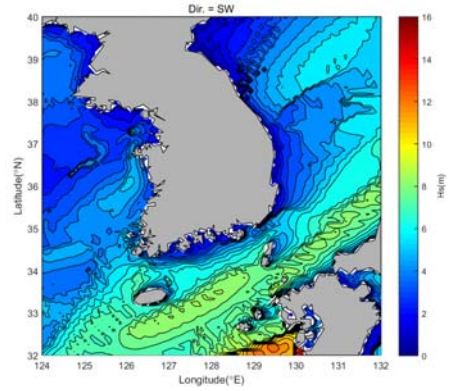
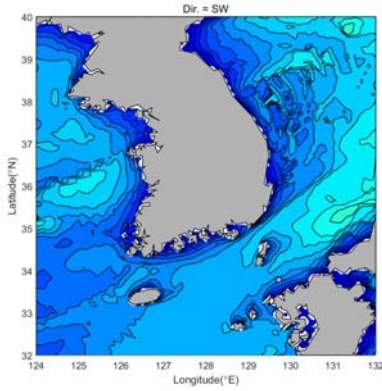
(i)
S



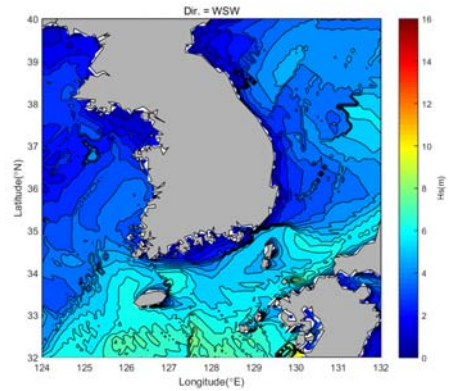
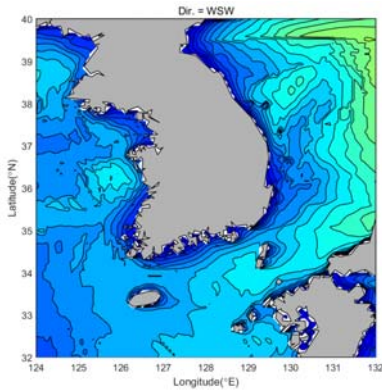
(j)
SSW



(k)
SW

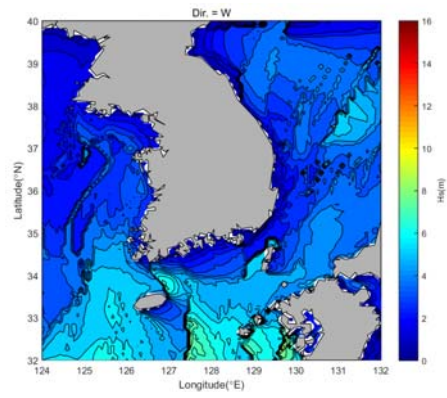
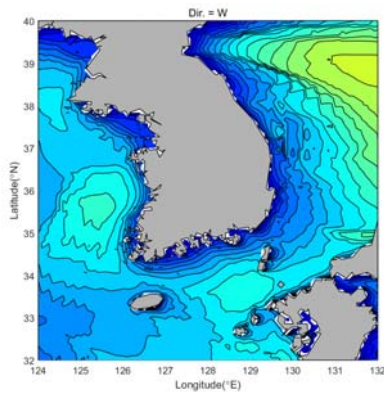


(l)
WSW

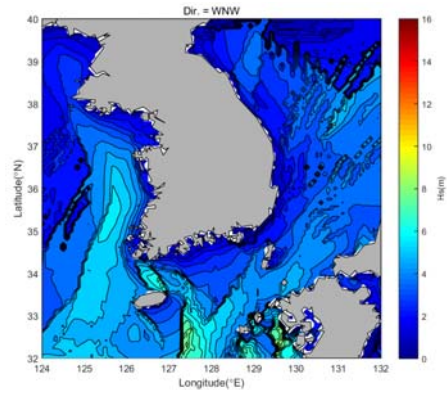
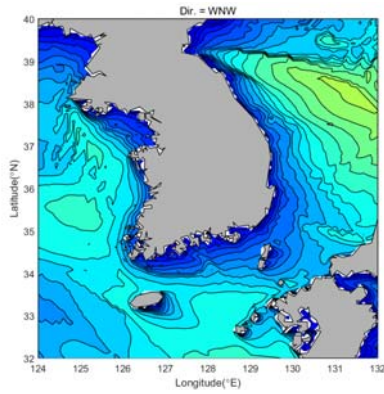


(계속)

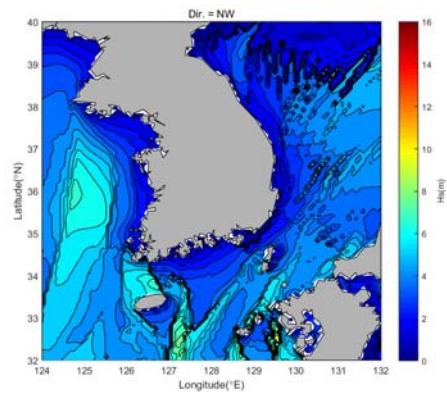
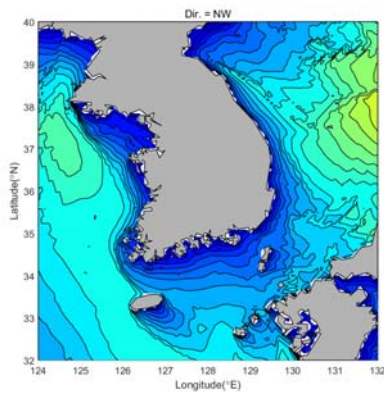
(m)
W



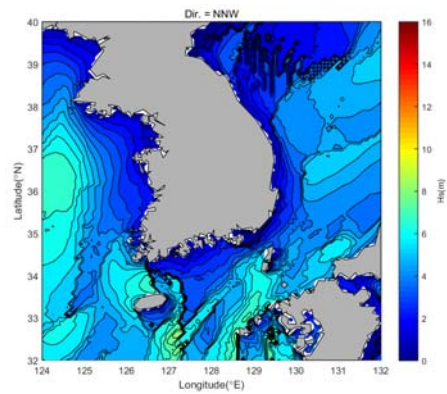
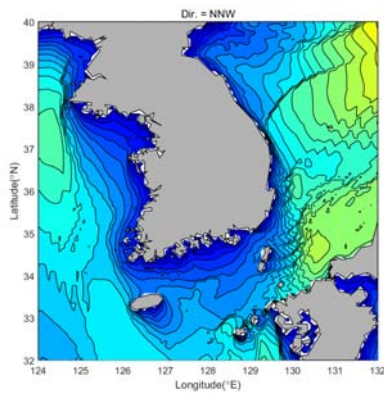
(n)
WNW



(o)
NW



(p)
NNW



(계속)

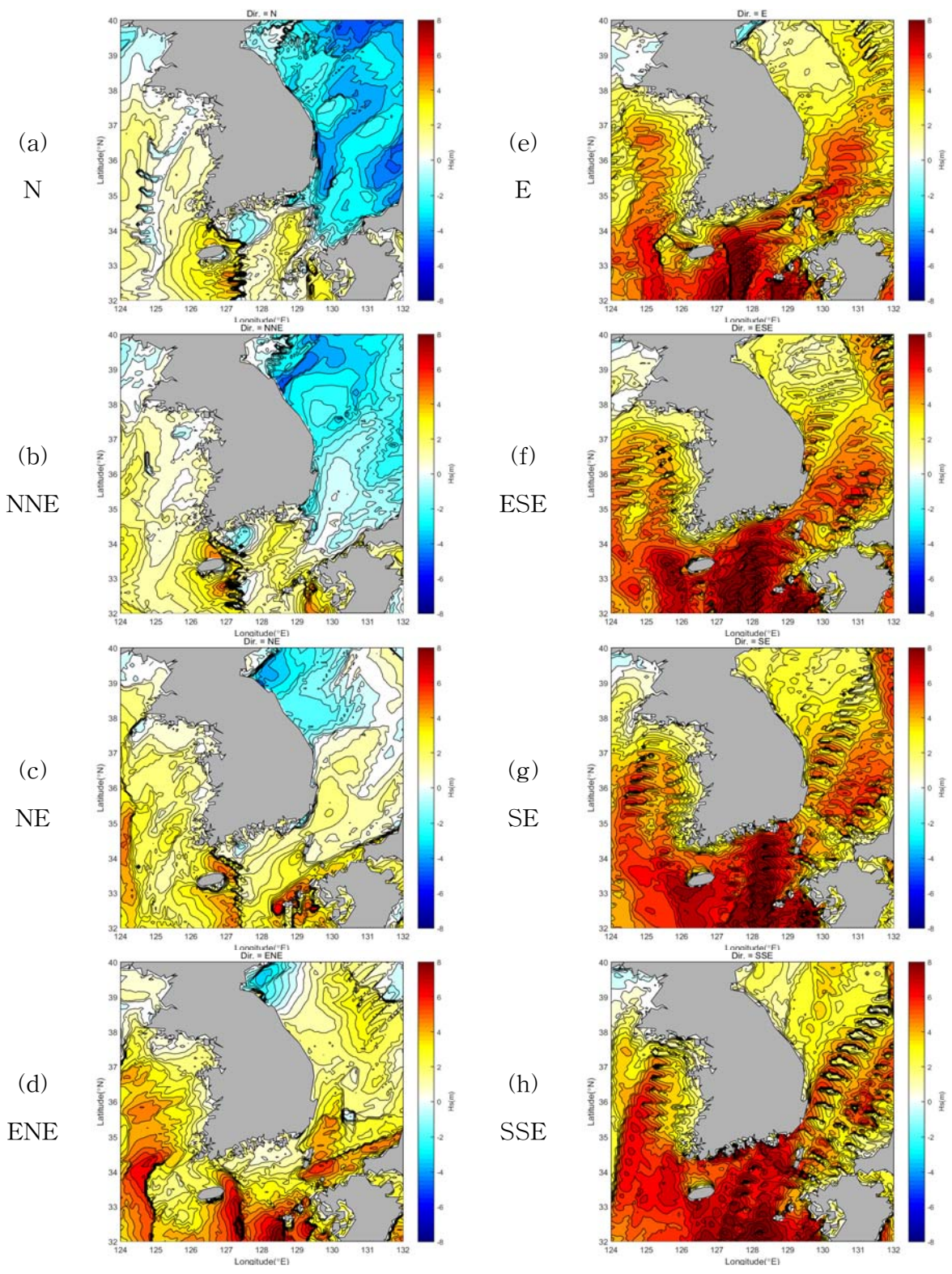
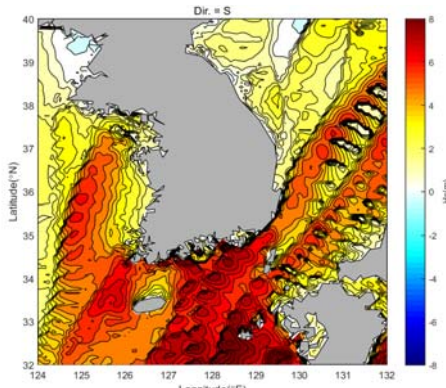
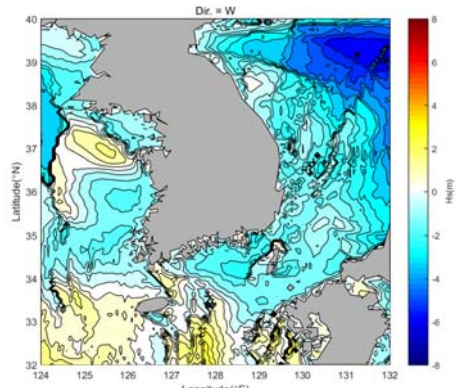


그림 3.2.61 16개 방향별 태풍시와 비태풍시 최대과랑의 차이

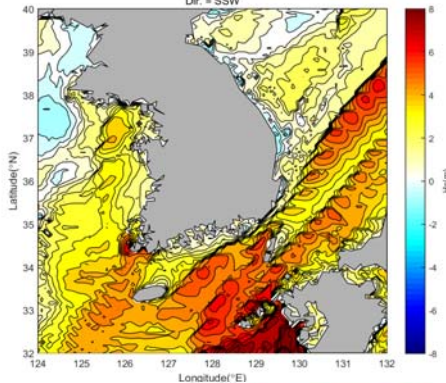
(i)
S



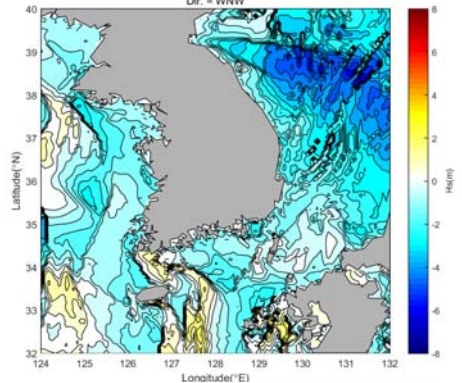
(m)
W



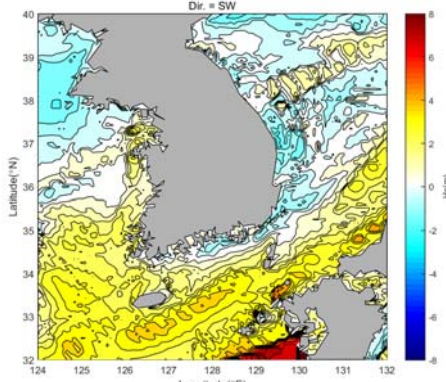
(j)
SSW



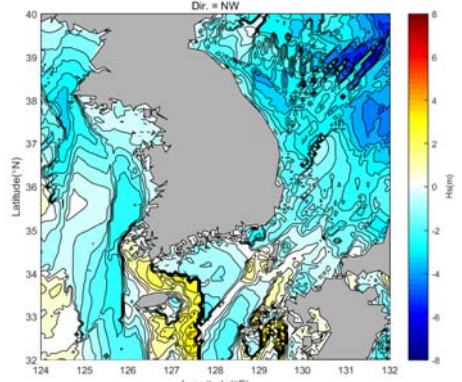
(n)
WNW



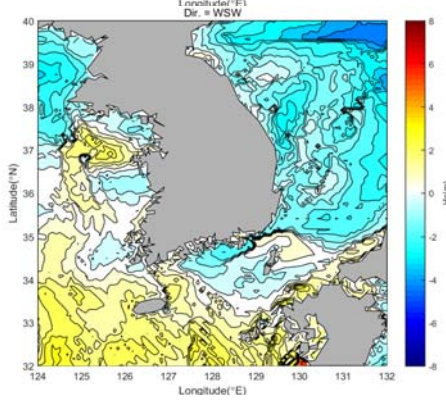
(k)
SW



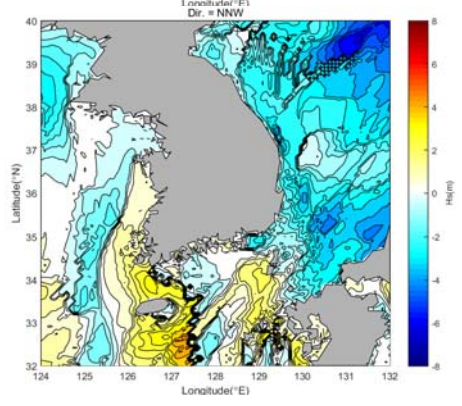
(o)
NW



(l)
WSW



(p)
NNW



(계속)

(다) 파랑재해위험도 평가

기후변화에 따른 미래 파랑 변화를 전망하여 파랑에 의한 재해 위험도를 평가하기 위해서는 파랑의 극치에 대한 장기적인 경향성을 분석하여야 한다.

그림 3.2.62은 년최대파랑의 년변화율의 공간분포를 나타낸 것이다. 여기서 전라도와 강원북부를 제외하고는 우리나라 연안에서 파고가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그림 3.2.63은 태풍시와 비태풍시를 구분하여 년최대파랑의 년변화율을 나타낸 것이다. 여기서 비태풍시에는 우리나라 주변해역에서 전반적으로 년최대파랑이 증가하는 경향을 보이고 있으나, 서해와 남해연안에서는 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 태풍시에는 남해와 서해에서 주요 태풍이동경로를 따라 큰 증가추세를 보이고 있어서, 전체적으로는 비태풍시의 서남해 연안의 감소추세의 영향을 지우고 있다. 또한 비태풍시의 변화율은 최대 약 ± 2 cm/year인 반면, 태풍시의 변화율은 약 ± 4 cm/year 이상으로 나타나 비태풍시의 변화율보다 2배 이상의 변화폭을 갖는 것으로 나타났다.

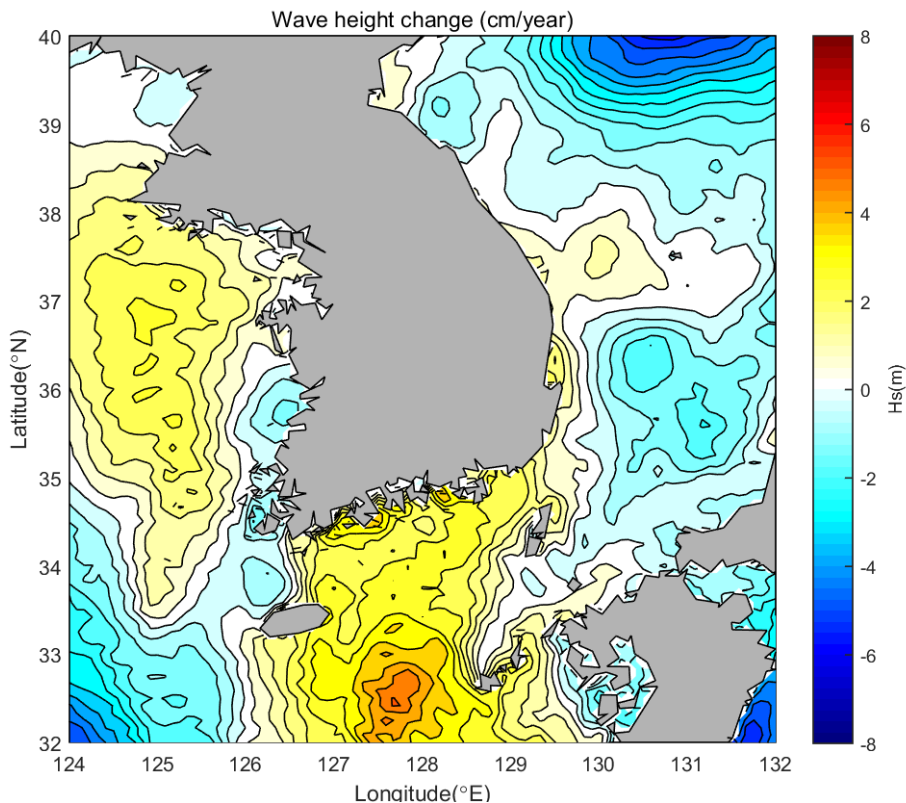
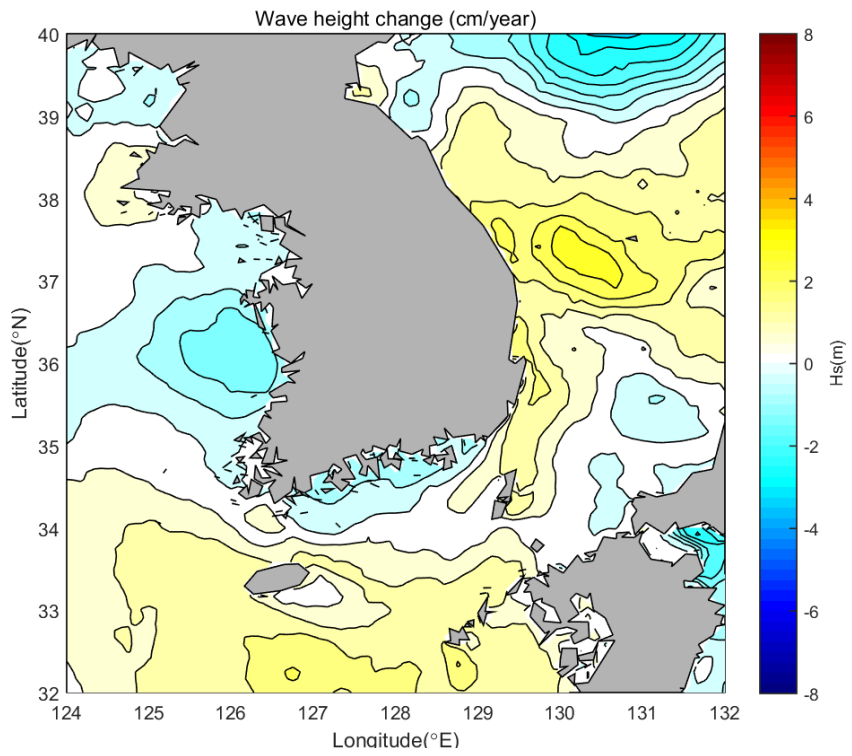
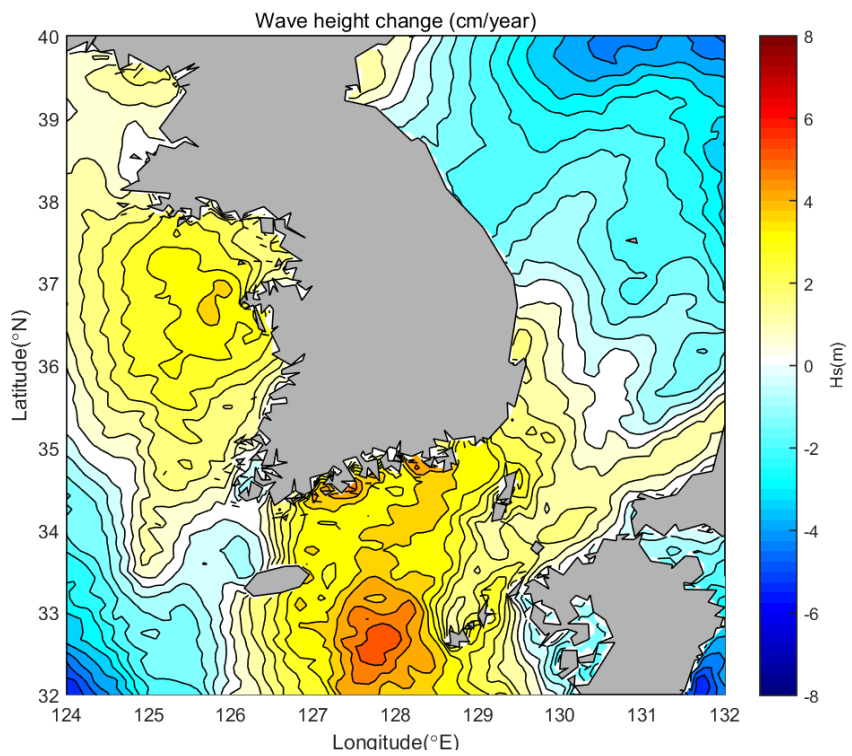


그림 3.2.62 년 최대파랑의 년변화율(cm/year)



(a)



(b)

그림 3.2.63 년 최대파랑의 년변화율 (a) 비태풍시, (b) 태풍시

파랑에 의한 재해는 주로 연안에서 발생하며, 연안구조물이 직접적인 피해를 보는 경우가 대부분이다. 연안구조물은 구조물의 사용연한과 중요도를 고려하여 파랑의 지역적 특성에 맞추어 연안구조물의 설치 및 설계를 수행하고 있다. 우리나라에서는 방파제 등의 설계에 50년 빈도 설계파를 적용하고 있다. 그림 3.2.62, 3.2.63에서 보는 바와 같이 남해 일부 연안에서는 약 4cm/year 정도의 년 최대파랑의 증가율을 보이고 있으며, 이는 연안구조물의 설치시의 설계파보다 사용연한 50년 이후의 설계파가 약 2m 정도 증가할 수 있다는 것을 의미한다. 설계파의 산출시에 주로 과거의 통계학적 파랑 특성이 가까운 미래에도 변하지 않는다는 가정에 따라 구조물 설치후 사용연한까지 발생할 수 있는 최대파랑으로 설계파를 산정하고 있으나, 기후변화가 극심한 현 상황에서는 기후변화를 고려한 설계파의 산출방법에 대한 연구가 필요하다.

제 3 절 극한환경극복 대응기술 개발

1. 수중 생존자 탐지형 청음 시스템

가. 1차년도 연구결과

(1) 수중생존자 청음 시스템 개요

수중생존자 청음 시스템 개념은 그림 3.3.1과 같으며, ① 침몰선에 수중생존자 탐지형 청음센서 부착, ② 침몰선 내 음향신호탐지를 통한 생존자 유무 확인, ③ 수중통신을 통한 침몰선 내 음향신호를 침몰선에서 유선으로 연결된 수중청음기로 전송하여 생존자 유무를 확인한다.

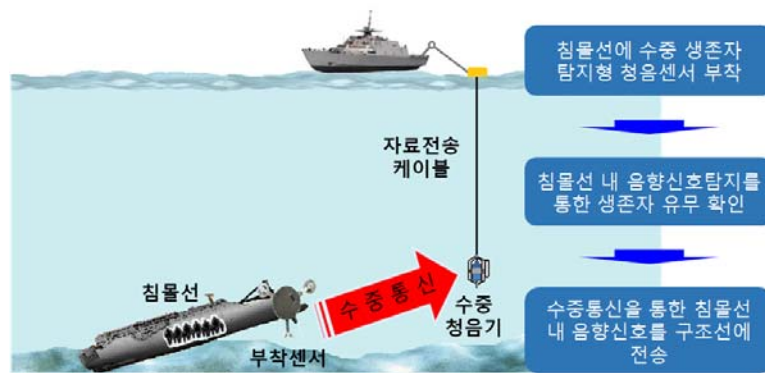


그림 3.3.1 수중 생존자 탐지형 청음 시스템 개념도

부착형 수중청음센서와 수중통신모뎀 장치 구성은 수중청음센서부에서 음향신호탐지 후 수중통신을 통한 음향신호 전송하는 방식이다 (그림 3.3.2).

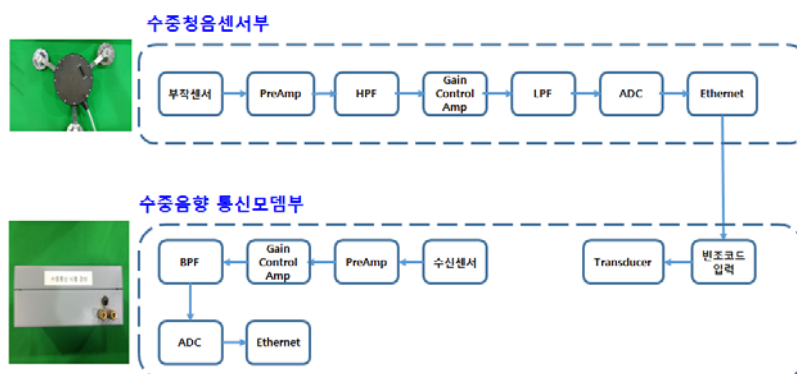
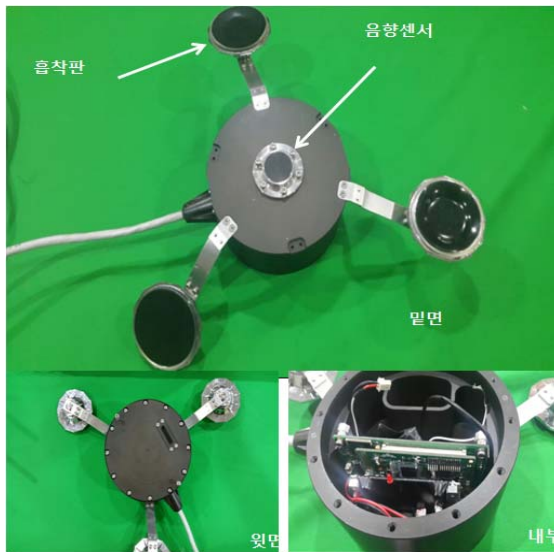


그림 3.3.2 부착형 수중청음센서와 수중통신모뎀 장치 구성도

(2) 수중생존자 탐지형 청음 시스템 모듈 설계 및 제작

1차년도에 부착형 수중청음센서와 수중통신모뎀 모듈을 설계하였으며, 프로토타입의 시제품을 제작하였다. 부착형 수중센서부 장치는 그림 3.3.3 상단과 같으며, 선체 부착을 위하여 흡착판을 이용한 개념을 도입하였으며, 음향센서를 시제품 바닥에 배치하였다. 그리고 수중통신 모뎀 장치는 그림 3.3.3의 하단과 같고 수중통신을 위한 모듈을 제작하였다.



[부착형 수중센서부 장치 사양]

구분	성능
신호 주파수 대역	2kHz
수신센서 감도	-210 dB
전치 증폭기 게인	20 dB
수신 신호 고정 증폭	15 dB
가변 제어 증폭 게인	0 ~ 36 dB
ADC 분해능	12 bit
최대 운용 수심	100 m



[수중무선 음파통신 모뎀 장치 사양]

구분	성능
컴퓨터 통신	Ethernet 100 Base
신호 주파수 대역	2 kHz
전송 신호 분해능	12 bit
송신신호 변조 방식	BPSK
송신신호 주파수	
전치 증폭기 게인	20 dB
수신 신호 고정 증폭	15 dB
ADC 분해능	12 bit

그림 3.3.3 부착형 수중청음기(상), 수중통신모뎀장치(하) 실물 사진 및 장치 사양

(3) 수중생존자 탐지형 청음시스템 구동 방법 및 가시화 프로그램 개발

수중생존자 탐지형 청음시스템의 구동 방법은 음향신호를 부착형 수중청음기에서 수신

하고, 수중통신 시험장치로 전송하며, 수중통신 시험장치에서는 변조된 신호를 수신기에 전송하는 방식이다(그림 3.3.4). 그리고 신호 변조 방법은 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 기법을 이용하며, 수신시 신호를 복조하여 재생한다.

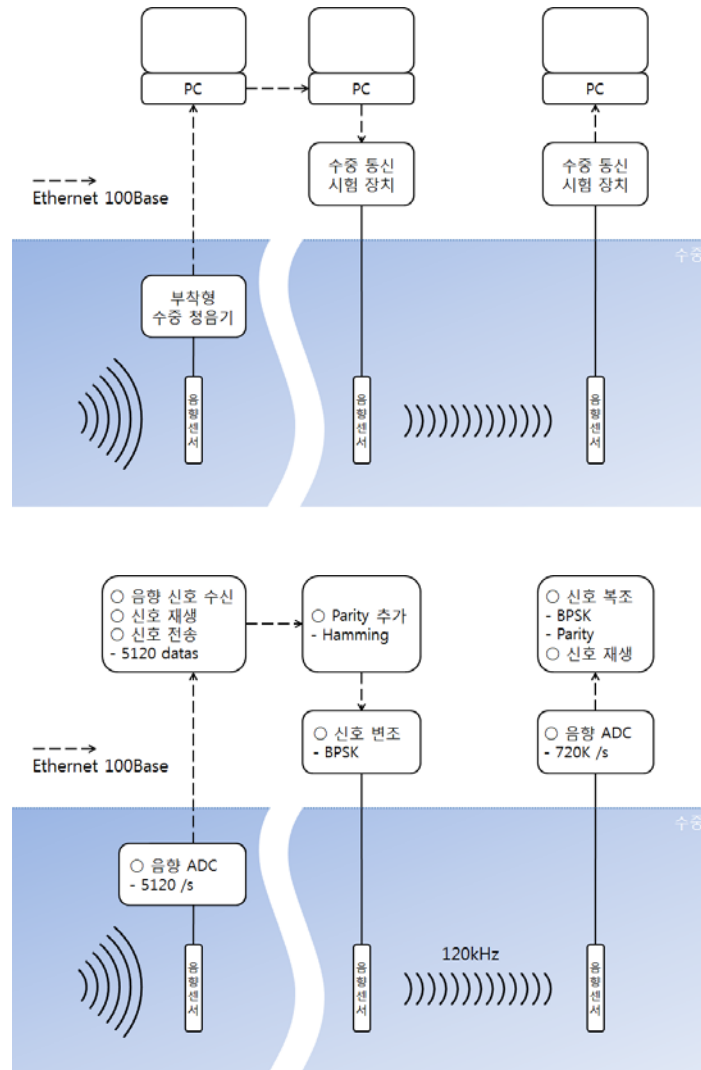


그림 3.3.4 장비 구동방법 diagram

부착형 수중청음기에서 획득한 음향자료를 실시간 분석하기 위하여 부착형 수중청음 가시화 프로그램 개발을 개발하였다(그림 3.3.5). 가시화 프로그램은 총 6개의 조작부로 만들어져 있으며, ① 부착형 수중 청음기에 접속(접속 시 녹색 점등), ② 수중 음향 통신 시험장치 User Application에 접속(접속 시 녹색 점등), ③ 현재 소리데이터 전송, ④ 음

량 설정(음소거), ⑤ 녹음/정지, ⑥ 음향데이터 전시로 구성하였다.

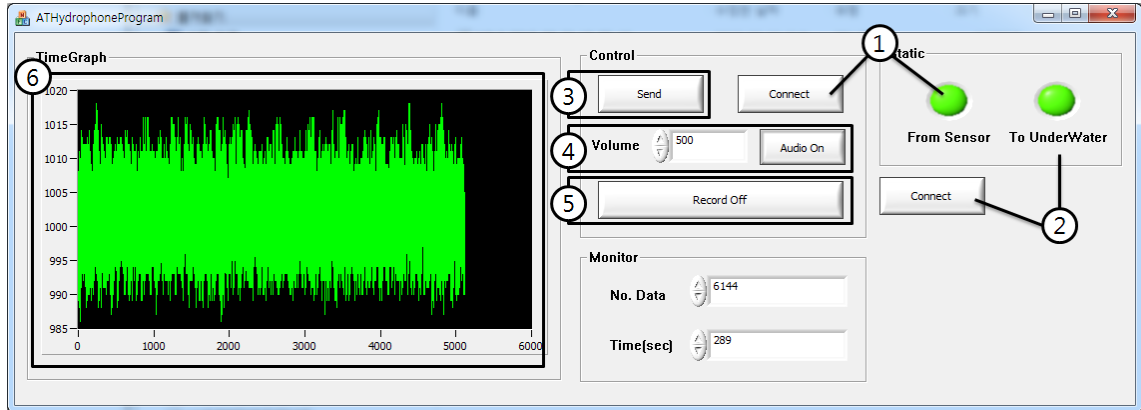


그림 3.3.5 부착형 수중청음 가시화 프로그램

그리고 수중 음향 통신 시험장치 가시화 프로그램 개발을 개발하였다(그림 3.3.6). 수중 통신 가시화 프로그램은 ① 수중 음향 통신 시험장치 접속, ② 음량 설정/음소거, ③ 부착형 수중 청음기 시스템 접속 알림 등, ④ 신호처리 상태 디버깅 윈도우, ⑤ 신호처리 이전의 최초 수신 신호 전시, ⑥ 신호처리 이후 실 데이터 전시로 구성하였다.

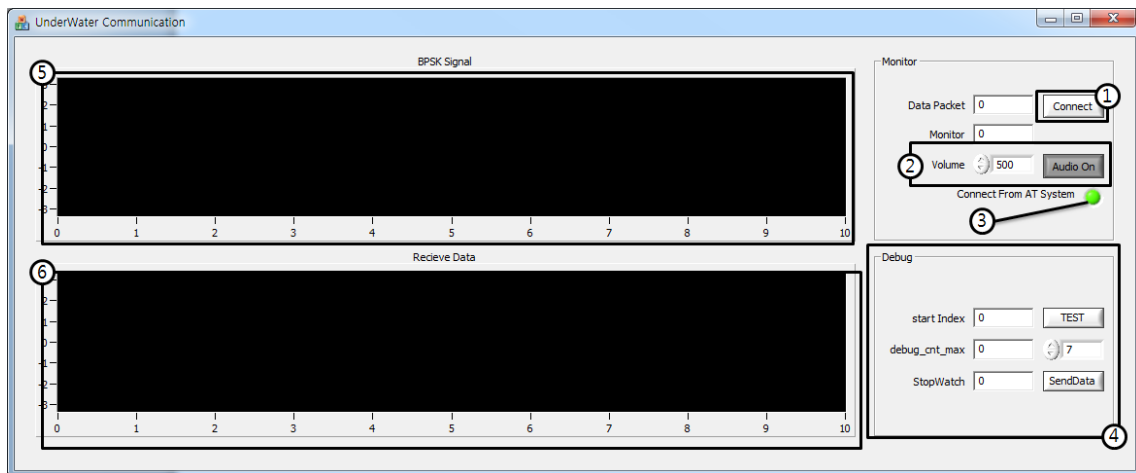


그림 3.3.6 수중 음향 통신 시험장치 가시화 프로그램

(4) 수중생존자 탐지형 청음시스템 프로토타입 시제품 실험 결과

수중 생존자 탐지형 청음시스템 프로토타입 시제품을 실험하기 위하여 송신신호(충격

과음)을 이용하여 아래와 같은 순서로 실험을 하였다.

송신신호 충격과음 → 수신파형 변조(BPSK) 부착형 청음기에서 수신파형 → Coherent Multiplication 처리 → 로우패스필터(LPF) 처리 → 음향 데이터(symbol rate) 복구 → Parity bit 제거 → 수신 자료 복조

충격신호를 송신하여 부착형 수중청음기에서 수신하고, 수중통신을 이용하여 전송된 신호가 수신기에서 유사한 신호로 재생되었다. 현재까지 약 70% 신호 재현 수준으로, 추후 알고리즘 및 수중통신 관련 업그레이드가 필요하다.

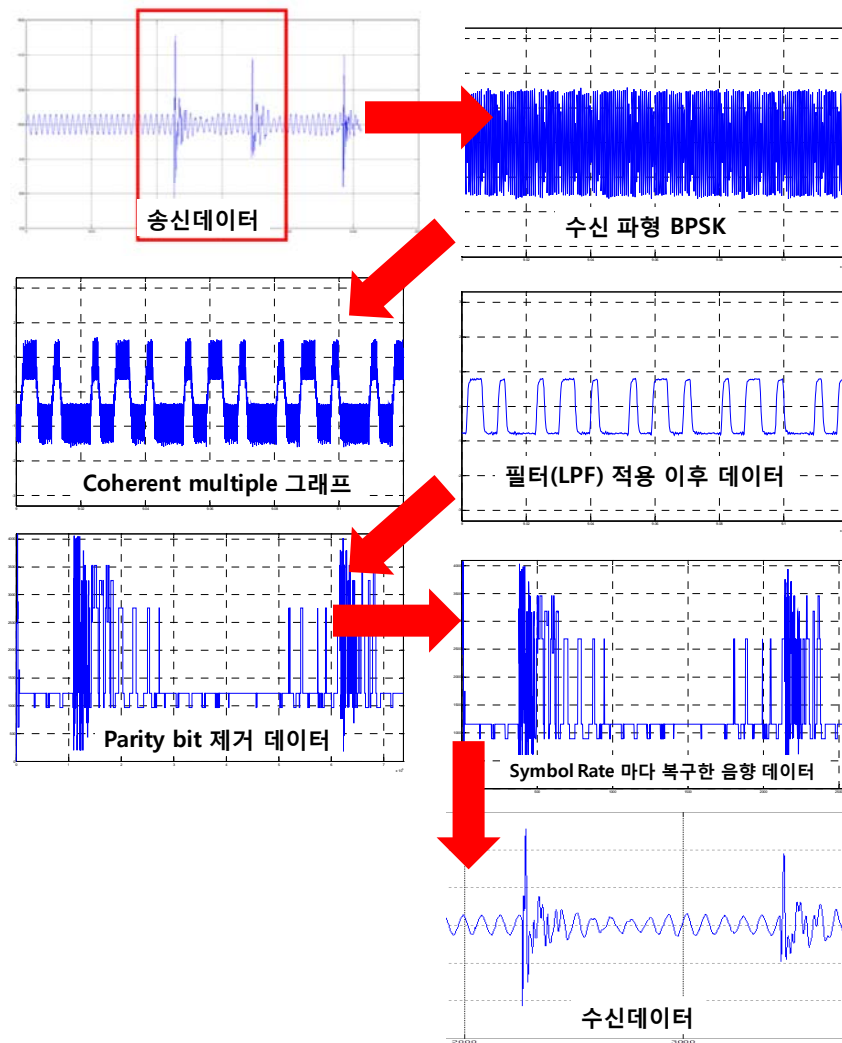


그림 3.3.7 시제품 시험 결과

나. 2차년도 연구결과

(1) 수중 생존자 탐지형 청음시스템 제작

수중 생존자 탐지형 청음시스템의 운용 개념은 그림 3.3.8에 표현하였다. 먼저 침몰선에 수중생존자 탐지형 청음센서를 부착하고, 청음센서에서 획득한 음향자료를 수중통신을 통하여 신호를 송신하고 수신부에서 수신한다. 침몰선 주변에 설치한 부이에서 Wi-Fi 통신을 이용하여 구조선으로 실시간 신호를 전송한다. 최종적으로 주변의 구조선에서 음향신호를 확인하여 생존자 유무를 판단한다.

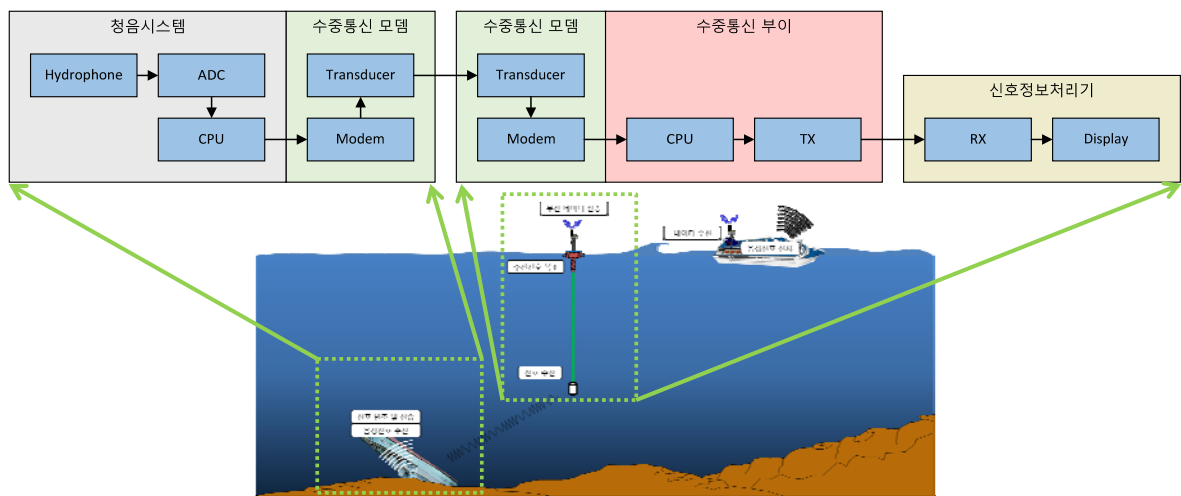


그림 3.3.8 수중 생존자 청음시스템 운용 개념

1차년도에 제작한 프로토타입 시제품의 부착방식은 압착식으로 제작하였다. 이 방법을 사용하여 다양한 재질에 테스트한 결과 부착력이 저조하였다. 2차년에는 이 부분을 보강하기 위하여 수중청음기 기구물 형상을 변경하였다(그림 3.3.9). 침몰선을 철선으로 한정하고 부착이 용이하도록 마그네틱 베이스로 설계하여 제작하였다. 그리고 스위치를 사용하여 부착과 탈착이 용이하도록 제작하였다.

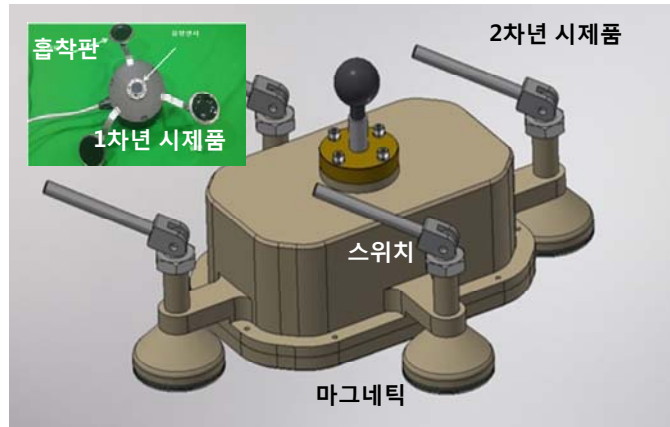


그림 3.3.9 부착형 수중청음기 기구물 형상

실시간 음성 신호 전송을 위하여 신호 복조 회로를 설계하고 제작하였다(그림 3.3.10). 청음시스템 회로는 먼저 Hydrophone에서 획득한 신호를 신호전처리하여 증폭한다. 음성 신호를 ADC 및 이진화하여 디지털신호를 생성하고 송신된 신호를 변조하여 트랜스듀스를 통하여 송신한다. 실시간 음성신호 확인은 프로그래밍으로는 한계가 있었으며, 실시간 신호 획득을 위하여 변조 시간을 회로에서 직접 수행하는 신호 복조 회로를 제작하였다.

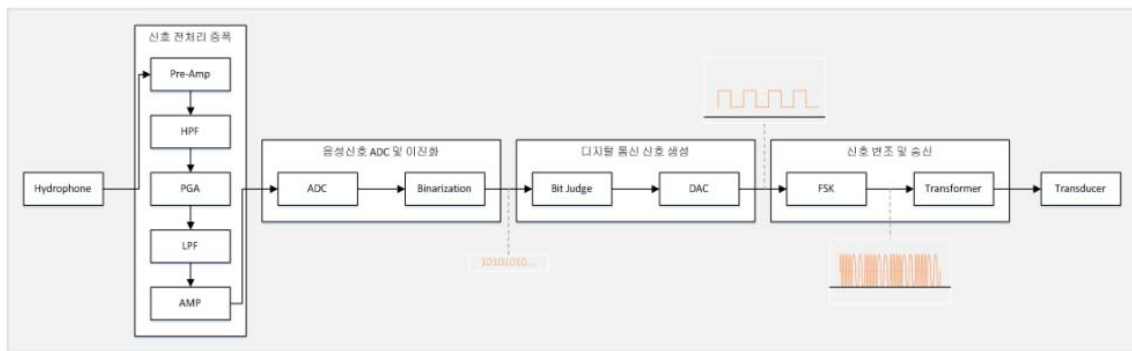


그림 3.3.10 청음시스템 Block Diagram

수중통신 부이는 그림 3.3.11과 같이 트랜스듀스에서 신호를 송신하여 신호 전처리 증폭을 한다. 그 이후에 수신 신호를 복조하고 디지털화하며, 음성신호 합성하여 Wi-Fi 전송한다.

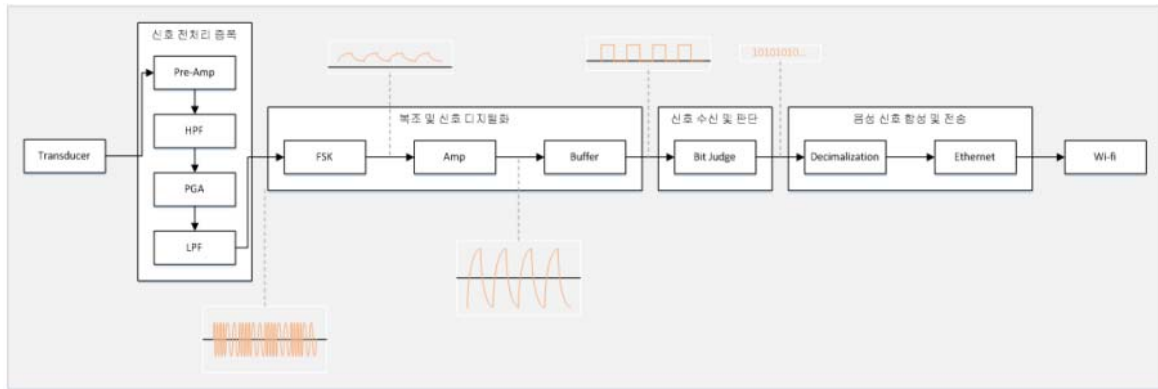


그림 3.3.11 수중통신부이 Block Diagram

(2) 수중 생존자 탐지형 청음시스템 수조 시험

2차년도에 청음시스템 음성 복조 시험을 수조공간에서 수행하였으며(그림 3.3.12), 청음시스템 음성 복조 시험 결과 실시간 원음 99.9% 복조를 확인하였다(그림 3.3.13).

구분	성능
Ethernet	10/100 auto sensing
통신거리	300m / 최대 5km
전력소비	3.6Watts
방진/방수	IP66
운영체제	Windows 7

```

    graph LR
      A[Wi-fi] --> B[전산기]
      subgraph B [전산기]
        B1[신호 전시] --> B2[신호 재생]
      end
  
```

그림 3.3.12 신호정보처리기 성능 및 실험 사진

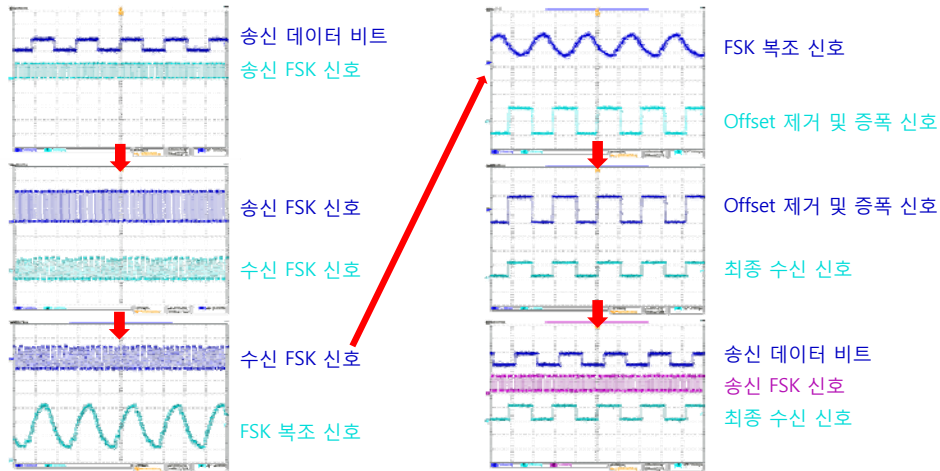


그림 3.3.13 청음시스템 음성 복조 시험 결과

다. 3차년도 연구결과

(1) 수중 생존자 탐지형 청음시스템 시제품 제작

3차년도에는 1~2차년도 동안 개념설계하고 제작한 프로토타입 시제품의 단점을 보완한 수중 생존자 탐지형 청음시스템 시제품 개발을 완성하였다(그림 3.3.14). 시제품은 ① 부착형청음기 1기, ② 수중모뎀 2기(송신용, 수신용) 시스템 적용, ③ WiFi 자료전송 안테나(송신용, 수신용) 시스템 적용, ④ 음성신호 전시장치로 구성하였다. 여기서 연구팀이 직접 개발한 항목은 부착형청음기, 음성신호 전시장치이며, 수중모뎀 및 WiFi 자료전송 시스템은 상용제품을 이용하여 시스템에 적용하였다. 수중모뎀의 경우는 독일의 Evo Logics사의 S2C M 42-65 모델이며, 통신거리 1,000 m, 송신 빔 패턴은 wide-angle 형태, 전송속도 31.2 kbps, 주파수 대역은 42 ~ 65 kHz로 본 연구에 적합한 모델이다.

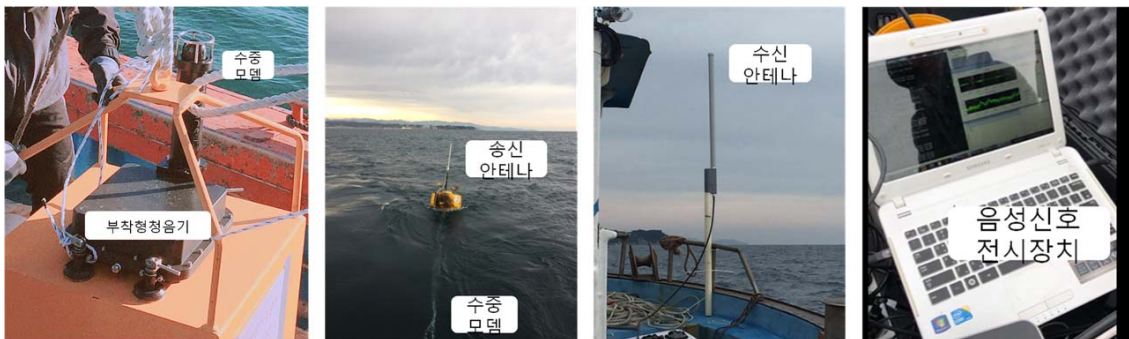


그림 3.3.14 수중청음시스템 시제품 개발 완료

(2) 수중 생존자 탐지형 청음시스템 해상시험 및 검증

(가) 현장실험용 기구 설계 및 제작

3차년도에 제작한 수중 생존자 탐지형 청음시스템 시제품 해상시험을 위해 침몰선박 모사 현장실험용 기구부를 설계하고 제작하였다(그림 3.3.15). 현장실험용 기구의 내부는 공기로 채워져 있고, 부력 없이 물속에 가라앉아야 하며, 수심 40 m 이내까지 수압에 견뎌야 했다. 이를 만족하기 위하여 재질은 강판으로 선정하고, 두께는 5 mm, 크기는 50 × 50 × 30 cm로 설계 및 제작하였다. 기구부 내부에 스피커를 장착하여 내부에서 발생하는 소리음원으로 사용하였다.

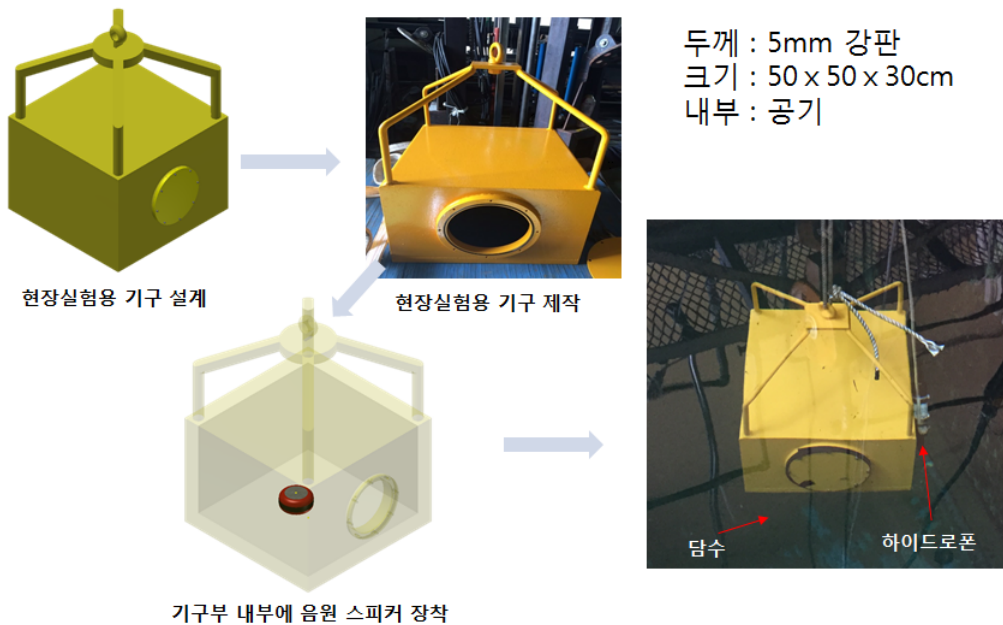


그림 3.3.15 수중청음시스템 시제품 현장실험용 기구 설계 및 제작

(나) 시제품 수조 실험

수중 생존자 탐지형 청음시스템 시제품을 현장실험용 기구부 위에 부착하고 KIOST 수조에서 2가지 음원을 이용하여 수조실험을 수행하였다(그림 3.3.16). 현장실험용 기구부에 청음시스템 시제품을 부착하였으며, 수중통신 모뎀을 이용하여 신호 송신 및 수신하였다. 첫 번째 음원은 사람 음성으로 직접 녹음한 “살려주세요”이며, 두 번째 음원은 타격음으로 준비하였다.



그림 3.3.16 음향 신호 수조실험 전경

그림 3.3.17에 “살려주세요” 음향 신호의 수조실험 결과를 나타내었다. 음원의 spectrogram 결과를 보면 저주파 ~ 고주파 대역까지 음파가 고르게 분포하지만 기구부 외부에서 수신한 음원은 모든 주파수에서 원음보다 해상도가 낮으나, 음성구분은 가능하였다.

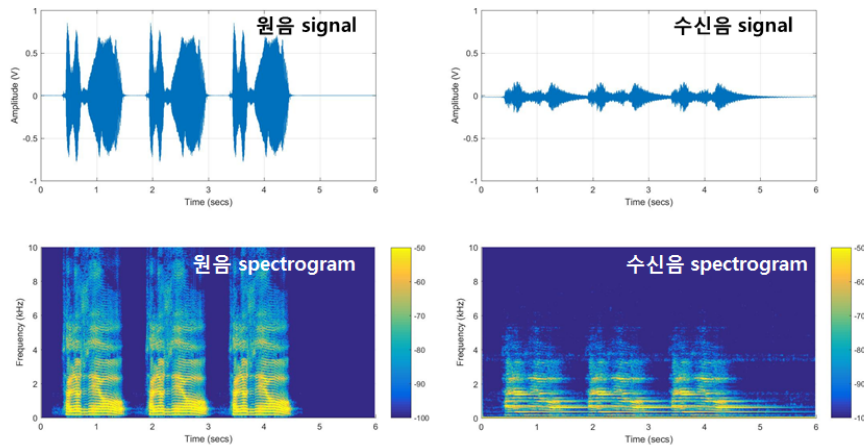


그림 3.3.17 “살려주세요” 음향 신호 수조실험 결과

그림 3.3.18은 타격음 신호 수조실험 결과이다. 음원의 spectrogram 결과에서 음원의 주기적인 성분이 수신음에서도 잘 나타났다.

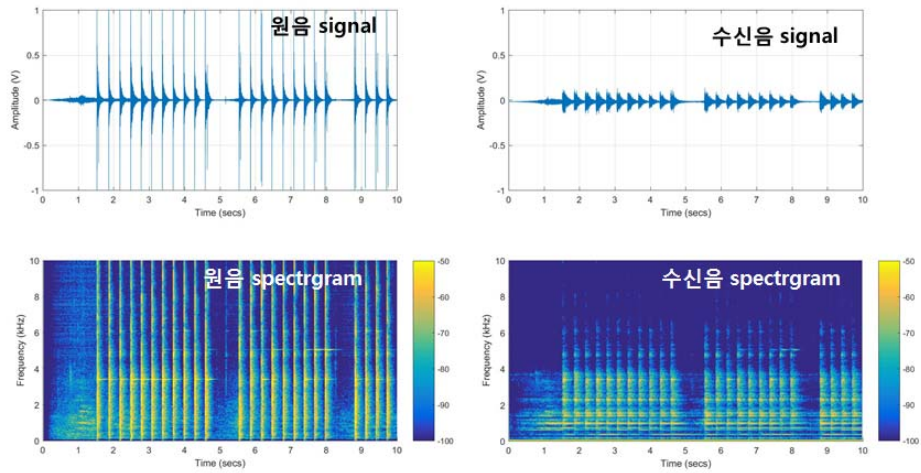


그림 3.3.18 타격음 신호의 수조실험 결과

(다) 해상 시험 및 검증

3차년도에 제작한 수중 생존자 탐지용 청음시스템 시제품 해상시험을 위하여 2017년 10월 30일 ~ 11월 1일에 이틀에 걸쳐 경상북도 울진군 죽변항 인근해역(수심 10 ~ 40 m)에서 수행하였다(그림 3.3.19, 3.3.20).

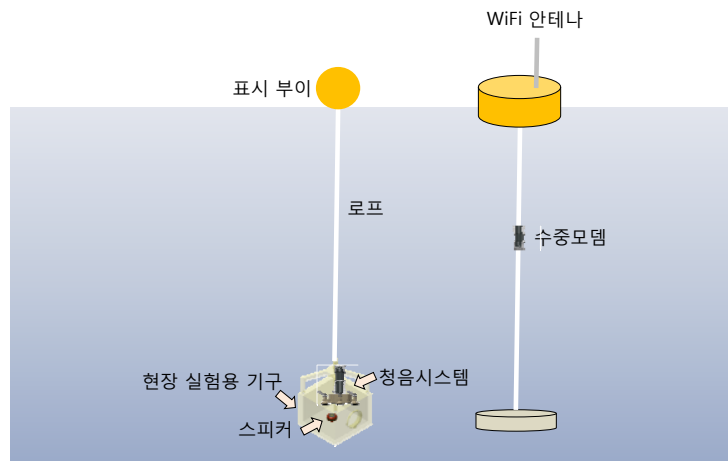


그림 3.3.19 현장 실험 모식도



그림 3.3.20 수중청음시스템 시제품 현장 해상실험 해역 및 현장 사진

해상실험에서 현장실험용 기구내부에 스피커를 부착하였고, 2개의 음향 신호(음성“살려주세요”, 선체내부 타격음)를 구동하여 실험하였다. 내부의 소리를 청음시스템 시제품에서 획득하고, 획득한 신호를 수중통신모뎀을 이용하여 송신, 부이부 수중모뎀에서는 신호를 수신하여 부이부 모듈에서 신호처리후 WiFi 안테나를 통해 선박으로 신호를 전송하였다. 청음시스템에서 획득한 신호가 선박으로 실시간 전송되는 것을 확인하였다.

그림 3.3.21은 음성 “살려주세요” 원음 신호와 수신음 신호를 나타내었다. 청음시스템의 표본화주파수로 인해 원음에서 나타나는 3 kHz 이상 주파수대역의 특성을 파악할 수 없으나, 실시간 전송 및 분석을 통해 생존자의 음성을 확인할 수 있었다. 그림 3.3.22는 선체내부 타격음의 원음과 수신음 신호이며, 그림 3.3.21과 마찬가지로 3 kHz 이하 주파수에서 타격음의 주기성을 확실하게 파악할 수 있었다. 수중생존자 탐지형 청음시스템을 이용한 실시간 수중생존자 탐지 가능성을 확인하였다.

그리고 본 실험에서 수중모뎀 간 거리가 100 m 이상인 경우, 수표면 및 바닥면에서 발

생하는 반사로 인해 수중통신에 제한이 발생하며 실험결과 도출에 어려움이 있었다. 향후 시스템 개발에서는 수중통신 체계 보다는 유선으로 활용하는 것이 현장적용에 적합하다고 판단된다.

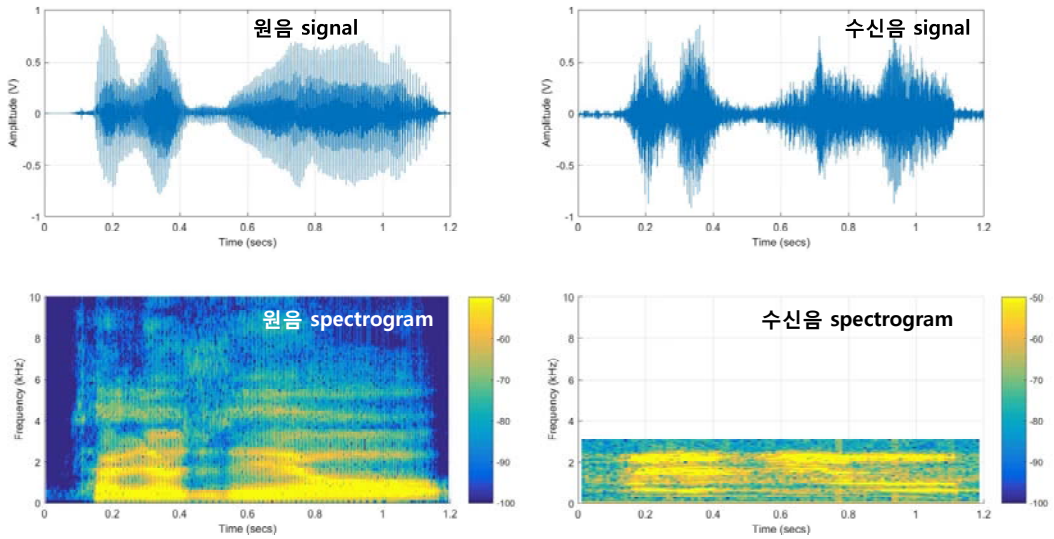


그림 3.3.21 “살려주세요” 음향 신호 해상실험 결과

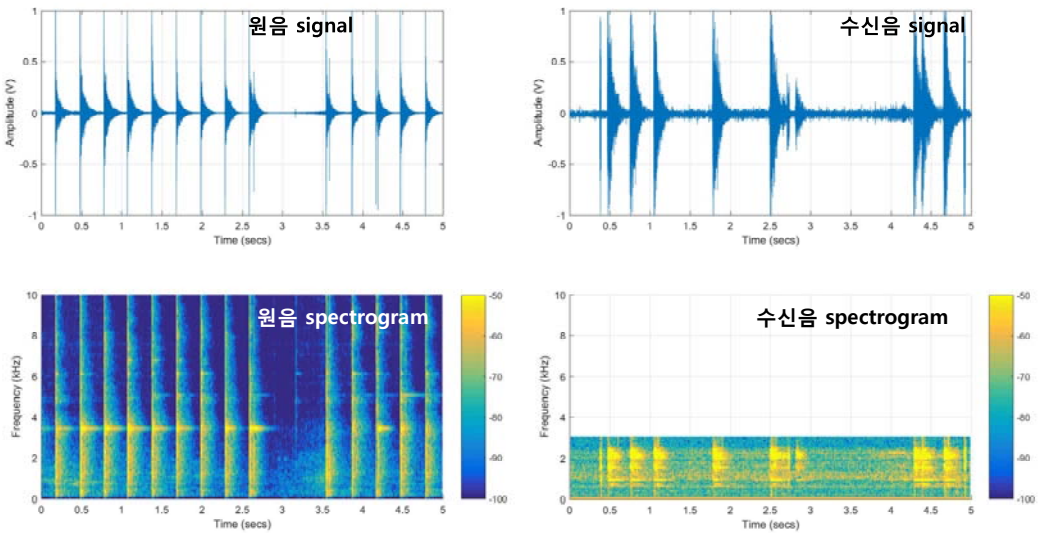


그림 3.3.22 타격음 신호의 해상실험 결과

2. 신속 설치형 부유식 파랑저감 구조물

가. 부유식 파랑저감 구조물 선행연구 조사

(1) 신속설치방파제

해상에서 파랑을 감쇠시키기 위해 제안된 방법 중 하나가 미 육군 공병단(US Army Corps Engineering)에서 개발한 신속설치방파제 (Rapidly Installed Breakwater; RIB)이다 (Briggs et al., 1999; Briggs, 2001).

처음 군사적인 목적으로 개발되기 시작한 RIB는 미 해군의 해상전략 변경으로 완전한 실용화에는 성공하지 못한 것으로 알려져 있다. 그러나 그 개념은 해상 군사작전뿐만 아니라 민간 부문에서 상업적 용도로 활용될 수 있다 (Fowler et al., 1996). 특히 해상 공사 중 비교적 주기가 짧은 파랑의 파고 저감을 위한 임시 구조물 설치 등에는 활용 가능성이 높다.

RIB의 개발 목표는 신속설치가 가능한 부유식 방파제를 이용하여 Sea State 3 조건의 파랑을 Sea State 2 조건으로 입사파 파고를 50% 저감하는 것이었다. 또한 Sea State 5 조건에서 구조적 내구성을 확보하는 것을 요구 성능으로 제시하였다.

표 3.3.1 Sea State의 정의

Sea State	Wave height	Characteristics
0	0 m	Calm (glassy)
1	0 ~ 0,1 m	Calm (rippled)
2	0,1 ~ 0,5 m	Smooth (wavelets)
3	0,5 ~ 1,25 m	Slight
4	1,25 ~ 2,5 m	Moderate
5	2,5 ~ 4 m	Rough
6	4 ~ 6 m	Very rough
7	6 ~ 9 m	High
8	9 ~ 14 m	Very high
9	> 14 m	Phenomenal



그림 3.3.23 해상 군사작전을 위한 RIB 개발

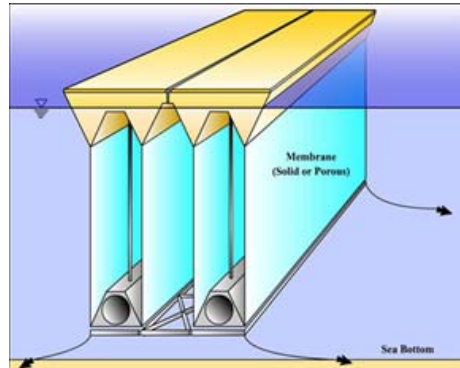


그림 3.3.24 RIB의 개념도



그림 3.3.25 RIB 실험역 실험 전경

RIB 연구가 수년 동안 이루어졌기 때문에, 그 사이에 개발된 구조물의 형태에도 여러 가지 변화가 있었다. 강성구조(hard structure) 형식으로 개발된 RIB는 XM99라고 명명되었으며, 여러 차례의 수리모형실험 및 WAMIT을 이용한 수치모델링을 거쳐 1999년 5~6월에 미국 플로리다 Cape Canaveral 해역에서 실험역 성능시험이 이루어졌다. 당시 제작된 XM99의 제원은 76.2m(L) × 7.3m(H) × 2.4m(W) 이었으며, 목표로 삼은 파랑저감 성능을 대체로 만족하였다. 그러나 XM99의 두 다리가 연결되는 대형 핀에 하중이 집중되고, 해상 설치 시 핀을 연결하는 작업이 어렵다는 문제점이 발견되었다.



그림 3.3.26 평면수조에서의 RIB 실험 모습



그림 3.3.27 XM99 모형의 실험역 실험

한편 연성구조(soft structure) 형식의 RIB도 개발되었는데 최초로 개발된 RIB는 Hydro RIB라고 불렸으며, 1997년 플로리다 Pensacola 해역에서 실증 테스트가 이루어졌다. 부채 형식의 RIB를 감개(spool)에 감아서 현장으로 운반한 후, 펌프로 해수를 주입하는 구조 형식으로 제작되었다.



그림 3.3.28 Hydro RIB 모형



그림 3.3.29 Hydro RIB 실험역 설치 모습

XM2000은 Hydro RIB를 개선한 모델로서 부체 주변에 고강도 섬유를 부착하여 강도를 증진시킨 구조였다. 또한 에너지 흡수 기능이 있는 탄성 섬유 Seaflex를 사용하여 계류 시스템을 개선함으로써 부체에 작용하는 하중 흡수력을 향상시키고 계류 각도를 상향시켜 RIB의 섬유 면적을 감소시킬 수 있었다. 2000년에 Pensacola 해역에서 실험역 실험이 이루어졌으며 대체로 만족스러운 과량저감 효과를 거두었다.

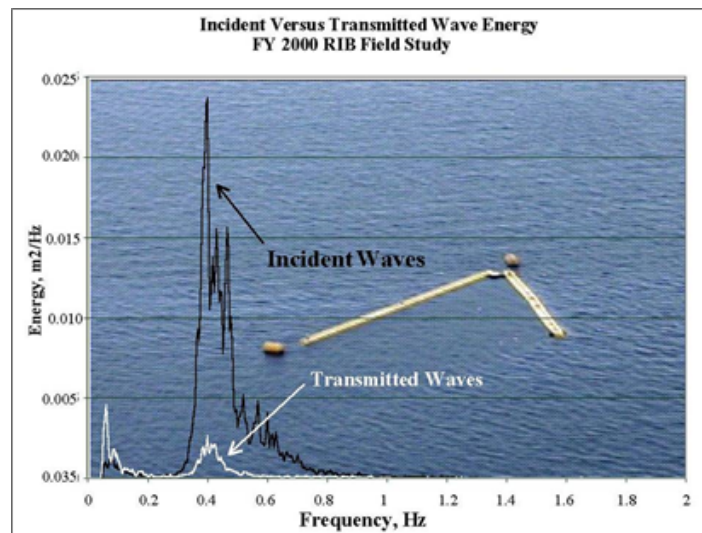


그림 3.3.30 XM2000 모델의 실험역 실험에 의한 과량저감 효과

XM2001은 XM2000을 더욱 개선한 모델로 부체를 케블라 섬유 망으로 둘러싸서 보강하였으며, 트레일러에 탑재하여 육상 운송을 함으로써 이송 효율성도 개선하였다. 또한

해수 펌프 밸브의 구조를 개선하고 아코디언처럼 펼치는 형식의 새로운 설치방법을 시도하였다. 그러나 이 방법은 설치하는 쉬우나 회수가 어렵다는 문제점이 발견되었다.



그림 3.3.31 XM2001 모델의 설치 장면



그림 3.3.32 XM2001 모델의 이송 방법

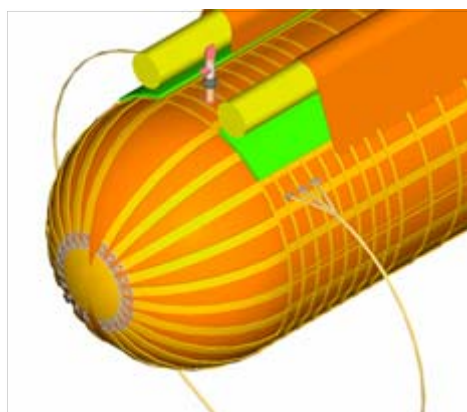


그림 3.3.33 XM2001 모델의 해수 펌프 밸브 구조

(2) 신속설치방파제 개발 연구진 면담

RIB를 개발한 미 육군공병단 공학연구센터(ERDC)를 방문하고 해당 연구에 참여했던 Dr. Melby와 Dr. Fowler를 만나서 RIB 관련 자료를 입수하고 부유식 파랑저감장치 개발에 관한 의견을 수렴하고 신형식 파랑저감장치 개발 방향에 관해 토의하였다.

Rapidly Installed Breakwater (RIB)

Jimmy Fowler, PhD
Jeffrey Melby, PhD

14 September 2015
Presentation for
Dr. Sang-Ho Oh
Korea Institute of Ocean Science and Technology

US Army Corps of Engineers

CONDENSED HISTORY OF RIB PROGRAM

ERDC
Innovative solutions for a safer, better world

RIBS TIME LINE

FY95	FY96	FY97	FY98	FY99	FY00	FY01	FY02
6.2 Funding				(ATD) ACQUISITION			
1995 Concept dev. & LAB Studies				6.3 Funding			
June 1996 1/4-scale tests at Duck, NC		May 99 Ocean-scale RIBS deployment Begin Transition to Procurement		FY 02 Final ATD RIBS deployment and tests*		Summer 01 First ATD RIBS field tests	
August 1997 1/3-scale tests of modular/soft structure at Pensacola, FL							

ERDC
Innovative solutions for a safer, better world

Final Design of RIB Main Hull

Full scale Main Hull being assembled at fabricator's facility

ERDC
Innovative solutions for a safer, better world

DEPLOYMENT/RECOVERY MECHANISM

RIB R&D Status Summary

- ORD (Army) was approved Jan 00
- Full Scale 400 ft RIB Section successfully deployed in 2001
- Final ATD demonstration - Test date to be announced; likely in mid to late August 2002 in Cape Canaveral, FL
- Exit Criteria will be evaluated
 - Barge mounted deployment mechanism will be demonstrated
 - Pressurization, inflation, & mooring times will be monitored
 - 28 ft diameter, 400 ft long segments
 - 800 ft will be delivered via 5 flatbed trailers
 - VIP invitations will be issued in June or early July 2002
- Working with Navy Coastal Systems Station (Panama City to investigate feasibility of Ship Attached RIB)

ERDC
Innovative solutions for a safer, better world

나. 부유식 파랑저감 구조물 수치모델링

미 육군 공병단에서는 RIB 성능을 평가하기 위해 실내 실험실 실험 및 현장실험을 수행하였는데, 그 주요 데이터를 관련 보고서(Briggs et al., 2001)에 공개하였다. 본 연구에서는 RIB의 성능을 평가하는 전용 수치모델을 개발하고 가용한 실험 데이터를 이용하여 검증하였다. 특히 최근 여러 연구자들에게 관심을 받고 있는 공개 소프트웨어인 OpenFOAM 기반의 수치모델을 구축하였다.

OpenFOAM은 Navier-Stokes 방정식에 근거한 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 프로그램으로 다양한 유동해석에 폭 넓게 적용될 수 있다. 특히 프로그램 소스가 공개된 무료 소프트웨어이기 때문에 라이선스 비용이 매우 비싼 상용 CFD 소프트웨어의 대안으로서 최근 활발하게 연구 및 현업 적용이 이루어지고 있다. 해안공학 분야에서는 파랑 조파 및 소파 기능을 추가로 개발한 라이브러리(예: Waves2FOAM, IHFOAM 등)들이 최근 제공되고 있으며 (Jacobsen et al., 2012; Higuera et al., 2013), 국내에서도 잠재 주변의 파랑장 해석에 OpenFOAM 모델을 적용한 연구(Lee et al., 2016)가 이루어진 바 있다.

(1) OpenFOAM/Waves2FOAM

OpenFOAM은 Open Field Operation and Manipulation의 약자로 유한체적법으로 편미분방정식을 해석하는 C++로 작성된 오픈 소스 CFD toolbox이다. 주로 유체역학을 위주인 다물리학 해석을 위한 라이브러리 및 solver의 집합으로 대규모 병렬계산을 지원한다. 1990년대 초 영국의 Imperial College에서 개발을 시작하여 2004년말 OpenCFD Ltd.에서 v1.0을 GNU-GPL 라이선스로 공개하였다. 대표적인 연구자로는 Wikki Ltd.의 Hrvoje Jasak 박사와 OpenCFD Ltd.의 Henry Weller 박사가 있다.

OpenFOAM의 라이선스 형태인 GNU-GPL(General Public License, 공중 사용허가서)은 Linux와 동일한 라이선스 형태로 source code가 공개되어 있으며, 누구나 수정 및 재배포가 가능하다. 2차적 저작물에도 동일한 GNU-GPL이 적용된다. 상업적, 비상업적 사용에 제약이 없으며, 개인이나 단체에 대한 차별도 없다. OpenFOAM의 가장 큰 장점은 라이선스 비용이 발생하지 않는 것이다. 대부분의 상용프로그램이 범용으로 개발되는 것과 달리 OpenFOAM 프로그램들은 전용으로 개발되기 때문에 문제에 최적화 되고 사용이 단순하다. 또한, 숙련된 사용자의 경우 비교적 빠른 시간에 새로운 형태의 전산열유

체역학(CFD) 프로그램 작성이 가능하며, 필요에 따라 독자적인 물리모델을 적용할 수 있다.

다양한 상용 프로그램들의 입출력 형식으로 OpenFOAM의 데이터를 변환하거나 OpenFOAM의 데이터를 상용프로그램 형식으로 변환시키는 프로그램들이 개발되어 있어 호환이 가능하다. 현재 Version 4.1까지 발표 되었으며 전 세계 여러 기관에서 OpenFOAM을 연구개발에 활용하고 있다. CFD 해석 프로그램 개발에 있어서 OpenFOAM은 아래 그림 3.3.34와 같이 C++ 라이브러리와 그 라이브러리로 개발된 Application(어플리케이션)으로 구성되어 있다. 어플리케이션은 solver와 utility로 구성되는데, solver는 유동해석을 위한 프로그램이 해당되며, utility는 전 후처리 또는 형식변환 등에 필요한 프로그램을 의미한다.

본 과제에서 개발된 CFD 해석 프로그램의 파도 생성과 감쇄는 OpenFOAM으로 작성된 라이브러리인 Waves2FOAM을 기반으로 하였다 (Jacobson et al., 2012). Waves2FOAM은 다양한 이론파를 경계면과 계산영역에서 생성시킬 수 있다. 유입 경계면만을 이용하여 파도를 생성하는 경우에 경계면에 파이론으로 계산된 속도와 수위를 매 시간단계마다 재정의 하는 방법을 이용하고, 일정한 계산영역을 설정하여 파도를 생성하거나 감쇄시키는 경우 계산영역의 속도와 수위를 재정의하게 된다.

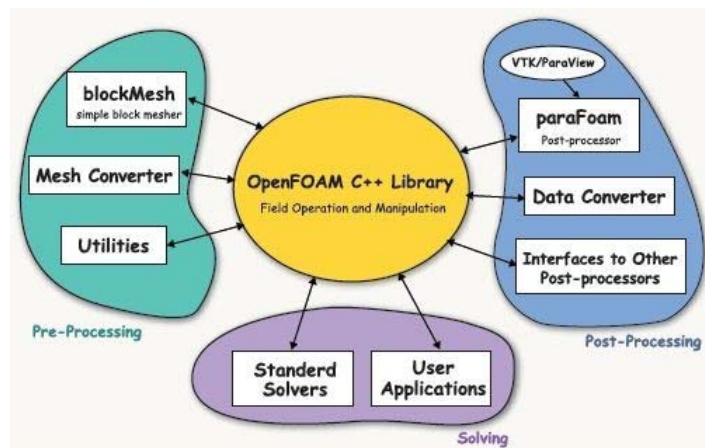


그림 3.3.34 OpenFOAM 기능 구성

(2) 2차원 조파 테스트

기본적인 waves2FOAM library 동작 확인을 위해 아래 그림과 같은 2차원 영역에서 조파 해석을 진행 하였다. 수심은 1m이고, 파장 5m, 파고 0.1m, 주기 1.94초인 Stokes 2차 파도 이론 모델을 적용하였고, 출구부근에서의 소파를 위해서 waves2FOAM의 relaxation zone 기법을 x=51~56m 영역에 적용하였다. 격자 간격은 파방향으로 0.05m, 파고 방향으로 0.0075m로 설정하였다.

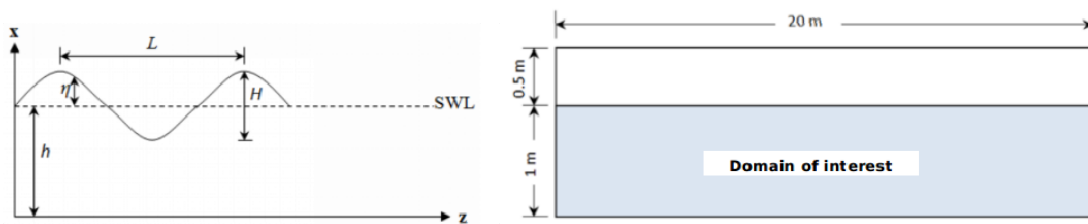


그림 3.3.35 2차원 조파 테스트 해석 영역

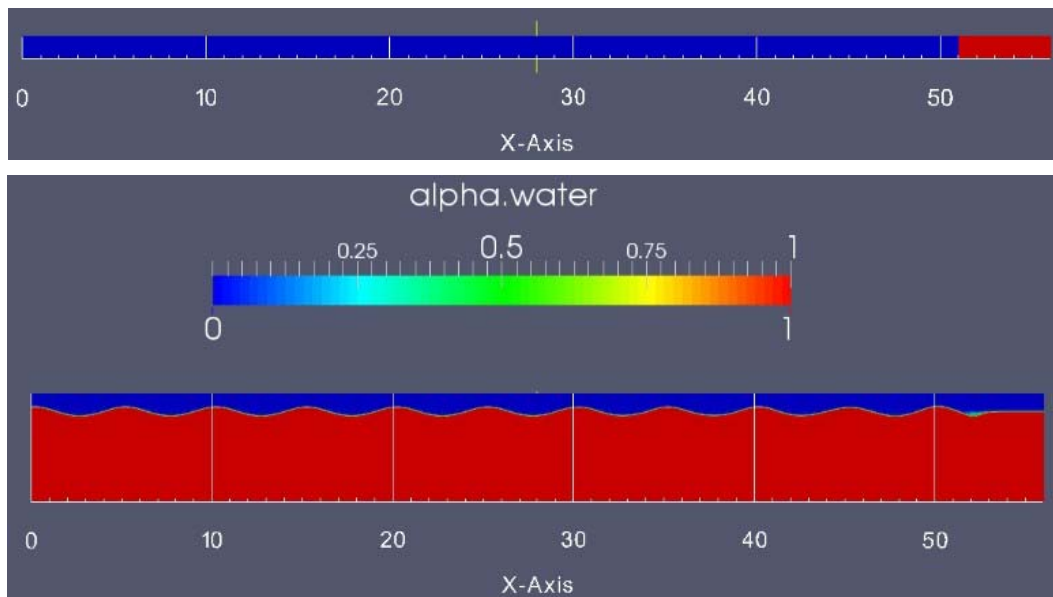


그림 3.3.36 소파구간(relaxation zone) 설정 및 조파 결과

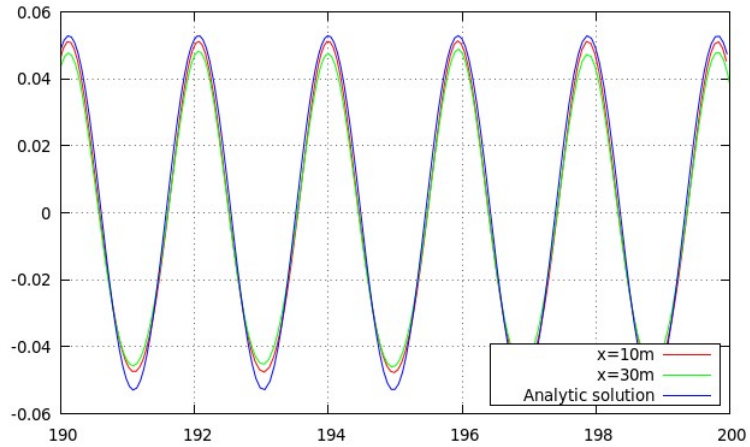


그림 3.3.37 조파된 파고 비교

스폰지층 파라미터 설정을 위하여 비교 시험을 진행하였다. 아래 그림과 같이 수조 양단을 확장하여 sponge layer 영역을 두고, 실험상의 조파 위치에 mass source 조파 영역을 설정하였으며, sponge layer의 길이는 파장의 2배, 조파 영역과의 거리 D1은 파장의 0.5배로 선정하였다. 감쇠계수는 경계 영역으로 갈수록 점진적으로 커지면서 경계에서의 반사와 발생을 억제할 수 있도록 분포되어 있다. 자유수면 형상은 조파 영역을 중심으로 대칭으로 조파되고 있는 것을 확인 할 수 있다.

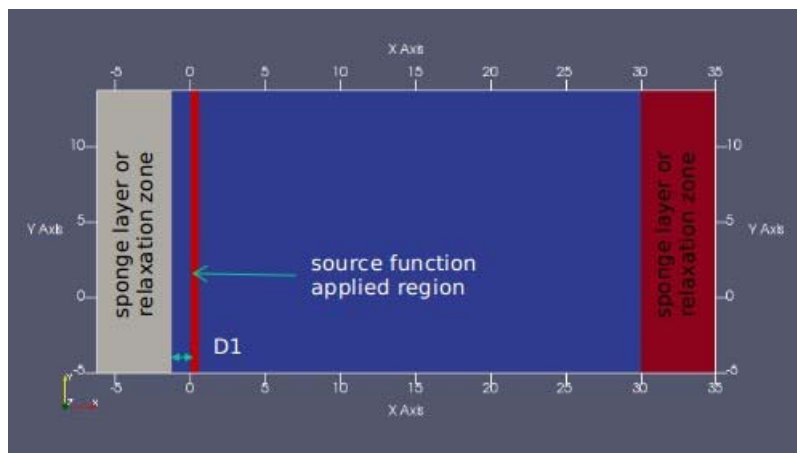


그림 3.3.38 2차원 조파 테스트 해석 영역 설정

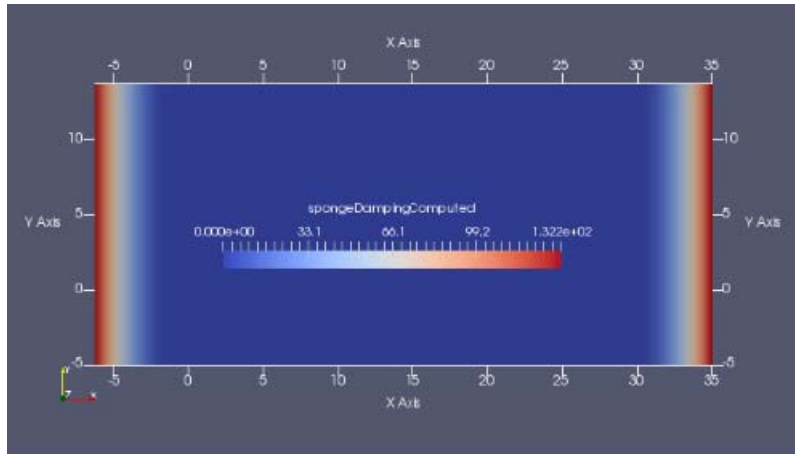


그림 3.3.39 감쇠계수 분포

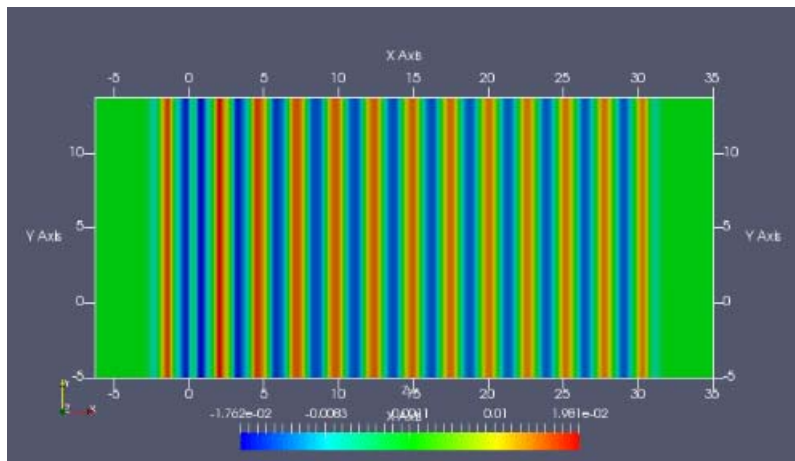


그림 3.3.40 자유수면 분포

(3) 3차원 RIB 해석

(가) Briggs et al.(2001)의 수리실험

본 연구에서 수치모델링 대상으로 삼은 수리실험은 미 육군 공병단 평면 조파수조에서 수행되었다. 그림 3.3.41은 수조 내에 RIB 구조물이 설치된 모습을 나타낸다. 수조 바닥은 평평하며, 수심은 46cm로 일정하였다. RIB의 끝은 조파판으로부터의 거리 5.73m, 수조 한 쪽 벽으로부터의 거리 13.72 m 떨어진 곳에 위치하였다. 두 개의 RIB 다리는 안쪽의 각도가 45°를 이루도록 설치되었다. 길이 9.1m인 RIB 다리 2개는 16mm 두께의 강판으로 만들어져 각각 4곳에서 수조 바닥에 단단히 고정되었다.

실험 중 수면변위를 측정하기 위해 10개의 용량식 파고계가 사용되었다. 파고계 5개는 입사파 평가를 위한 것이고, 나머지 5개는 RIB에 의해 차폐되는 영역 내로 전달되는 파랑의 전달파고를 평가하기 위한 것이다. 실험과는 입사파의 파향 및 주기가 서로 다른 14개의 실험과를 이용하여 계측을 수행하였다. 이 중에서 주기가 0.88 s인 경우와 1.41 s인 규칙파 2개 실험과에 대해 수치모델링을 수행하였다.

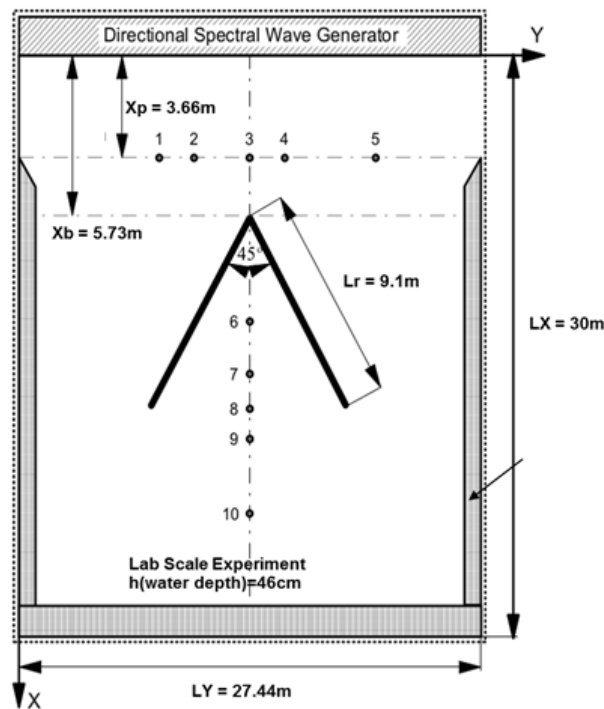


그림 3.3.41 RIB 수치실험 개념도

(나) 3차원 RIB 해석

2차원 영역에서 내부조파 및 스폰지층의 성능평가를 마친 후 Briggs et al. (2001)의 수치실험을 재현하기 위한 수치모델링을 수행하였다. 아래 그림에 보인 것처럼 계산 영역을 둘러싼 네 면에 모두 스폰지층을 두어 반사파의 영향을 제거하였다. 바닥 경계조건은 마찬가지로 No-slip 조건을 적용하였다. 격자 간격은 파 진행방향(x) 및 측방향(y)으로 0.04m의 균등격자를, 연직 방향(z)으로는 0.005 ~ 0.0575m의 가변격자를 적용하였으며, 이에 따른 총 격자수는 16,293,070개였다. 한편, RIB 구조물은 두께 없는 벽면으로 모델링하였다.

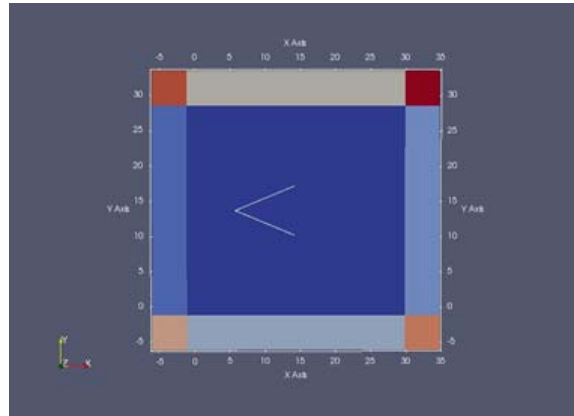


그림 3.3.42 RIB 수치해석 영역 개념도

아래 그림에는 $T=1.41$ s 인 경우의 수면변위 모습을 제시하였다. 조파선에서 조파된 파가 계산 영역 내로 전파되며 네 면의 스폰지층에서 파랑 에너지가 잘 흡수됨을 확인할 수 있다. 해석 결과로부터 RIB 구조물 전면에서의 정수압과 동수압 분포 그림을 나타낼 수 있었다.

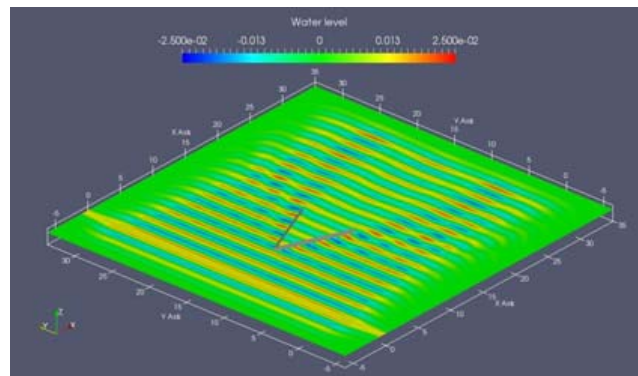


그림 3.3.43 RIB 수치해석에 의한 수면변위 모습

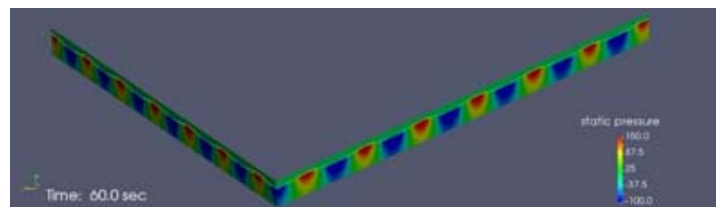


그림 3.3.44 RIB 구조물 전면에서의 정수압 분포

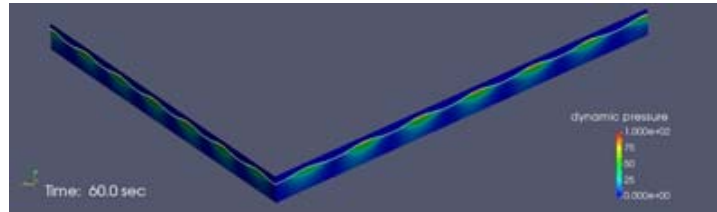


그림 3.3.45 RIB 구조물 전면에서의 동수압 분포

파고 평가는 각 조건 별로 열 군데 파고계(Gauge 1~10)에서 조파 시작 후 40초에서 50초까지 10초 동안의 수면변위 자료를 추출하여 수행되었다. 아래 그림에는 Briggs et al. (2001)에서 제공하는 파고 관측 자료와 수치모델링 결과를 비교한 결과를 제시하였다. $x = 3.66$ m의 값은 파고계 1번부터 5번까지 다섯 개 위치에서의 파고를 평균한 값이며, 나머지는 $y = 13.72$ m 단면을 따라서 배치된 파고계 6번부터 10번까지에서의 값이다. $T = 0.88$ s의 경우 RIB에 의해 차폐된 파고계 6번 이후의 파고가 입사파고에 비해 훨씬 작아 RIB에 의한 파고 저감 효과가 확실하게 나타남을 알 수 있다. 반면 $T = 1.41$ s의 경우 파고계 6번 이후에서의 파고가 입사파고에 비해 그다지 작아지지 않음을 알 수 있다. 대체로 실험자료와 수치모델링 결과가 대체로 잘 일치함을 확인하였다.

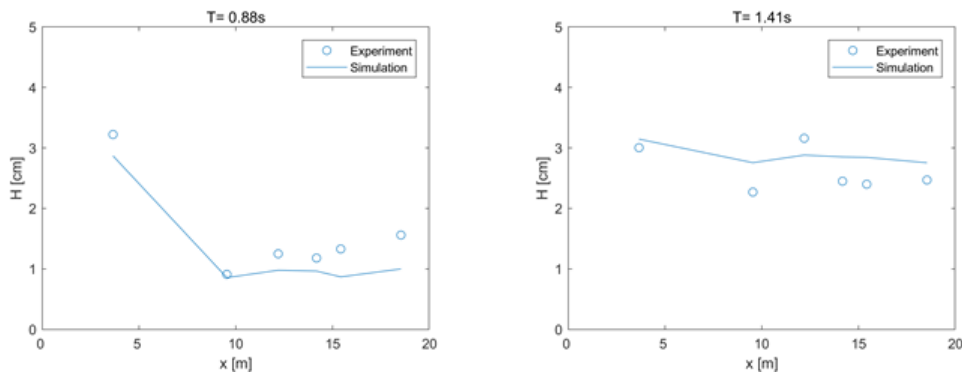


그림 3.3.46 Briggs et al. (2001) 실험자료와 비교 결과

수치해석 결과로부터 얻은 전달파고비를 실험자료 및 WAMIT 수치모델 결과와 비교한 그림을 아래에 제시하였다. WAMIT은 경계적분법(Boundary integral equation method)으로 부유체의 운동 해석에 널리 활용되는 모델로 Briggs et al. (2001)에는 수리 실험 조건에 대한 WAMIT 해석 결과가 함께 수록되어 있다.

$T = 0.88 \text{ s}$ 및 $T = 1.41 \text{ s}$ 의 경우 WAMIT보다 본 연구에서 개발된 수치모델이 실험 자료에 더 근접한 결과를 제시하고 있다. 한편, 수정 일치지수(Willmott et al., 2012)를 이용하여 계산한 결과로도 본 연구에서 적용한 OpenFOAM 모델이 WAMIT에 비해 Briggs et al. (2001)의 수리실험 결과를 더 정확하게 예측함을 확인하였다.

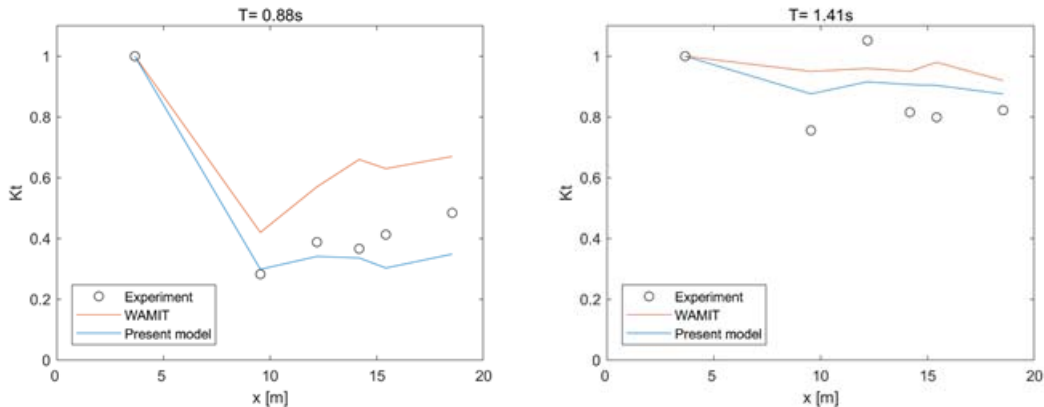


그림 3.3.47 Briggs et al. (2001) 실험자료 및 WAMIT과 전달률 비교

WAMIT은 근본적으로 자유수면 및 구조물 주변에서의 선형 경계조건을 만족하는 라플라스 방정식의 속도 포텐셜을 구하며, 전달계수는 이 속도 포텐셜의 시간 미분항에 연계되어 구해진다. 따라서 부유식 연직판처럼 구조물 전후에서 속도장의 급격한 변화가 나타나는 물리 현상에 대한 모델링에는 어느 정도 한계를 가지게 될 것이라고 추론해 볼 수 있다. 반면에 본 연구에서 적용한 OpenFOAM의 경우 VOF 기법에 의해 보다 엄밀하게 자유수면을 모델링하며, 난류에 의한 에너지 소산도 수치적으로 고려되므로 WAMIT에 비해서 상대적으로 더 정확하게 부유식 연직판 앞뒤의 파고를 계산하게 된다. 아래 그림에서 WAMIT이 OpenFOAM 모델링에 비해서 전반적으로 전달계수를 더 크게 평가하는 것도 이러한 이유에서 비롯된다고 추론할 수 있다.

본 수치모델 결과로부터 파고계 6번부터 10번까지의 파고를 평균하여 입사파고로 나누어 전달파고비를 계산한 값은 $T = 0.88 \text{ s}$ 일 때 0.33, $T = 1.41 \text{ s}$ 일 때 0.90이었다. 주기가 길어짐에 따라 전달파고비가 급속하게 증가함을 알 수 있다. Briggs et al. (2001)의 수리 실험 축척이 1:32인 점을 고려하면 $T = 0.88 \text{ s}$ 는 현장에서 $T = 5 \text{ s}$ 에 해당하고, $T = 1.41 \text{ s}$ 는 현장에서 $T = 8 \text{ s}$ 에 해당한다. 이러한 점을 고려할 때 RIB 구조물에 의한 파

랑 저감 효과는 주기 5초 내외의 단주기파에 대해서만 제한적으로 기대할 수 있다고 할 수 있다.

(다) 구조물의 운동 해석

RIB 구조물의 운동을 허용하는 해석을 위해 아래 그림과 같이 계류라인을 구성하였다. 파고 3.2cm의 Stokes 2차 파도 이론 모델을 적용하였으며, 아래 그림에 각 파고계별 평균 파고를 비교하여 나타내었는데, 주기 0.88초의 경우 급격하게 감쇠가 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, RIB 구조물의 운동을 검토한 결과 주기 1.41초인 경우에 변위가 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 계류선의 강도(stiffness) 및 구조물의 질량에 따른 시스템의 고유 주파수에 따라 변동성이 크므로 향후 이를 고려한 추가 해석 및 분석이 필요하다.

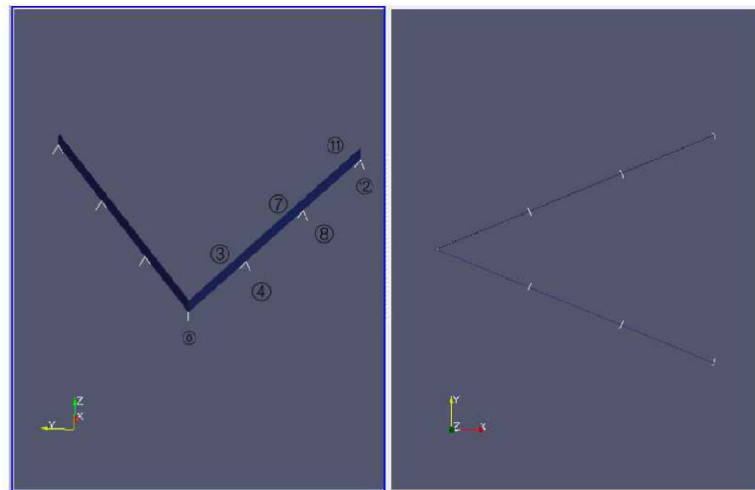


그림 3.3.48 RIB 계류 라인 구성

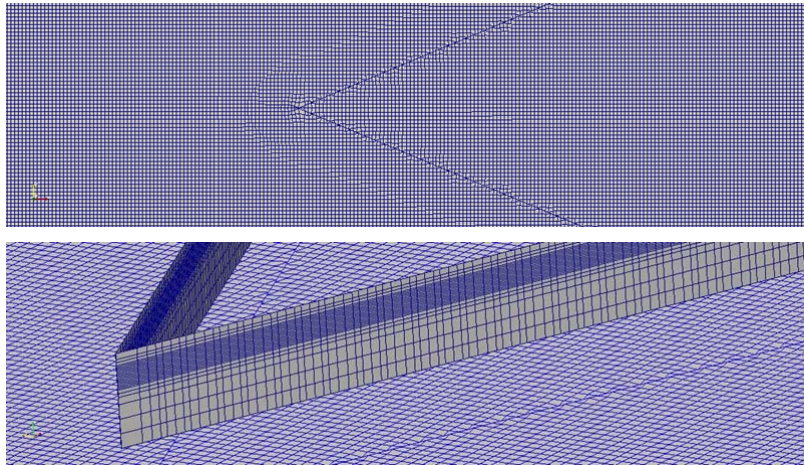


그림 3.3.49 해석영역 격자 구성

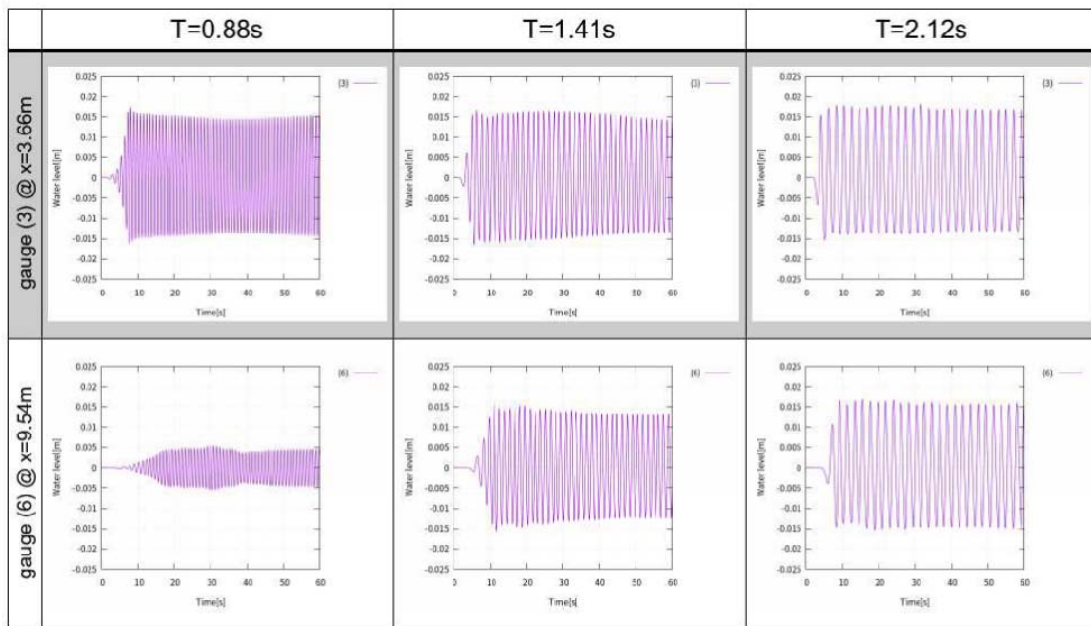


그림 3.3.50 RIB 운동해석에 따른 파고 비교

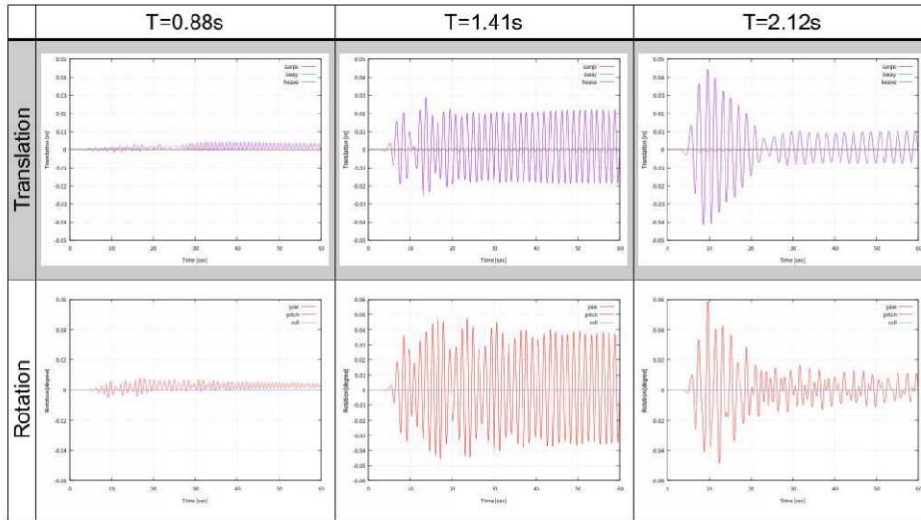


그림 3.3.51 RIB 운동해석에 따른 3축 방향 운동량 비교

(라) 투과성 구조물에 대한 해석

RIB 구조물이 투과성(porous) 구조일 경우의 해석을 추가로 수행하였다. 투과성 특성에 따른 파랑 감쇠 효과를 비교하기 위해 선형 압력 저항 특성을 나타내는 α 값을 변화시켜 해석을 수행하였다. α 의 값을 5, 5×10^2 , 5×10^4 , 5×10^6 , 5×10^{10} 으로 변화시키면서 해석한 결과를 아래 그림에 나타내었다. 압력저항이 클수록 파랑 감쇠 효과가 커지며, $\alpha = 5 \times 10^6$ 이상의 값에서는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 한편, $\alpha = 5 \times 10^4$ 의 경우에 주기별 해석 결과를 비교해 보면, 구조물 운동해석의 결과와 마찬가지로 $T = 0.88$ s에서 감쇠가 크게 발생하는 결과를 얻었다.

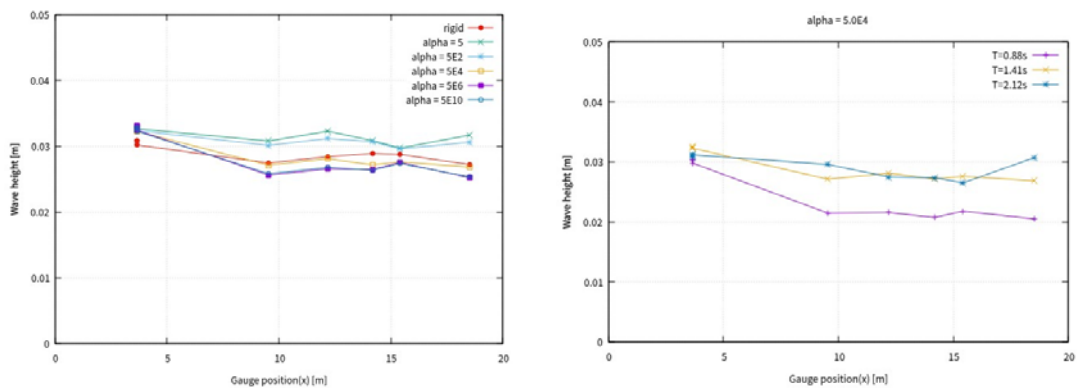
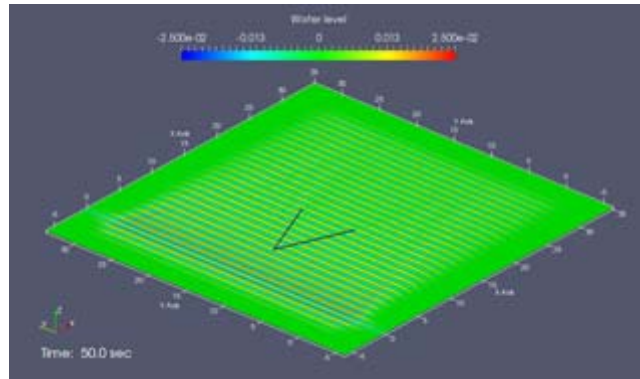
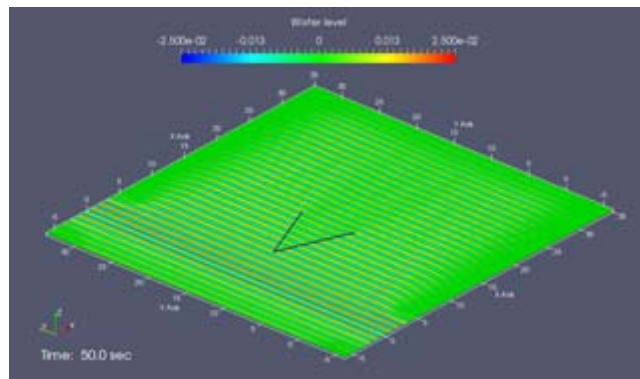


그림 3.3.52 투과성 특성 변화에 따른 파고 비교

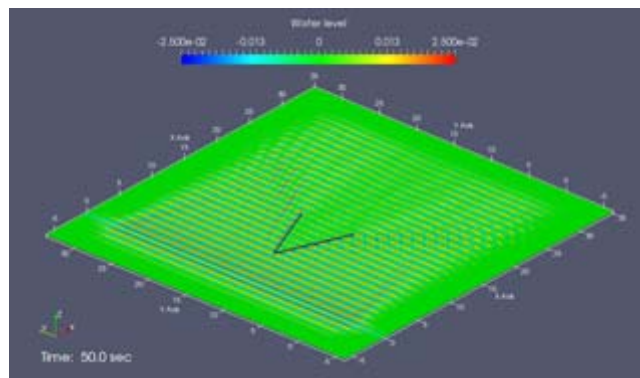
아래 그림에는 선형 압력저항 값(α) 변화에 따라 $T = 0.88$ s 일 때 수면변위 모습의 차이를 비교하여 나타내었다.



(a) 5×10^2



(b) 5×10^4



(c) 5×10^6

그림 3.3.53 투과성 특성 변화에 따른 수면변위 비교

다. 부유식 파랑저감장치 수리실험

(1) 신형식 부유식 파랑저감장치 개념 도출

RIB 관련 선행연구 결과 및 수치모델링 결과를 토대로 고강도섬유를 이용한 신형식 부유식 파랑저감장치에 관한 개념을 도출하였다. 본 파랑저감장치의 특징은 고강도 소재(UHMWPE)를 이용하여 제작된 시트(sheet)와 로프(rope) 및 부대장치로 구성된 시스템을 구축하는 것이다. 마모, 마멸, 충격 등에 대하여 높은 저항성을 가지는 고강도 섬유를 이용하여 막체를 제작하고 막체의 아래쪽은 여러 가닥의 로프로 연결되어 해저바닥의 추(weight) 또는 앵커(anchor)에 고정되고, 시트의 위쪽은 수면에 위치한 부력통에 연결된다. 부력통은 고강도 로프에 의하여 그 위치가 고정되며 부피가 가볍고 설치가 용이한 소재를 사용한다. 설치 및 회수가 용이한 단순한 구조 형식으로서 RIB와는 차별화되는 형식의 파랑저감장치이다.

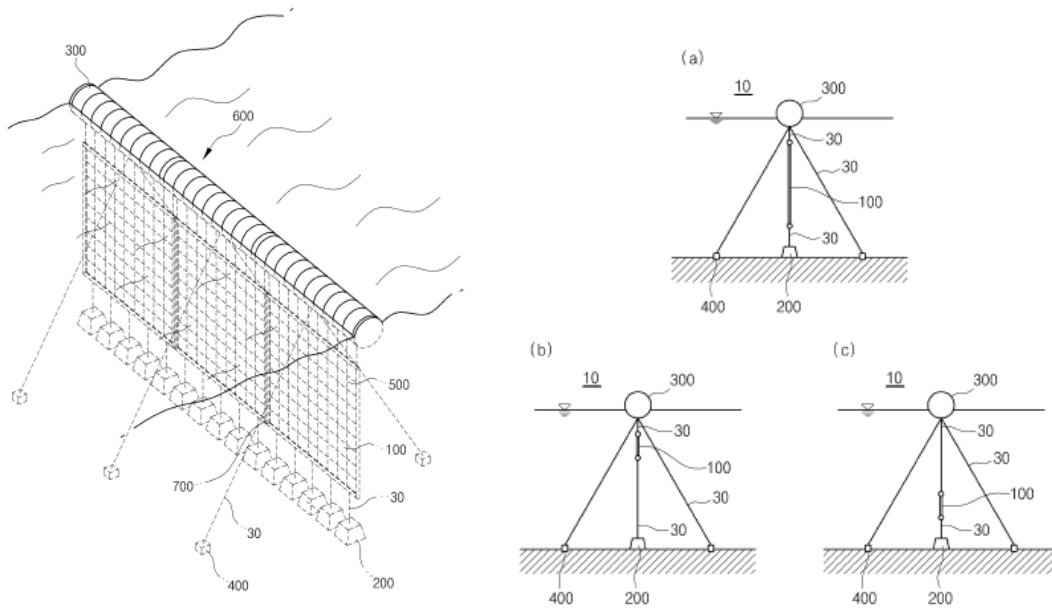


그림 3.3.54 고강도섬유를 이용한 부유식 파랑저감장치 개념도

(2) 부유식 파랑저감장치 수리성능 평가

부유식 파랑저감장치의 성능을 평가하기 위한 수리실험을 2차원 조파수조에서 수행하였다. 아래 그림에는 실험모형을 수조 내에 설치한 모습을 제시하였다. 부력통의 단면 직

경은 10cm, 실험 수심은 80cm였다. 부력통 위쪽으로는 율과 저감을 위해 3cm 높이의 연직판을 부착하였다. 고강도섬유(UHMWPE)를 이용하여 구성된 막체는 부유체 단면을 감싸서 두겹으로 연직 방향으로 연결된 계류선에 의해 구속되며, 계류선은 수조 바닥에 설치된 로드셀에 연결되었다. 실험과는 아래 표에 보인 것처럼 파고 및 주기가 서로 다른 규칙과 13개를 이용하여 수행되었으며, 총 1분간 조파를 실시하여 구조물 전면과 후면의 파고 및 로드셀에 작용하는 장력을 계측하였다. 특정한 현장을 고려하여 실험이 계획된 것은 아니지만 대략의 실험 축척은 현장 조건(prototype) 대비 1:25 정도로 평가된다.

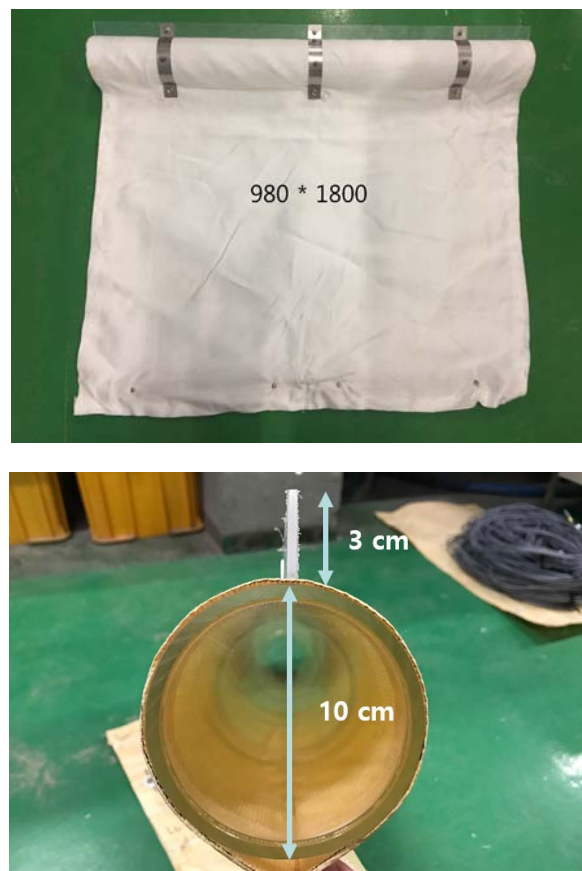


그림 3.3.55 수리실험에 사용된 고강도섬유 막체 및 부력통 모습

표 3.3.2 실험과 조건

T(s)	H(cm)	
	3.0	6.0
0.6	W51	-
0.8	W53	W54
1.0	W55	W56
1.2	W57	W58
1.4	W59	W60
1.6	W61	W62
1.8	W63	W64

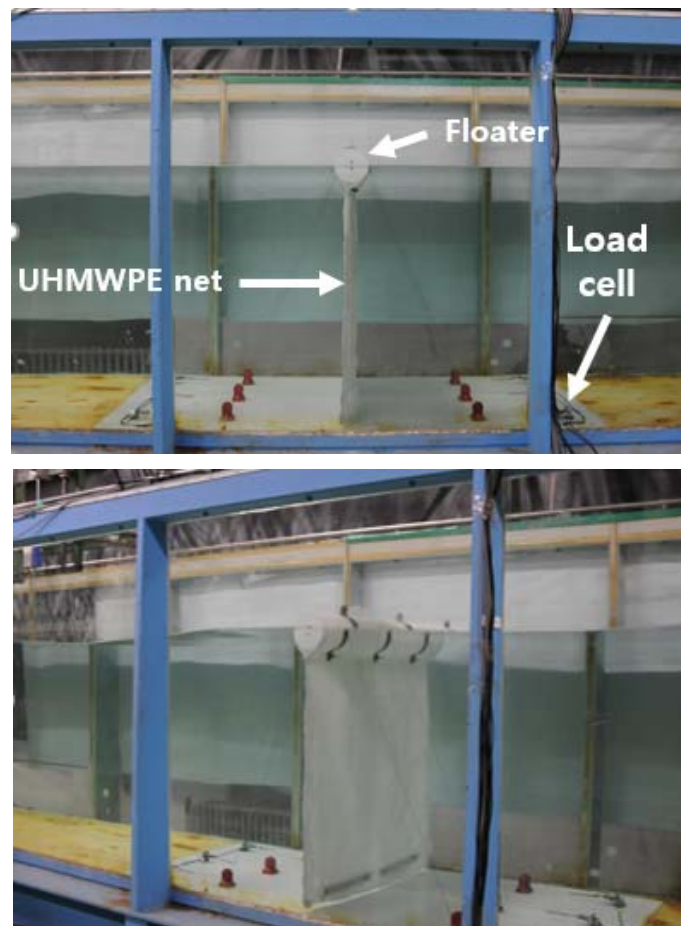


그림 3.3.56 단면 조파수조 내 실험모형 설치 모습

표 3.3.3 실험과별 전달율 평가 결과

Test ID	T (s)	H (cm)	Kt
W51	0.6	3.0	0.57
W53	0.8	3.0	0.84
W54	0.8	6.0	0.80
W55	1.0	3.0	0.90
W56	1.0	6.0	0.96
W57	1.2	3.0	0.90
W58	1.2	6.0	0.98
W59	1.4	3.0	0.95
W60	1.4	6.0	0.98
W61	1.6	3.0	0.97
W62	1.6	6.0	0.99
W63	1.8	3.0	0.99
W64	1.8	6.0	0.99

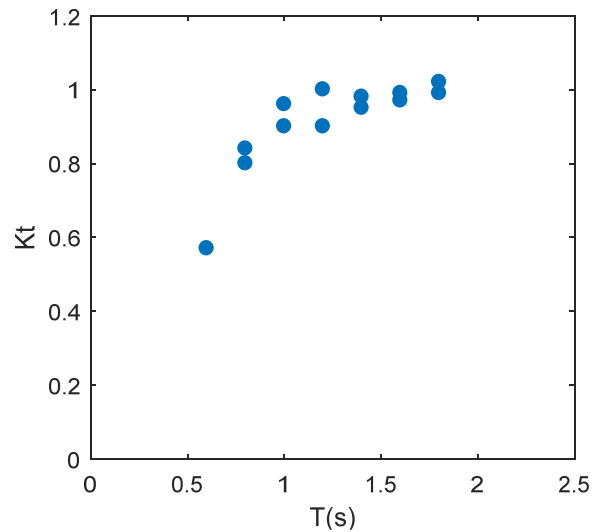


그림 3.3.57 실험과 주기에 따른 파랑저감장치 전달율

수리실험 결과로부터 실험과의 주기가 증가함에 따라 파랑저감장치의 성능이 저하됨을 알 수 있었다. 수치모델링 결과와 마찬가지로 본 파랑저감장치는 주기가 짧은 경우에만 성능을 발휘함을 알 수 있다. 따라서 실제 해역에서 본 파랑저감장치를 적용할 경우 이러

한 수리적 특성을 충분히 고려할 필요가 있다.

라. 부유식 파랑저감 구조물 개념 설계

본 연구사업에서 수행된 부유식 파랑저감장치 연구와 관련하여 고강도 섬유를 적용한 오탃방지막에 대한 개념을 제시하고 설계를 수행하였다. 미 공병단에서 개발한 RIB와 사용목적 및 용도는 다르지만 구조형식이 유사한 오탃방지막 설계사례를 토대로 기존 막체 대신 고강도섬유를 사용하였을 경우의 적용성 및 막체 재질(인장력 등) 변경에 따른 효과(안정성 및 경제성 등)를 분석하였다.

동·서·남해 각 해역별로 한 곳씩 선정된 위치 총 3곳을 대상으로 서로 다른 지반조건(점토층, 모래/암반층)에서 기존 오탃방지막 구조물 대비 성능 변화 및 계류앵커 적정 간격, 규모 등에 대한 해석을 수행하여 동일 조건하에서 부유식 파랑저감장치의 안정성 및 경제적 효율성을 평가하고 관련 설계도를 제시하였다.

(1) 오탃방지막의 기능 및 구성

(가) 오탃방지막의 기능

해상공사의 구조물 축조, 준설 및 매립은 토사의 미립자를 확산시켜 해수를 혼탁하게 하며, 혼탁해진 오탃수는 유출, 확산되어 주변 해역의 수산자원 및 해양환경을 오염시킨다. 따라서, 해양오염의 확산을 방지하고, 주변 해역 환경을 보호하기 위하여 해상공사 시에는 수중에 오탃방지막을 설치해야 하며, 그 주요기능은 다음과 같다.

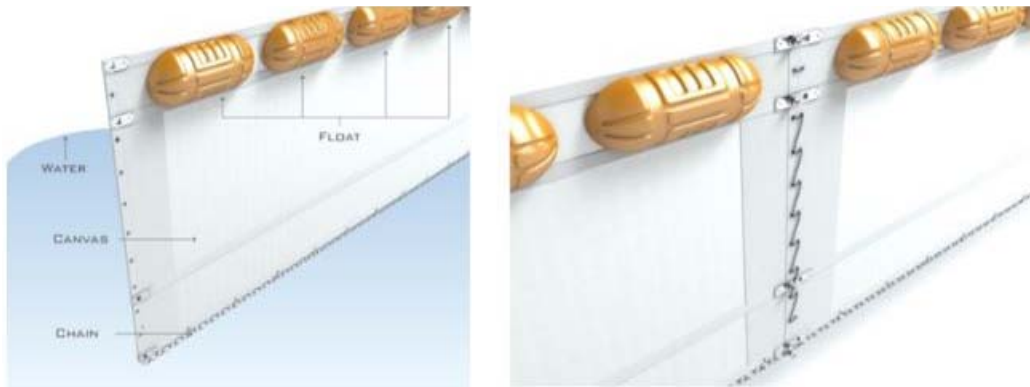
- 준설공사에서의 오염원 확산 방지
- 매립공사로 인한 여수토로부터의 오염원 확산 방지
- 해양 구조물 축조시 사석 등의 공사용 재료 투하로 인한 오염원 확산 방지
- 구조물 기초처리 및 연약지반개량 공사로 인한 오염원 확산 방지

(나) 오탃방지막의 구성

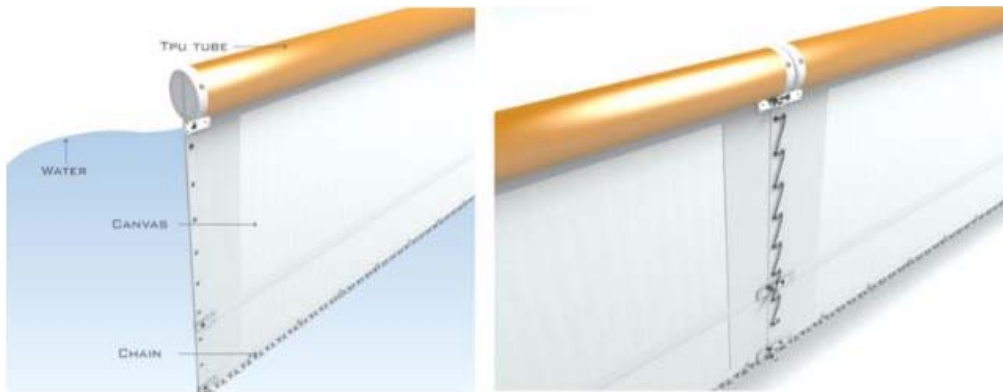
상층에 설치한 오탃방지막은 해수유동에 저항을 주어 이에 따라 부유물질이 하강하고 이때 가라앉기 쉬운 토사와 가라앉기 어려운 토사 사이에 공진현상과 하강류에 의한 입자의 침강축진을 일으키는 효과를 나타낸다. 오탃방지막은 크게 부체(Float)부, 막체(Curtain)부 및 앵커(Anchor)부로 구성되어 있다.

A. 부체(Float)

부체는 파랑이 심한 해양의 경우 부력이 우수한 재질인 Ploystyrene 계로 튜브원통형, 파랑이 심하지 않은 연안 또는 하천에서는 PE계 플라스틱 커버 내부에 부재력을 사용하는 두가지 형식이 있으며, 내구력이 양호한 형태로 결합시켜 제작된 것으로서 원통 일체형으로 오탁방지막의 막체부분을 부체부에서 수면하로 막체를 유지시키는 중요한 기능을 발휘하는 시설이다.



(a) 커버형 오탁방지막



(b) 튜브형 오탁방지막

그림 3.3.58 오탁방지막의 개념도

B. 막체(Curtain)

호안공사 구역이나 여수토 토출관 주변에서 발생 가능한 오염물질을 직접적으로 차단시켜주는 기능으로서 내구성, 내약품성, 내흡수성 및 제반성능 등이 우수한 고장력 합성

섬유를 사용하여 여과기능과 외력에 대한 내구성이 있는 부분으로 수면 표층에서 수중으로 설치되는 막체이다.

C. 앵커(Anchor)

해당수역에서 외력에 의해 막체의 이동을 막기 위하여 오탁방지막을 고정시키는 장치로 막체부에 작용하는 하중을 저항하기 위하여 막체를 고정시키는 장치이다. 앵커는 전체 막장력의 한 구간당 막체면 수직방향 하중에 대하여 견딜 수 있는 중량 이상의 앵커를 적용해야 하며, 대상지역의 현장여건, 설계조건, 경제성, 시공성 등을 고려하여 여러 형식을 비교 및 검토하여 앵커 형식을 결정한다.

표 3.3.4 오탁방지막 앵커 형식

구분	톤백형	닷가지형	콘크리트 블록형
개념도			
시 설 개 요	<ul style="list-style-type: none"> •톤백에 골재를 채워 막체에 연결, 자중에 의해 고정 	<ul style="list-style-type: none"> •닷가지를 막체에 연결, 닷과 지반 수평저항력으로 고정 	<ul style="list-style-type: none"> •콘크리트 블록을 막체에 연결, 자중에 의해 고정
특 성	<ul style="list-style-type: none"> •수거 및 유용이 용이 •제작 설치비 저렴 •친환경 소재로 해양생태계 영향이 적으며, 재사용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> •앵커 수거 및 이설 용이 •경제성 유리 •연직력에 저항성이 없음 •완공후 폐기물 발생없음 	<ul style="list-style-type: none"> •연약지반에서 수거, 유용 곤란 •수평지지력 적응성 보통 •공사후 콘크리트 폐기물 발생

(다) 오탁방지막 품질 기준

오탁방지막 막체는 흙이나 해수 및 일광 등에 노출된 상태에서도 내구성이 강하고 여과성이 양호하며 해수의 혼탁 및 확산을 방지할 수 있는 재료로서 그 사용재질의 기준치는 다음과 같다.

표 3.3.5 오탉방지막 막체 시방서 기준

항 목	단 위		기 준 치	시 험 방 법
인장강도	kN/m	건조	2.5×2.5 이상	KS K ISO 10319 ASTM D 4945
		습윤	2.5×2.5 이상	
인장신도	%	건조	25% 이하	KS K ISO 10319 ASTM D 4945
		습윤	25% 이하	
인열강도	N	건조	800×800 이상	KS K 0769 ASTM D 4533
		습윤	800×800 이상	
중량	N/m ³		6 이상	ISO 9864
투수계수	cm/sec		$a \times 10^{-3}$ 이상	-
수축율	%		0.2×0.2 이하	-

주) 항만 및 어항공사 표준시방서(2012. 국토해양부)

또한, 기존 항만공사에서 적용된 다수의 시방서와 오탉방지막 시공업체의 사례를 보면 막체의 인장강도 톤급별 품질기준을 세분화하여 항만 및 어항공사 표준시방서의 품질기준 보다 구체적인 기준을 제시하기도 한다.

표 3.3.6 오탉방지막 막체 품질기준 사례

구 분		품 질 기 준						시 험 방 법	
		10톤	15톤	20톤	25톤	30톤형	32톤		
조 성 률	(%)	100% Polyester						KS K 0210	
중 량	(g/m ² , 이상)	300	400	600	700	900	1,000	KS K ISO 9864	
인 장 강 도	(kN/m, 이상)	100 ×100	150 ×150	200 ×200	250 ×250	300 ×300	320 ×320	KS K ISO 10319	
인 장 신 도	(%)	10 ~ 30 %						10 ~ 40	KS K ISO 10319
인 열 강 도	(N, 이상)	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,200	KS K 0769	
투 수 계 수	cm/s	$a \times 10^{-2} \sim -4$ (a:1.0~9.9)						KS K ISO 11058	
수 축 율	%	± 0.2 이하						KS K ISO 7771	

(2) 오락방지막 설계사례 조사

우리나라 서·남·동해안에 대한 설계사례 조사 결과는 아래와 같다.

(가) 서해안

구 분		전곡항 테마어항 조성사업 실시설계 (2006년)	평택·당진항 자동차 전용부두 (동부두 12번선석) 축조공사 실시설계 (2007년)	목포신항 석탄부두 축조공사 실시설계 (2011년)	새만금 동서 2축도로 건설공사 (제1공구) 실시설계 (2015년)
위 치		경기도 화성시	경기도 평택시	전라남도 목포시	전라북도 군산시
외 력	풍속(m/s)	20.70	20.70	29.10	23.50
	조류속(m/s)	0.20	1.30	0.10	0.80
	파고(m)	1.50	0.89	1.36	1.34
	파장(m)	39.00	20.44	22.52	27.64
	주기(sec)	5.00	3.62	3.80	4.28
수 심		16.27	15.80	16.86	9.00
지 반		실트 및 점토	점성토	점성토	점성토
막 체 제 원	연장(m)	20.00	20.00	20.00	20.00
	폭(m)	7.00	3.00	3.00	1.00
	안전율	10	15	20	15
	막면장력 (ton/m)	0.54 (Curtain부)	1.47 (Curtain부)	1.50 (Float부)	1.67 (Curtain부)
	인장강도 (ton/m)	20 (20≥0.54×10)	25 (25≥1.47×15)	32 (32≥1.50×20)	30 (30≥1.67×15)
Float	형식	Cover형	Tube형	Cover형	Cover형
	직경(mm)	500	500	500	300
Anchor 제 원	진체하중 (ton/span)	3.08	3.42	1.76	1.46
	파주력(k)	3	-	2	-
	형식	Ton Bag형	땃가지형	Ton Bag형	땃가지형
	중량 (ton)	Main	4.94(1.4×1.4×1.4)	50관급 0.19ton ($F_H = 4.98\text{ton}$ 간격 : 10m)	1.11(1.2×1.2×1.0)
Sub		2.40(간격 : 5m) (1.1×1.1×1.1)	0.97(간격 : 10m) (1.0×1.0×1.0)		
Wire Rope	안전율	4	3	3	4
	Main	Φ24mm B종 (33.7t ≥ 24.7t)	Φ18mm G종 (15.1t ≥ 12.3t)	Φ125mm G종 (7.2t ≥ 6.1t)	Φ14mm G종 (9.1t ≥ 6.8t)
	Sub	Φ14mm B종 (11.5t ≥ 2.8t)		Φ8mm G종 (2.9t ≥ 1.4t)	
기 타	약최고조위	DL(+9.270m)	DL(+9.270m)	DL(+4.860m)	DL(+7.246m)
	설계파	2.0m(50년)	1.34m	1.56m(50년)	2.0m(50년)

(나) 남해안

구 분		부산항 신항 방파제 보강공사 실시설계 (2009년)	부산항 신항 방파제 보강공사 실시설계 (2009년)	부산항 신항 송도준설토 투기장 호안축조공사 (2012년)	소침도서 방등표 외 2개소 설치공사 및 간출암 준설 실시설계 (2015년)
위 치		부산광역시 강서구	부산광역시 강서구	경상남도 창원시	전라남도 고흥군
외 력	풍속(m/s)	26.1	26.1	26.1	25.00
	조류속(m/s)	0.21	0.21	0.50	0.51
	파고(m)	4.90	4.90	3.10	3.00
	파장(m)	129.72	129.72	153.93	173.60
	주기(sec)	11.87	11.87	13.26	15.45
수 심		1400	1400	1805	13.96
지 반		점성토	점성토	점성토	사질토
막 체 제 원	연장(m)	2000	2000	2000	2000
	폭(m)	200	200	300	300
	안전율	10	10	10	5
	막면장력 (ton/m)	3.14 (Curtain부)	3.14 (Curtain부)	2.13 (Curtain부)	1.42 (Curtain부)
	인장강도 (ton/m)	32 ($32 \geq 3.14 \times 10$)	32 ($32 \geq 3.14 \times 10$)	25 ($25 \geq 2.13 \times 10$)	10 ($10 \geq 1.42 \times 5$)
Float	형식	Tube형	Tube형	Cover형	Cover형
	직경(mm)	500	500	500	500
Anchor 제 원	전체하중 (ton/span)	486	486	5.19	3.38
	파주력(k)	-	-	2	1
	형식	땃가지형	땃가지형	Ton Bag형	Ton Bag형
	중량 (ton)	Main	60관급 0.23ton ($F_H = 5.36\text{ton}$ 간격: 10m)	60관급 0.23ton ($F_H = 5.36\text{ton}$ 간격: 10m)	3.27(간격: 20m) (1.5×1.5×1.5)
Sub				3.27(간격: 10m) (1.5×1.5×1.5)	4.72(간격: 10m) (1.9×1.9×1.7)
Wire Rope	안전율	3	3	3	3
	Main	Φ22.4mm G중 (22.8t ≥ 17.0t)	Φ22.4mm G중 (22.8t ≥ 17.0t)	Φ22.4mm G중 (23.3t ≥ 17.9t)	Φ18mm G중 (15.1t ≥ 11.7t)
	Sub			Φ16mm G중 (11.9t ≥ 9.6t)	Φ18mm G중 (15.1t ≥ 12.8t)
기 타	약최고조위	DL(+1.906m)	DL(+1.906m)	DL(+1.906m)	DL(+3.756m)
	설계파	5.0~6.8m(50년)	5.0~6.8m(50년)	1.7~4.5m(50년)	5.2m(50년)

(다) 동해안

구 분		울산신항(1-2단계) 남항부두 8번선석 축조공사 실시설계 (2008년)	울산신항 북방파제(제2공구) 축조공사 실시설계 (2009년)	울릉(사동)항 2단계 동방파제 축조공사 실시설계 (2014년)	포항신항 스웰 개선대책 시설공사 실시설계 (2016년)
위 치		울산광역시 남구	울산광역시 남구	강원도 동해시	경상북도 포항시
외 력	풍속(m/s)	18.30	18.30	31.00	23.00
	조류속(m/s)	0.37	0.50	0.60	0.18
	파고(m)	1.12	3.50	5.20	4.75
	파장(m)	152.55	97.03	136.18	138.90
	주기(sec)	12.72	8.40	9.59	11.46
수 심		17.00	18.30	30.00	18.25
지 반		사질토	점성토	사질토	사질토
막체 제원	연장(m)	20.00	20.00	10.00	10.00
	폭(m)	3.00	3.00	2.00	2.00
	안전율	10	20		
	막면장력 (ton/m)	0.59 (Float부)	1.15 (Curtain부)	0.27 (Curtain부)	0.12 (Curtain부)
	인장강도 (ton/m)	10	25	30	25
Float	형식	Cover형	Tube형	Tube형	Tube형
	직경(mm)	300	500	500	500
Anchor 제원	전체하중 (ton/span)	1.22	268	400	0.17
	파주력(k)	15	-	-	-
	형식	Ton Bag형	맞가지형	중력식	Ton Bag형
	중량 (ton)	Main	1.15(간격: 20m) (1.5×1.0×1.0)	60관급 0.22ton ($F_H = 3.03\text{ton}$ 간격: 10m)	1.7×1.7×1.7
Sub		1.15(간격: 10m) (1.5×1.0×1.0)	1.7×1.7×1.0		1.7×1.7×1.0
Wire Rope	안전율	3	4		
	Main	Φ10mm G중 (4t ≥ 4.2t)	Φ18mm G중 (15.1t ≥ 12.4t)	Φ16mm G중	Φ18mm G중
	Sub	Φ8mm G중 (2.9t ≥ 2.2t)			
기타	약최고조위	DL(+0.632m)	DL(+0.632m)	DL(+0.246m)	DL(+0.246m)
	설계파	1.12m	8.6m(50년)	1.0(50년) ~6.4m(100년)	5.7(50년)

위 조사 결과를 토대로 각 해역별 자연환경에 따른 외력조건과 막체제원 적용 사례를 검토한 결과 서해안은 파고 1.5m 이하, 파장 40m 이하, 주기 5sec 이하로 비교적 외력이 작게 작용하나, 남해안과 동해안은 파고 5.0m내외, 파장 100~200m, 주기 15sec 이하로 외력조건이 컸다. 다만, 막체의 강도와 중량은 해역별로 큰 차이를 보이지 않고 일정한 규격을 쓰고 있어 대부분 막체 강도 10~30ton/m, 앵커 개소당 중량 3ton내외를 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 오타방지막 제원 결정시 사용되는 파고가 주로 10년 빈도인 5m 이하에 대해 적용되는데, 파고에 따른 앵커 및 막체 제원이 5m 이하의 파고에 대해서는 유사한 규격에 대해 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 3.3.7 해역별 오타방지막 설치사례 분석 결과

구 분	서해안	남해안	동해안
외 력	•풍속 : 20~30m/s	•풍속 : 25~40m/s	•풍속 : 15~35m/s
	•조류속 : 1.5m/s 이하	•조류속 : 0.5m/s 이하	•조류속 : 1.0m/s 이하
	•파고 : 1.5m 이하	•파고 : 5m 이하	•파고 : 5m 내외
	•파장 : 20~40m	•파장 : 100~200m	•파장 : 100~200m
	•주기 : 3~5sec	•주기 : 10~15sec	•주기 : 5~15sec
수 심	•15m 내외	•15m 내외	•18m 내외
막 체	•인장강도:20~30ton/m	•인장강도:10~30ton/m	•인장강도:20~30ton/m
Anchor	•형식:Ton Bag/땃가지형	•Ton Bag/땃가지형	•Ton Bag형
	•중량 : 1~5ton/개	•중량 : 3~5ton/개	•중량 : 1~3ton/개
Wire Rope (Main)	Φ12.5 ~ 24mm	Φ18 ~ 22.4mm	Φ12.5 ~ 24mm

(3) 고강도 섬유의 적용성 검토

고강도 섬유를 적용시 오탉방지막의 구조적 안정성을 검토하여 오탉방지막이 견딜 수 있는 파랑 범위를 결정함으로써 파랑에 대한 실질적 사용범위를 검토해 보았다. 파고의 값을 증가함에 따른 고강도 섬유(막체 강도 $3.5 \times 106 \text{ton/m}$)의 특성 및 오탉방지막의 구조적 거동을 파악하여 적용성을 검토하였다. 앞서 조사된 해역별 사례를 참고하여 파고 5m 이하는 주기 5sec, 파장 40m, 수심 15m를 적용하고, 파고 5m 이상은 주기 15sec, 파장 150m, 수심 20m를 적용하였다.

표 3.3.8 파랑별 오탉방지막 구조성능 및 경제성 검토

파 고	막체 인장강도	Main Anchor	Wire Rope	Span공사비(천원)
1m	20 ton/m	1ton/개	Φ11.2mm	8,000
2m	20 ton/m	2ton/개	Φ12.5mm	9,000
3m	20 ton/m	3ton/개	Φ16mm	10,000
4m	25 ton/m	5ton/개	Φ18mm	11,000
5m	30 ton/m	8ton/개	Φ20mm	13,000
6m	30 ton/m	10ton/개	Φ22.4mm	15,000
7m	35 ton/m	13ton/개	Φ25mm	18,000
8m	40 ton/m	17ton/개	Φ28mm	20,000
9m	45 ton/m	21ton/개	Φ32mm	23,000
10m	50 ton/m	26ton/개	Φ34mm	25,000

파고를 증가시켜 각 부재의 소요 제원 및 공사비를 검토한 결과 파고 증가 시 공사비는 지속적으로 증가되는 것으로 나타났다. 고강도 막체에 대하여는 인장강도가 모든 파고 조건에 만족하지만, 그 외 앵커 및 와이어 로프의 규격이 커짐에 따라 공사비가 증가하는 결과를 보인다. 일반적으로 오탉방지막 공사비는 1 span 당 1천만원 내외 정도이나, 5m 이상의 파고에 대하여는 공사비가 지속 증가하여 경제성이 떨어진다. 따라서, 경제성을 고려하여 적용 가능한 파랑 범위 내에서 파랑 투과율을 저감시킬 수 있는 파랑 저감장치를 제시함이 타당하다.

(4) 신형식 오탐방지막 설계

파고 5m, 수심 15m 이하의 해역조건에서 오탐방지와 파랑 저감을 동시에 구현하는 부유식 이중 오탐방지막 표준형상을 도출하고, 적용 범위를 규정하였다.

(가) 기본형상 구상

신형식 오탐방지막의 기본형상은 기존 오탐방지막의 파랑에 대한 저감을 극대화시키기 위해 다음의 두 가지 전제에서 구상하였다.

- ① 오탐방지막 변형을 제어하여 파랑 저항면적 손실의 최소화
 - 변형량 f : 3% (일반 오탐방지막 10%) : 막체 변형 최소화
 - 강성 재질의 Float부 적용, 막체 하단 고중량 적용
- ② 이중 오탐방지막을 적용하여 막체에 작용하는 파랑 투과율 저감

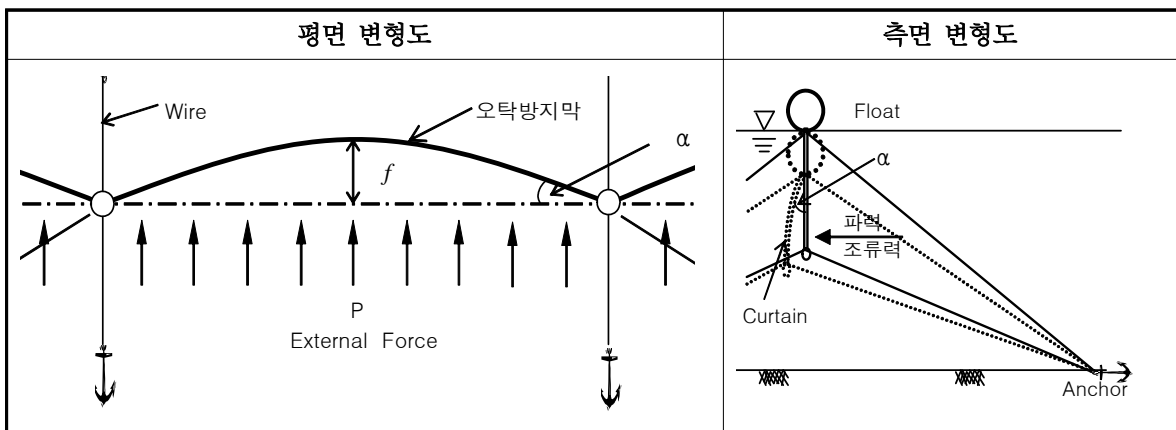


그림 3.3.59 오탐방지막 변형 개념도

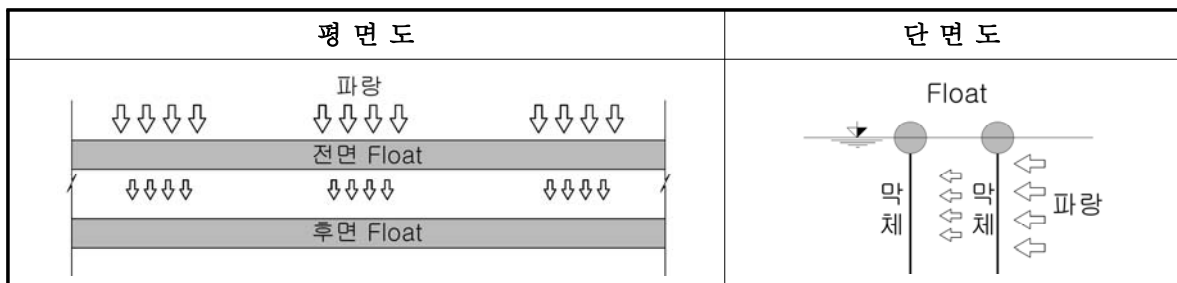


그림 3.3.60 이중 오탐방지막 구조

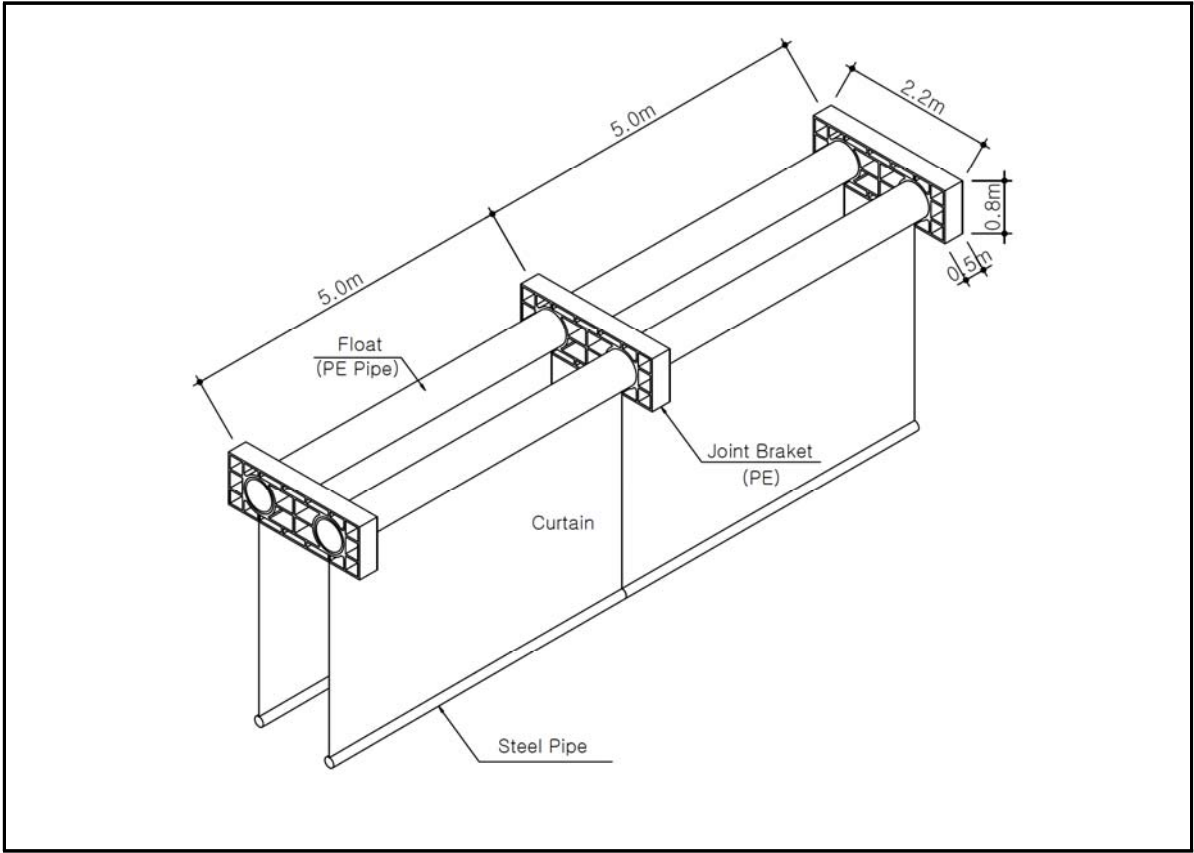


그림 3.3.61 신형식 부유식 다중 오탁방지막 구조도

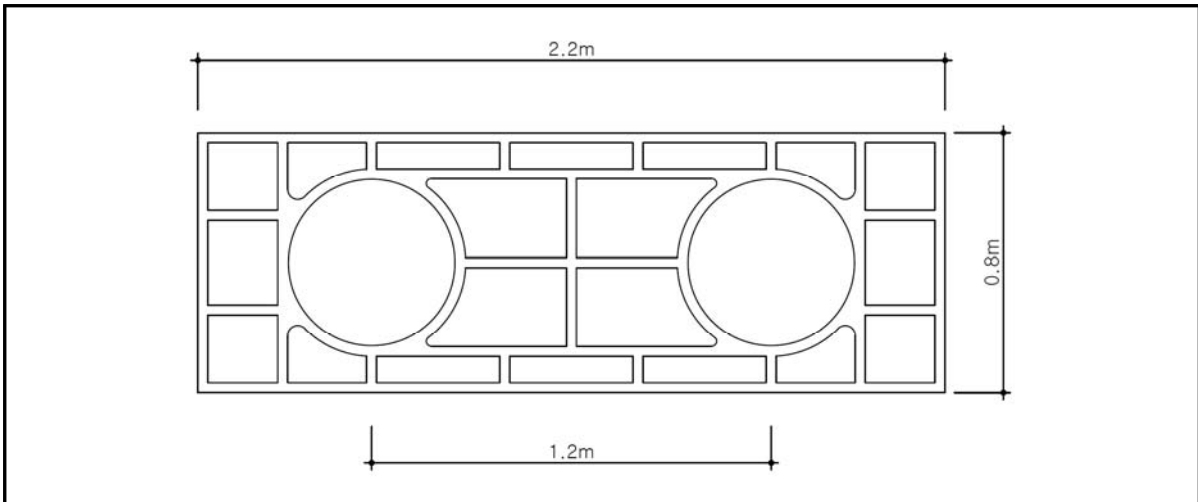


그림 3.3.62 부유식 다중 오탁방지장치 Joint Braket 정면도

(나) 구조성능 검토

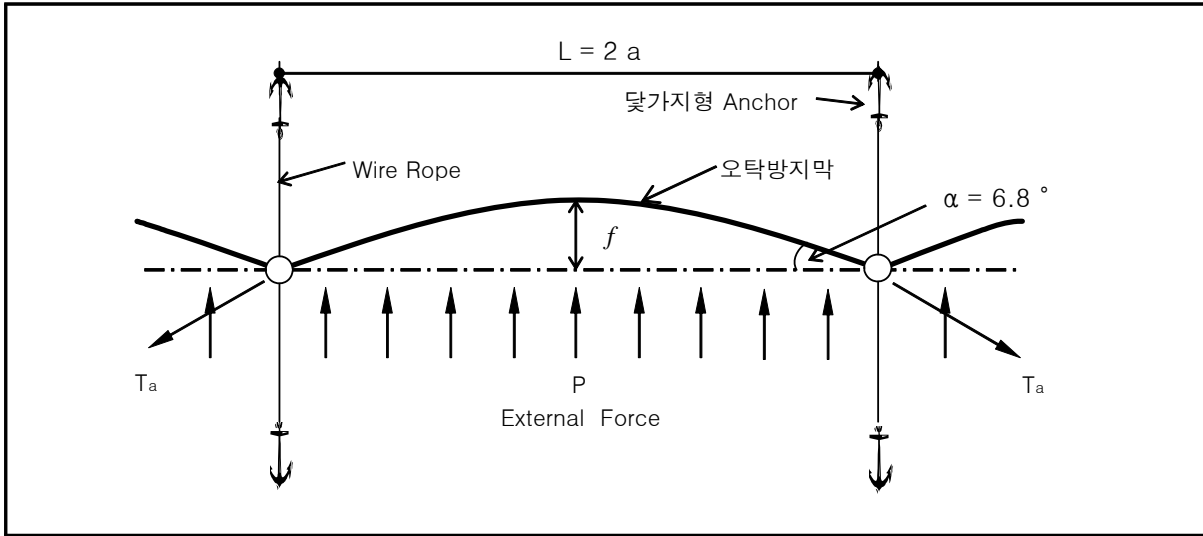
A. 설계 조건

구분	단위	적용조건	비고
풍속	m/sec	22.71	설계사례 평균값
조류속	m/sec	0.40	설계사례 평균값
수심	m	12.00	설계사례 파장 15m 이하 평균값
파장	m	24.84	
파고	m	1.20	설계사례 파고 3m 미만 평균값(경제성 고려)
주기	sec	4.0	5sec 이하
막체연장 ()	m	20.0	
막체폭 (B)	m	2.0	Curtain
Ancor 간격	m	10.0	
FLOAT (d)	m	0.5	

B. 외력 산정

구분	산정식	산정값
풍저항 (P ₁)	$P_1 = \frac{R_a \times C_d \times U^2}{2g} \times \cos^2\theta \text{ (kgf/m}^2\text{)}$ <p> R_a : 공기의 단위중량 (1.29kgf/m³) C_d : 저항계수 (1.0) g : 중력가속도 (9.80m/sec²) U : 풍속 (22.71m/sec) </p>	33.94 kgf/m ²
유수저항 (P ₂)	$P_2 = \frac{R_s \times C_d \times V^2}{2g} \times \cos^2\theta \text{ (kgf/m}^2\text{)}$ <p> R_s : 해수의 단위중량 (1,030kgf/m³) C_d : 저항계수 (1.13) g : 중력가속도 (9.80m/sec²) V : 조류속 (0.40m/sec) θ : 법선에 대한 해수 유입각도 (0°) </p>	9.50 kgf/m ²
파력저항 (P ₃)	$P_3 = \frac{R_s \times C_d \times V_o^2}{2g} \times \cos^2\theta \text{ (kgf/m}^2\text{)}$ <p> R_s : 해수의 단위중량 (1,030kgf/m³) C_d : 저항계수 (1.13) g : 중력가속도 (9.80m/sec²) θ : 파의 유입각도 (0.00°) V_o : 수평방향 물입자의 평균속도 (0.519m/sec) </p>	16.00 kgf/m ²

C. 막면 장력 및 전체하중 계산



구 분	산 정 식	산정값
Float부의 장력 (T1)	$T_1 = \frac{P_1 \times a}{2f} \sqrt{a^2 + 4f^2} \text{ m}$ <p>L : Anchor의 간격 (10m) a : Anchor의 간격의 1/2(5m) f : 변형량 (3% 변형시 = 0.03 x L) (0.3m)</p>	1,424.31 kgf/m ²
Curtain부의 장력 (T2)	$T_2 = \frac{(P_2 + P_3) \times a}{2f} \sqrt{a^2 + 4f^2}$ <p>P2 : 유수저항 P3 : 파력저항</p>	1,070.12 kgf/m ²
전체 막면장력 (Ta)	$T_a = T_1 \times d + T_2 \times B$ $= 1,424.31 \times 0.50 + 1,070.12 \times 2.00$ $= 2,852.40(\text{kgf})$	2,852.40 kgf/m
전체 하중	$F = 2 \times T_a \times \sin \alpha$ <p>Ta : 전체 막면장력 α : 막면의 휨 각도 $\tan \alpha = 4f \div 2a = 0.12$ $\therefore \alpha = 6.8^\circ$</p>	675.47 kgf

D. 구조적 안정성 검토 결과

표 3.3.9 부유식 다중 오타방지막 표준 규격

(1 Span 당)

구 분		규 격	수 량	
막 체 의 규 격		20(ℓ) × 2(B)	1 Span	
Float	PE PIPE	Ø500mm x 20m x 2개		
PE 브라켓		2,200mm x 800mm x 4개		
강관	종방향 스테인레스 강관	200 x 20m x 2개		
	횡방향 스테인레스 강관	200 x 1.2m x 4개		
막 체 의 인 장 강 도		25 ton/m급		
Anchor Block	땃 가 지 형	40관급(150kg)	4 EA	
막체와 Anchor 연결용 Wire Rope	상단 (L ₁)	규 격	Ø8mm (Br = 2.98 ton)	124 m
		연 장	30.8m	
Wire Rope	하단 (L ₂)	규 격	Ø8mm (Br = 2.98 ton)	120 m
		연 장	30m	
막체와 Anchor 연결용 Shackle	상단 (L ₁)	Ø20mm	8 EA	
	하단 (L ₂)	Ø20mm	8 EA	
Wire Rope	상단 (L ₁)	Ø8mm	24 EA	
Clip	하단 (L ₂)	Ø8mm	24 EA	
P.P Rope	Anchor와 부위 연결용 (L ₃)	Ø18mm	53.2 m	
부 위	Anchor 거치 위치표시용	Ø250mm	4 EA	

(다) 막체 폭에 따른 파고별 소요앵커 중량 검토

오탉방지막 구조형식은 막체폭이 증가함에 따라 파랑을 받는 면적이 커지기 때문에 앵커의 소요중량도 증가된다. 따라서, 앞서 경제성을 고려하여 일반화한 구조형식에 막체폭별 파고를 증가 시켜 양산되는 앵커 중량이 견딜 수 있는 한계를 검토하였다.

① 막체폭 2.0m

파고(m)	1.0	1.2	1.4	1.6
앵커 소요중량 (닷가지형)	40관급 (150kg)	40관급 (150kg)	50관급 (190kg)	50관급 (190kg)

② 막체폭 3.0m

파고(m)	1.0	1.2	1.4	1.6
앵커 소요중량 (닷가지형)	50관급 (190kg)	50관급 (190kg)	60관급 (220kg)	70관급 (270kg)

③ 막체폭 4.0m

파고(m)	1.0	1.2	1.4	1.6
앵커 소요중량 (닷가지형)	60관급 (220kg)	60관급 (220kg)	규격없음 (280kg 이상)	규격없음 (330kg 이상)

위와 같이, 막체폭을 4.0m로 할 경우 파고 1.4m 이상에 대해서는 양산되는 닷가지 앵커 규격이 없는 것으로 나타났다. 향후 이에 대한 추가적인 검토가 수행될 필요가 있다.

(5) 신형식 오탉방지막 적용성

기존 오탉방지막은 오염원의 차단 또는 부유물 확산을 방지하는 역할을 주로 한다. 반면에 본 연구에서 제안한 부유식 다중 오탉방지장치는 해양환경오염에 대한 영향을 감소시킬 뿐만 아니라, 파고가 낮은 해역의 항만 및 어항 시설물 공사시 평상시 침입되는 파

랑에 대하여 작업해역의 정온도를 확보할 수 있도록 하여 장비 조작 및 잠수 인력의 해상 작업을 원활하게 할 수 있다. 또한, 다양한 기술적 응용을 통해 그 적용성이 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

- 항만 및 어항시설 공사 시 외부 파랑 차단을 통한 해상 작업환경 개선
- 이중으로 오염원을 차단하여 해수오염의 효과적 방지
- 기상악화시 오탁방지막 훼손으로 인한 오염확산 차단
- 이중 구조의 오탁방지막으로 장기간 내구성 확보 통한 유지관리 용이

또한, 위 오탁방지장치는 해상 공사 및 작업시에 발생할 수 있는 작업 한계과고 초과 파랑에 대해 안정성을 확보하도록 하여 돌발 상황에서의 작업지연, 인명피해 등을 방지함으로써 이로 인한 발생될 수 있는 손실 비용을 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이중으로 구성된 오탁방지막체의 형식은 효과적 오염원 확산 방지효과 뿐만 아니라, 유사시 막체 한쪽이 손상되더라도 후속으로 차단할 수 있는 이중 막체로 인하여 2차 오염원 확산을 차단할 수 있다. 따라서, 해상공사 현장 주변의 해양생태계 교란을 방지함으로써 주변 수역, 해수욕장 등에 미칠수 있는 경제적 손실을 방지하고, 어업권의 생산성 향상을 도모함으로써 지역 주민 경제활동에 긍정적 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그리고, 기존 오탁방지막 보다 내구성이 우수하여 오탁방지막의 기능 수명을 연장시키고, 그에 따른 유지보수 인력 및 비용을 절감시키는 것이 가능할 것으로 기대된다.

다만, 세부적인 기술적 검토와 개발이 추가적이고 지속적으로 이뤄져 보완 및 실험적 검증을 통해 실용화에 역점을 두고 추진함으로써 본 연구 결과물의 활용을 극대화할 필요가 있다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

본 연구개발사업의 연구개발목표 달성도를 표 4.1.1에 정리하여 제시하였다.

표 4.1.1 연구개발목표 달성도

연구목표	연구내용	달성도
해양환경요소 통합지원 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실시간 통합 해양환경정보제공 시스템 개발 ○ 고해상도 연안해역 예측시스템 구축 및 개선, 고도화 ○ KOOS, FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 파랑예측 시스템 개발 ○ 유류유출 이동확산 예측 및 표류체 이동 예측 기술 개발, 고도화 	100 %
연안·항만의 파랑 및 폭풍 해일 재해 위험도 분석 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 파랑 및 폭풍해일 모델의 구축 및 개선 ○ 비선형 천해파랑 변형모형 (FUNWAVE-TVD) 구축 및 개선 ○ SWAN, FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 설계파 실험 ○ 과거 및 기후예측자료에 기반한 장기예측 ○ 파랑 재해위험도 평가 	100 %
극한 환경 극복 대응 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수중 생존자 탐지형 청음시스템 <ul style="list-style-type: none"> · 수중청음시스템 시제품 제작 · 수중청음시스템 해상시험 및 검증 ○ 신속설치형 부유식 파랑저감 장치 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 개발 장치 성능 평가를 위한 CFD 및 수리실험 수행 	100 %

제 2 절 대외기여도

본 연구결과의 기술적, 경제·산업적 측면의 기여도는 다음과 같다.

- 국내 실정에 적합한 해양예측모델 구축을 통한 독자적인 해양예측기술 확보
 - 관할 해양영토에서의 대형 해양 재해·재난 및 각종 해양문제 (대형 유류사고, 대형 해난사고 등) 발생 시 즉각적인 예측정보 제공 및 지원을 통해 효율적인 대처 가능
 - 구난/방재, 해양레저 및 해상 운송체계의 안전성 제고
 - 적시의 해양예측을 통한 해양재난 사고의 건수 감소 및 사고 발생 시 초기 대응을 통한 사고 수습으로 국민의 인명 및 재산 피해 저감
 - 실시간 관측 및 예측 통합 해양환경정보제공시스템을 활용하여 정부부처, 국가기관, 해군, 대학, 산업체 등 해양관련 정보 요구기관에 서비스 제공

- 국지 해황정보제공시스템 구축을 통해 고해상도 해황예측 기술을 확보하였으며, 특히 안정적인 운영 및 서비스를 함으로써 실질적인 활용을 가능토록 함.

- 본 연구를 통해 개발된 해양환경요소 통합 지원 기술을 현업기관에서 활용할 수 있도록 교육과 홍보를 강화하고 한국해양과학기술원이 해양연구의 선두 기관으로서 주도적인 역할을 수행하기 위한 지속적인 노력을 경주.

- 본 연구를 통하여 수정, 개선된 FUNWAVE-TVD 모형은 가장 정확한 파랑 변형 예측을 할 수 있는 모델로 세계의 선두를 유지할 수 있도록 지속적인 노력과 지원이 요구.

- KOOS와 FUNWAVE-TVD 모형을 연계한 파랑예측시스템이 실용화될 경우 항 내에서 보다 정확한 파고 예측이 수행되어 태풍이나 고파랑의 내습시 인명 피해 및 경제적 피해를 저감시킬 수 있을 것으로 판단됨.

- 침몰 선박에 대한 초기 생존자 확인은 해양경찰의 수색구조에서 가장 중요한 사항이며, 수중생존자 탐지형 청음시스템을 이용하여 수색구조를 수행할 시 구조 시간 및 인명

피해를 줄일 것으로 판단됨.

- 본 연구를 통하여 개발된 부유식 파랑저감장치는 기존 오탁방지막의 단점을 보완하여 파랑하중이 있는 경우에도 안전하고 쉽게 설치 가능하고, 오탁방지막으로도 활용될 수 있음.
- 관련 기술의 이전을 통해 산업 발전에도 기여할 것으로 기대함.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 해양예보기술 실용화로 현업기관의 상시 운영 및 해양예보에 활용.
 - 해난사고 발생 시 즉각적인 현장관측/예측자료 지원.
 - 유류오염/실종자 발생 시 신속한 방제/구난 활동의 의사결정 지원.
 - 해양사고 발생 시 초기대응을 위한 유관기관 실무자 교육.
 - 연안재해 사전예측 정보의 적시 제공 (지자체, 해양수산부 등).
 - 해양·조선 산업 등 민간산업체의 요구사항에 적합한 해황·예측정보 생산시스템 구축.
 - 조선업체, 연안구조물 설계 및 시공업체, 해양 레저업체 등에 관련기술 이전.

- 해양관련 현안 문제 발생 시 적시에 해양 정보의 제공을 통한 재해 저감 및 관련 연구사업의 개발 유도.

- 실시간 관측을 병행하여 실시간 검증을 확대하고 예측모델 개선을 지속적으로 수행하여 사고 발생 시 안전한 대책 수립 및 피해저감에 활용.

- 전지구적 기후변화에 따른 해수면 상승 등에 능동적으로 대응할 수 있도록 모델링을 통한 예측에 활용.

- 본 연구과제를 통하여 수정, 개선된 FUNWAVE-TVD 모형은 Delaware 대학의 모델 개발 팀과 공유하였으며, 현재 공개되어 있음.
(<https://fengyanshi.github.io/build/html/index.html>)

- 개선된 FUNWAVE-TVD 모형과 KOOS를 연계하여 부산항 내에서의 파고를 예측할 수 있는 시스템을 구성하였음. 개선과 보완을 통하여 부산항 외에 다른 항에도 적용할 계획임.

- 수중 생존자 탐지형 청음시스템은 침몰 선박에 초기 생존자 확인 및 구축 계획에 지원.

- 수중 생존자 탐지형 청음시스템을 통한 실시간 음성신호 복조 기술 확보로 수중통신 기술에 활용.

- 본 연구를 통해 개발된 부유식 파랑저감장치는 해상공사에서 긴급한 설치를 통해 파랑저감효과를 거두고자 할 경우에 활용이 가능함.

제 6 장 참고문헌

- 한국해양과학기술원 (2016). 부산항 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축.
- 한국해양연구원 (2005). 전해역 심해설계과 추정 보고서 II.
- Abadie, S.M., Harris, J.C., Grilli, S.T., Fabre, R. (2012). Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands): Tsunami source and near field effects. *Journal of Geophysical Research*, 117(C05030).
- Ahrens, J.P. and Heimbaugh, M.S. (1988). Irregular wave runup on riprap revetments. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 114(4), 524-530.
- Allen, A. and Plourde, J.P. (1999). Review of leeway: Field experiments and implementation. U.S. Coast Guard Rep. CG-D-08-99, 351 pp.
- An, C., Liu, P.L.-F., and Seo, S.N. (2012). Large-scale edge waves generated by a moving atmospheric pressure. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(042001), 1-4.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666.
- Breivik, O. and Allen, A.A. (2008). An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and North Sea. *Journal of Marine Systems*, 69, 99-113.
- Briggs, M. J. (2001). Performance characteristics of a rapidly installed breakwater system,. ERDC/CHL-TR-01-13, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Briggs, M., Ye, W., Demirbilek, Z., and Zhang, J. (1999). Comparison of hydrodynamic parameters for a floating breakwater. *Proceedings of First International Symposium on Monitoring of Breakwaters*, 37-51.
- Chen, Q. (2006). Fully nonlinear Boussinesq-type equations for waves and currents over porous beds. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(2), 220-230.
- Chen, Y. L. and Hsiao, S. C. (2016). Generation of 3D water waves using mass

- source wavemaker applied to Navier–Stokes model. *Coastal Engineering*, 109, 76–95.
- De Wall, J.P. and van der Meer J.W. (1992) Wave runup and overtopping on coastal structures. *Proceedings of 23rd International Conference on coastal Engineering*, Venice, Italy.
- Erduran, K.S., Ilic, S. and Kutija, V. (2005). Hybrid finite–volume finite–difference scheme for the solution of Boussinesq equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 49, 1213–1232.
- Fowler, J., Resio, D., Briggs, M., Pollock, C. (1996). Potential Uses for the Rapidly Installed Breakwater System. *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering In Coastal Engineering*, 1631–1639.
- Furnans, J.E., Hodges, B.R. and Imberger, J. (2005). Drifter modeling and error assessment in wind driven currents. *CRWR Online Reports*, 05–05, 172 pp.
- Gottlieb, S. and Shu, C.–W. (1998). Total variation diminishing Runge–Kutta schemes. *Mathematics of Computation*, 67(221), 73–85.
- Hedges, T. S. and Reis, M. T. (1998) Random wave overtopping of simple sea walls: A new regression model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 130(1), 1–10.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®, *Coastal Engineering*, 71, 102–118.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L. (2015). Three–dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35–47.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open–source CFD library: OpenFoam®, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), 1073–1088.
- Jiang, G.–S. and Shu, C.–W. (1996). Efficient implementation of Weighted ENO schemes. *Journal of Computational Physics*, 126, 202–228.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. I: 1D. *Journal of Waterway, Port,*

- Coastal, and Ocean Engineering, 126(1), 39-47.
- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B. and Dalrymple, R.A. (1998). FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Boussinesq wave model, Documentation and User's manual. Research report. CACR-98-06, University of Delaware.
- Kobayashi, M., Terashi, M. and Takahashi, K. (1987). Bearing capacity of a rubble mound supporting a gravity structure. Report of the Port and Harbour Research Institute, 26(5), 215-252.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W., Kim, D. S., and Bae, K. S. (2016). Numerical Analysis on Wave Characteristics around Submerged Breakwater in Wave and Current Coexisting Field by OLAFOAM. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 28(6), 332-349.
- Leveque, R.J. (2004). Finite-Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge: Cambridge University Press, 558p.
- Liang, Q. and Marche, F. (2009). Numerical resolution of well balanced shallow water equations with complex source terms. Advances in Water Resources, 32, 873-884.
- Lin, P. and Liu, P. L. F. (1999). Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 125(4), 207-215.
- Luth, H.R., Klopman, G. and Kitou, N. (1994). Kinematics of waves breaking partially on an offshore bar; LDV measurements of waves with and without a net onshore current. Report H-1573, Delft Hydraulics.
- Mori, N. and Cox, D.T. (2003) Statistical modeling of overtopping for extreme waves on fixed deck. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 129 (4), 165-173.
- Park, K.-S., Heo, K.-Y., Jun, K, Kwon, J.-I., Kim, J., Choi, J.-Y., Cho, K.-H., Choi, B.-J., Seo, S.-N., Kim, Y.H., Kim, S.-D., Yang, C.-S., Lee, J.-C., Kim, S.-I., Kim, S., Choi, J.-W., Jeong, S.-H. (2015) Development of the operational oceanographic system of Korea. Ocean Science Journal, 50 (2), 353-369.
- Shi, F., Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Chen, Q. and Kennedy, A. (2001). A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates. Coastal

- Engineering, 42, 337–358.
- Synolakis, C. E. (1986) The run-up of long waves. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Thacker, W.C. (1981). Some exact solutions to the nonlinear shallow water wave equations. *Journal of Fluid Mechanics*, 107, 499–508.
- The SWAN team (2016). SWAN user manual, SWAN Cycle III version 41.10. Environmental Fluid Mechanics Section, Delft University of Technology.
- Thompson, K.R., Sheng, J., Smith, P.C. and Cong, L. (2003) Prediction of surface currents and drifter trajectories on the inner Scotian shelf. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3287.
- Toner, M. Kirwan Jr. A., Kantha, L. and Choi, J. (2001) Can general circulation models be assessed and their output enhanced with drifter data? *Journal of Geophysical Research*, 106 (C9), 19563–19579.
- Ullman, D.S., O'Donnell, J. Kohut, J., Fake, T. and Allen, A. (2006). Trajectory prediction using HF radar surface currents: MonteCarlo simulations of prediction uncertainties. *Journal of Geophysical Research*, 111, C12005.
- Shi, F., Kirby, J.T., Harris, J.C., Geiman, J.D. and Grilli, S.T. (2012). A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43–44, 36–51.
- Van Leer, B. (1977). Towards the ultimate conservative difference scheme, IV. A new approach to numerical convection. *Journal of Computational Physics*, 23, 276–299.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J. (1989). Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(2), 269–284.
- Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., and Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094.
- Yamamoto, S., Daiguji, H. (1993). Higher-order-accurate upwind schemes for solving the compressible Euler and Navier–Stokes equations. *Computers and Fluids* 22(2/3),

259–270.

Zhou, J.G., Causon, D.M., Mingham, C.G., Ingram, D.M. (2001). The surface gradient method for the treatment of source terms in the shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 168, 1–25.