

부산항 고해상도 해양정보제공시스템 개발, 구축

Development and Establishment of High Resolution
Physical Oceanographic Real-Time System at Busan Port

2016. 6. 30

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “부산항 고해상도 해양정보제공시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 6. 30.

총괄연구책임자 : 서 승 남

참 여 연 구 원 : 박 광 순

“ : 전 기 천

“ : 이 종 찬

“ : 김 상 익

“ : 김 선 정

“ : 정 진 용

“ : 허 기 영

“ : 김 진 아

“ : 최 진 용

“ : 최 정 운

“ : 김 태 균

“ : 최 우 리

“ : 김 보 미

“ : 이 수 찬

“ : 최 영 광

보고서 초록

과제고유 번호	BSPE9935D -1106-2	해당단계 연구기간	2015. 7. 1. - 2016. 6. 30.	단계 구분	단년도 사업
연구사업명	중사업명	창의사업			
	세부사업명	기관 주요사업			
연구과제명	대과제명	국가사회현안대응과제			
	세부과제명	부산항 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축			
연구책임자	서승남	해당단계 참여연구원수	총 : 16 명 내부: 10 명 외부: 6 명	해당단계 연구비	정부 : 200,000 천원 기업 : 천원 계 : 200,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 16 명 내부: 10 명 외부: 6 명	총 연구비	정부 : 200,000 천원 기업 : 천원 계 : 200,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 이사부호기반시설건설단		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	41
<p>1. 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축 및 운영</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 고해상도 부산항 해양기상예측 시스템 <ul style="list-style-type: none"> - Cycling 3D-Var 방법을 이용한 자료동화 시스템 구축 ○ 고해상도 부산항내 조석 및 3차원 해양순환예측 시스템 <ul style="list-style-type: none"> - MOHID 모형을 이용한 연안 순환 예측 시스템 구축 ○ 고해상도 부산항내 파랑예측 시스템 <ul style="list-style-type: none"> - FUNWAVE-TVD 모형의 개선 - SWAN, FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 파랑예측 시스템 구축 ○ 관측자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화 <ul style="list-style-type: none"> - 국립해양조사원, 기상청의 부산항 인근에서 관측한 자료를 이용하여 모델 검증 수행 <p>2. 부산항 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작, 설치 및 운영</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 시제품 제작 ○ 관련 기관에 시제품 설치, 활용기술 교육, 지원 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	부산항, 고해상도 해황정보제공시스템, 자료동화 시스템, MOHID 모형, FUNWAVE-TVD 모형			
	영 어	Busan port, high resolution physical oceanographic real-time system, data assimilation system, MOHID model, FUNWAVE-TVD model			

요 약 문

I. 제 목

부산항 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축

II. 연구개발의 목적 및 필요성

부산항은 국내 제일의 무역항으로 수많은 대형 선박이 출입하므로 항내 안전을 보장하기 위해서는 바람, 파랑, 해류, 조류 등의 실시간 해양환경 현황 파악 뿐 아니라 정밀한 사전 예측 정보가 요구된다. 이에 본 연구에서는 부산항내 해양안전 및 해난사고시 대처를 위한 실시간 해황정보제공시스템을 개발하고, 이 시스템을 부산 시청 등의 유관기관에 제공하여 항만 관계자 및 선장 등에 유용한 정보를 제공하기 위한 표출시스템을 제작하였다.

예측 시스템의 예측 항목은 부산항 인근의 고해상도 기상 요소, 파랑, 폭풍해일, 조석, 조류, 3차원 순환 및 수온, 염분 등이 있으며, 최소 60 m 해상도의 결과를 제공하였다. 또한, 모델 검증을 위해 국립해양조사원, 기상청 등의 부산항 주변의 관측 자료를 수집하여 검증 및 고도화에 이용하고, 파랑 관측을 수행하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축 및 운영

- 고해상도 부산항 해양기상예측 시스템
- 고해상도 부산항내 조석 및 3차원 해양순환예측 시스템
- 고해상도 부산항내 파랑예측 시스템
- 관측자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화

2. 부산항 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작, 설치 및 운영

- 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 시제품 제작
- 관련 기관에 시제품 설치, 활용기술 교육, 지원

IV. 연구개발결과

1. 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축 및 운영

- 고해상도 부산항 해양기상예측 시스템 개발
 - 위성관측 자료의 전처리 시스템 개발.
 - 수집자료 전처리 시스템 자동화 및 구축.
 - Cycling 3D-Var 방법을 이용한 자료동화 시스템 구축.
- 고해상도 부산항내 조석 및 3차원 해양순환예측 시스템

- MOHID 모형을 이용한 연안 순환 예측 시스템 구축.
- 고해상도 부산항내 파랑예측 시스템
 - 연안 순환 예측 시스템과 동일한 격자 구성으로 SWAN 모형을 이용하였으며, 항내의 반사 및 회절 현상을 정확히 예측하기 위하여 FUNWAVE-TVD 모형을 이용함.
 - 수치모형의 부산항 및 모형 내의 오류를 수정한 FUNWAVE-TVD 모형을 사용함.
 - FUNWAVE-TVD 모형을 사용하여 Vincent and Briggs의 쇄파 실험에 적용 후 wave-induced current를 재현하였으며, 쇄파 기법간의 비교를 수행함.
- 관측자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화
 - 파랑예측시스템의 검증을 위하여 수압식 파고계를 이용한 파랑 관측을 수행함.
 - 국립해양조사원, 기상청의 부산항 인근에서 관측한 자료를 이용하여 모델 검증 수행함.

2. 부산항 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작, 설치 및 운영

- 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 시제품 제작
 - 표출 항목 : 기상관측 정보, 파라예측 정보, 조위, 유속 예측정보 등.
- 관련 기관에 시제품 설치, 활용기술 교육, 지원
 - 부산시청과 제주센터에 설치, 홍보함.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 부산항 출입항 선박의 안전항해 지원 및 항만 운영 (VTS 등)에 연계.
- 항내 유류 및 위험물질 유출 등의 사고 발생 시 즉각적인 예측정보 활용.
- 해양과기원 신축공사시 이용 (기상자료), 부산 이전 후 조사선 등의 항만 이용에 활용

목 차

제출문	1
보고서 초록	2
요약문	3
제 1 장 서론	10
제 1 절 연구배경 및 필요성	10
제 2 절 연구목적 및 범위	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 1 절 국내 현황	13
제 2 절 국외 현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	16
제 1 절 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축 및 운영	16
1. 고해상도 부산항 해양기상예측 시스템	16
2. 고해상도 부산항내 조석 및 3차원 해양순환예측 시스템	20
3. 고해상도 부산항내 파랑예측 시스템	21
4. 관측 자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화	30
제 2 절 부산항 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작, 설치 및 운영	35
1. 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 시제품 제작	35
2. 유관 기관에 시제품 설치 및 운영	36
제 3 절 제주 김녕항 고해상도 해황정보제공시스템 구축 및 운영	37
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	38
제 1 절 연구개발목표 달성도	38
제 2 절 대외기여도	38

제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	40
제 6 장 참고문헌.....	41

그 립 목 차

그림 2.1 미국 NOAA의 nowCOAST	14
그림 3.1 ASCAT 위성의 해상풍 관측지점 (12.5 (km) 해상도)	16
그림 3.2 실시간 수집 관측지점 위치	17
그림 3.3 기상 관측자료 수집 및 전처리 과정	17
그림 3.4 Cycling 3D-Var 방법을 이용한 자료동화 시스템 구축 및 해양기상예측모델과의 연계	18
그림 3.5 Cycling 3D-Var 방법 개요	18
그림 3.6 2016년 1월-2월 사이의 해양기상 예측모델 예측정확도	19
그림 3.7 자료동화 적용 전(파랑색), 적용 후(붉은 색)의 WRF 풍속 비교	19
그림 3.8 시스템 개요	20
그림 3.9 KOOS (L1, L2) 격자(좌) 및 부산항 고해상도 (L3, L4, L5) 격자(우)	20
그림 3.10 유속, 유향과 같이 나타낸 조위(좌), 수온(중간), 염분(우)	21
그림 3.11 수정 전(좌) 모형과 수정 후(우) 모형의 wave-induced currents 비교	23
그림 3.12 NSW에 의한 쇄파 실험결과와 eddy viscosity 방법을 이용한 쇄파 실험결과를 비교	23
그림 3.13 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0} = 1$ (m), $T_p = 8$ (s))	25
그림 3.14 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0} = 1$ (m), $T_p = 10$ (s))	26
그림 3.15 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0} = 1$ (m), $T_p = 12$ (s))	26
그림 3.16 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0} = 3$ (m), $T_p = 8$ (s))	27
그림 3.17 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0} = 3$ (m),	

	$T_p=10(s)$ ·····	27
그림 3.18	파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=3$ (m), $T_p=12(s)$ ·····	28
그림 3.19	파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=5$ (m), $T_p=8(s)$ ·····	28
그림 3.20	파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=5$ (m), $T_p=10(s)$ ·····	29
그림 3.21	파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=5$ (m), $T_p=12(s)$ ·····	29
그림 3.22	파랑 관측 정점 및 수심도(좌)와 수압식 파고계(우)·····	30
그림 3.23	T1에서 관측된 유의파고 및 유의파 주기·····	30
그림 3.24	T2에서 관측된 유의파고 및 유의파 주기·····	31
그림 3.25	T3에서 관측된 유의파고 및 유의파 주기·····	31
그림 3.26	기상청 파랑관측 정점(좌)과 국립해양조사원 조위, 유속관측 정점 (우)·····	32
그림 3.27	2016년 1월 - 2016년 4월 조석비교·····	32
그림 3.28	2016년 1월 - 2016년 4월 수온비교·····	33
그림 3.29	2016년 1월 - 2016년 4월 파고 비교·····	33
그림 3.30	2016년 1월 - 2016년 4월 주기 비교·····	34
그림 3.31	검증에 사용된 예측시스템 경계의 입사파고·····	34
그림 3.32	T1 정점에서 유의파고 검증 결과·····	35
그림 3.33	T2 정점에서 유의파고 검증 결과·····	35
그림 3.34	T3 정점에서 유의파고 검증 결과·····	35
그림 3.35	부산항 (북항) 주변의 해황예측 표출 시스템 제작·····	36
그림 3.36	김녕항 주변의 해황예측 표출 시스템 제작·····	36
그림 3.37	부산 시청(좌) 및 제주 센터(우) 설치·····	37
그림 3.38	KOOS (L1, L2) 격자(좌) 및 김녕항 고해상도 (L3, L4, L5) 격자 (우)·····	37

표 목 차

표 3.1 FUNWAVE-TVD 수치모형을 이용한 파랑예측 시스템 구성 수치실험 개요···	24
표 4.1 연구개발목표 달성도·····	38

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경 및 필요성

1. 배경 및 필요성

가. 기술적 측면

- 현재 해양과기원에서는 운용해양예보시스템 (KOOS)을 개발, 운영 중인데, KOOS는 우리나라 연안뿐 아니라 동중국해 및 동해를 포함하는 큰 스케일의 동북아 예측시스템으로 주요 항만 300 (m) 급의 예측 시스템 구축이 목표임. 이를 발전시켜 우리나라 제일의 무역항인 부산항을 대상으로 해상도 높은 정밀격자 예측시스템을 구축하고 국지 해양관측을 실시하여 항만 내 해양예측의 필요성을 강조하기 위한 연구가 필요.
- 항내 고해상도 격자간격의 예측 시스템 구축 및 운영, 실시간 관측을 통한 실시간 검증 확대 등으로 국지 해황정보제공시스템 구축을 통한 고해상도 해황예측 기술 확보 필요.
- 표출 시스템에 대한 생산자와 사용자 사이의 견해 차이를 좁혀 예측자료 실사용자와의 교류를 통한 예측자료 전달 기술의 개선 필요.

나. 경제·산업적 측면

(1) 지역사회 발전에 이바지

- 부산항에 위치한 해양과기원이 부산항 정밀 해황정보제공시스템을 개발, 구축 및 활용을 통해서 해양과기원이 위치한 지역사회(부산)의 발전에 기여함.
- 실시간 예측정보 활용으로 안전항해를 지원하며, 사고 발생 시 대책 수립 및 피해 저감에 기여함.

(2) 해양 교통안전의 선진화

- 부산항내 항해안전을 위한 정밀한 해양환경 현황 및 예측정보가 요구됨.
- 부산항은 국내 제일의 무역항으로 대형 선박의 입출항이 많아 안전운항을 위한 관리가 필요함.
- 미국, 일본 등의 해양 선진국에서는 항만에서의 안전하고 효율적인 입출항 관리를

위해 실시간 관측 및 예측 시스템을 운영하여 항만 이용자들에게 제공함으로써 부산항 활용도 제고와 선사유치에 기여함.

다. 사회·문화적 측면

- 국가는 경제 및 공공안전과 환경에 대한 국가적 의무를 강화해야 하는 시대적 흐름에 직면하고 있으며, 우리나라 해양환경의 종합해황정보 생산 능력 확보로 국가적 해양관련 해양재해·재난 피해 경감 및 위기관리 능력의 제고 필요.

라. 연구원 고유기능 발전과의 연관성

- 해양과기원은 국내 연안, 항만의 재해 위험도 분석 분야에서 주도적인 역할을 수행하고 있으며, 1990년 초반부터 주요 해양에 부이, 수압식 파고계, 해양관측 타워 등을 설치하여 꾸준히 운용하고 있고, 축적된 관측자료를 지속적으로 분석하여 우리나라 파랑 특성을 파악하는데 주도적인 역할을 담당하고 있음.
- 유류오염 사고 및 실종자 발생 시 즉각적인 예측모델 수립 및 운용이 가능.

제 2 절 연구목적 및 범위

1. 연구목적

- 부산항내의 기상, 파랑, 조석, 3차원 순환 예측 시스템 구축, 운영 및 시스템 개선을 통한 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축 및 운영.
- 시스템 실수요자를 위한 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작 및 교육 지원.

2. 연구내용

가. 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공 시스템 개발, 구축 및 운영

(1) 예측시스템 구축 및 운영

- 기상, 파랑, 3차원 순환, 조석 등의 1일 1회 72시간 예측 시스템 구축.

(2) 관측자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화

- 기상 요소 등 실시간 관측 수행.
- 국립해양조사원, 기상청 등 관측 자료 수집.

- 관측 자료를 이용한 모델 검증 수행.
- 현장관측 및 관측자료의 분석.

나. 해황정보 제공표출 시스템(시제품) 제작

(1) 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 표출시스템 제작

- 실사용자 의견 수렴 및 표출 방식 구상.
- 표출 시스템 제작.

(2) 관련 기관에 표출 시스템 제공, 활용기술 교육, 지원

- 부산시청 등의 유관기관에 정보 제공.
- 사용자 교육 및 피드백을 통한 시스템 개선.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 현황

- 해양과학기술원에서는 해양관련 국가기관, 산업체, 민간이 각종 해양활동 및 연안재해 등의 해양에서 발생하는 현안문제 해결에 필요로 하는 해양현황과 예측정보를 생산·제공하는 시스템인 운용해양예보시스템을 1단계 연구(2009-2013)를 수행하였고, 그 성과로 우리나라 연안과 주변 해역에 대한 해양환경 현황과 72시간 예측정보 생산시스템 KOOS (Korea Operational Oceanographic System)을 개발·운영하게 되었으며, 현재 2단계 연구(2014-2019)에서 개발된 시스템의 고도화 연구가 진행 중임.
- 운용해양예보시스템에는 우리나라 주요항만해역 해상상태 예측시스템으로 주로 주요 항만해역에서의 선박의 안전항해와 운송의 효율성을 제고하고, 민간의 해양활동 및 연안에서의 현안문제 해결에 필요한 해양환경 모니터링 정보와 예측정보를 생산·제공하는 I-MAPS(Integrated-MARitime Prediction System)를 포함함.

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 활용.
- 미국해양대기청 (NOAA) 산하 NOS (National Ocean Service)에서는 주요항만에서 해난사고 예방과 해양환경보호, 선박의 안전 항해를 위해 물리해양정보시스템인 PORTS (Physical Oceanographic Real-Time System)을 운용하고 있음.
 - 미국의 주요항만 부근을 운행하는 선박의 좌초와 충돌을 피하기 위해 필요한 해양 및 기상 정보를 선장에게 제공하여 안전하고 경제적인 항해를 지원.
 - 기상 (풍향, 풍속, 대기압), 파랑, 해수위, 조류, 수온, 염분 등을 실시간으로 관측하고 이와 함께 예측 정보를 제공하는 실시간 물리해양정보시스템 운영 중.

- 현재 Narragansett Bay, Los Angeles/Long Beach 항 등 13개 지역에서 운영 중. 향후 150개 지역으로 확대 계획.
- 미국의 nowCOAST는 NOAA에서 미국연안의 수천개의 실시간 관측소로부터의 관측정보와 해양예보정보를 ‘one-stop shopping’ 형태로 제공하는 web mapping portal이며, 사용자는 수천 개의 실시간 연안관측소에서의 실시간 정보와 NOAA의 예보정보를 손쉽게 빠르게 취득.

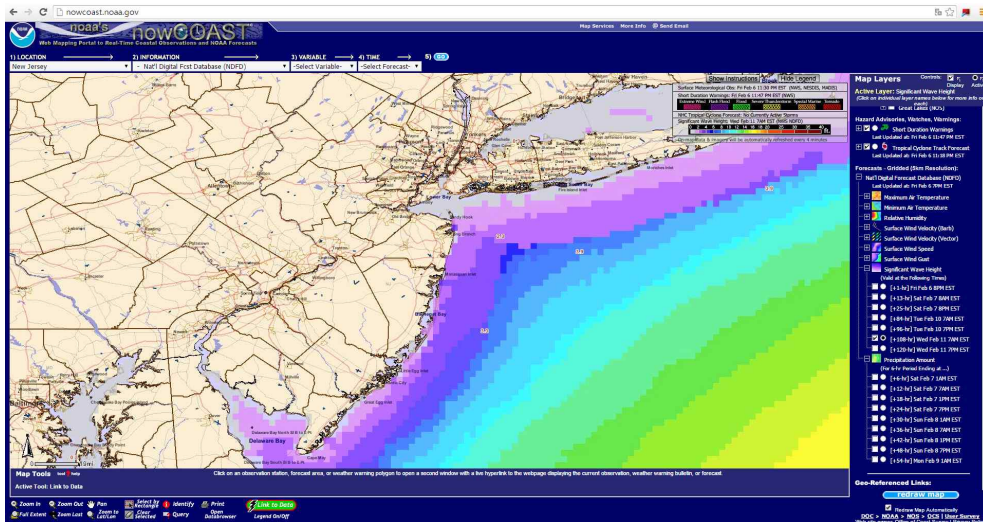


그림 2.1 미국 NOAA의 nowCOAST

- EU의 발틱해 운용해양학시스템(BOOS)는 발틱해에 연한 9개국(덴마크, 에스토니아, 핀란드, 독일, 라트비아, 리투아니아, 폴란드, 러시아, 스웨덴)의 19개 기관이 공동으로 개발·운영되는 운용해양시스템으로 수많은 관측소에서 실시간으로 해양자료를 수집. 자료는 각국의 국가 웹페이지를 통해 제공
- 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 활용함.
- 일본 기상청 및 이전의 항만기술연구소는 국립 기관으로 사용자로부터 사용료를 받고 사용자가 원하는 해양정보의 생산 지원이 안되기 때문에 항만공항 기술연구

소와 일본 기상청이 공동으로 "연안 개발기술 회사(CDIT)"를 설립하여 사용자에게 사용료를 받고 연안 환경 현황 및 예보 지원 체제 구축, 운영 중. 기상, 해상 등에 관한 실황, 예측정보를 실시간으로 제공하는 시스템을 구축하여 2004년부터 인터넷을 통해 정보를 제공함.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 부산항 실시간 고해상도 해양정보제공시스템 개발, 구축 및 운영

1. 고해상도 부산항 해양기상예측 시스템

가. 위성관측(해상풍) 자료의 전처리 시스템 개발

- ASCAT 해상풍 자료 수집(2015.04 - 현재까지) 및 품질관리체계 구축.
- 12.5 (km) 해상도의 ASCAT 위성 기반 풍향, 풍속 자료 수집 및 QC 자동화.
- ASCAT 해상풍 자료의 자료동화시스템 활용을 위한 전처리 시스템 개발 및 자동화.
- 일 2회 ASCAT 위성자료 수집 및 품질관리, 자료동화 입력자료 생산을 위한 전처리 시스템 자동화.

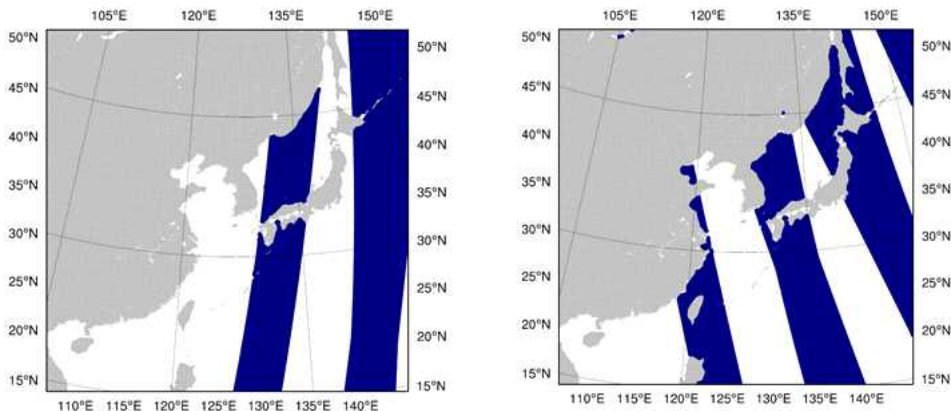


그림 3.1 ASCAT 위성의 해상풍 관측지점 (12.5 (km) 해상도)

나. 수집자료 전처리 시스템 자동화 및 구축

- 실시간으로 수집된 자료의 관측자료의 format을 자료동화시스템 입력자료 형태로 변환 (Little_r).
- 결측자료 및 중복지점 자료 제거 및 range check를 통한 에러 제거.
- 고층기상관측자료의 물리적/역학적 에러 및 일관성 검사를 통한 관측자료의 QC 수행.

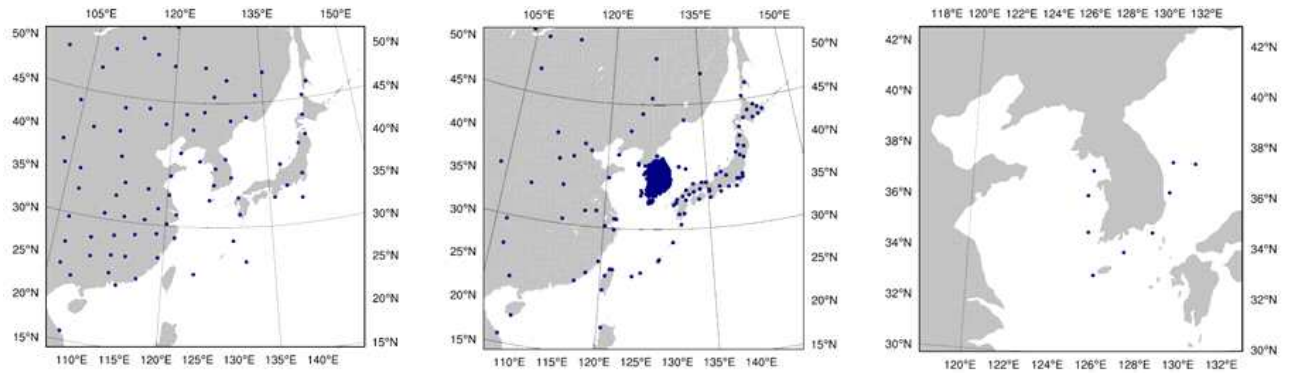


그림 3.2 실시간 수집 관측지점 위치

다. Cycling 3D-Var 방법을 이용한 자료동화 시스템 구축

- 실시간 기상관측자료의 통합 및 자료동화시스템 입력자료 생산(2회/일) 자동화 시스템 수립.

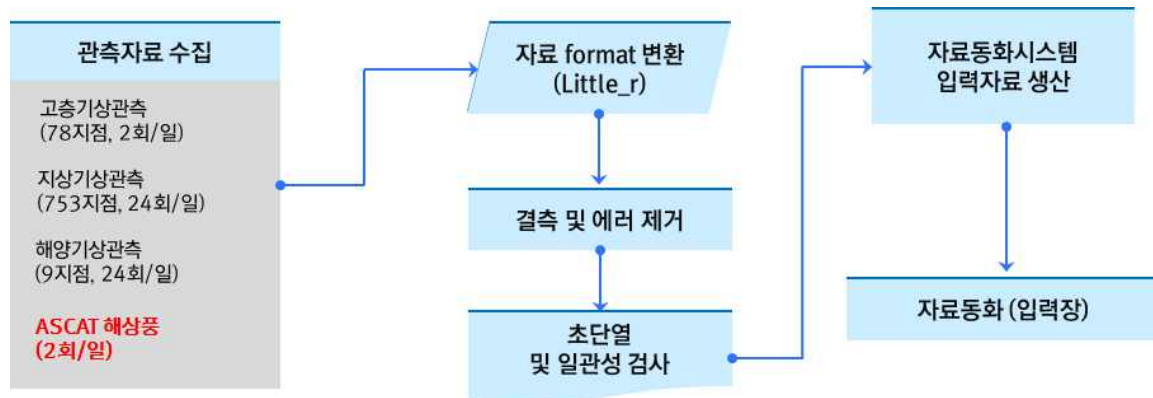


그림 3.3 기상 관측자료 수집 및 전처리 과정

- 해양기상 예측모델과 자료동화시스템의 연계체계 구축.

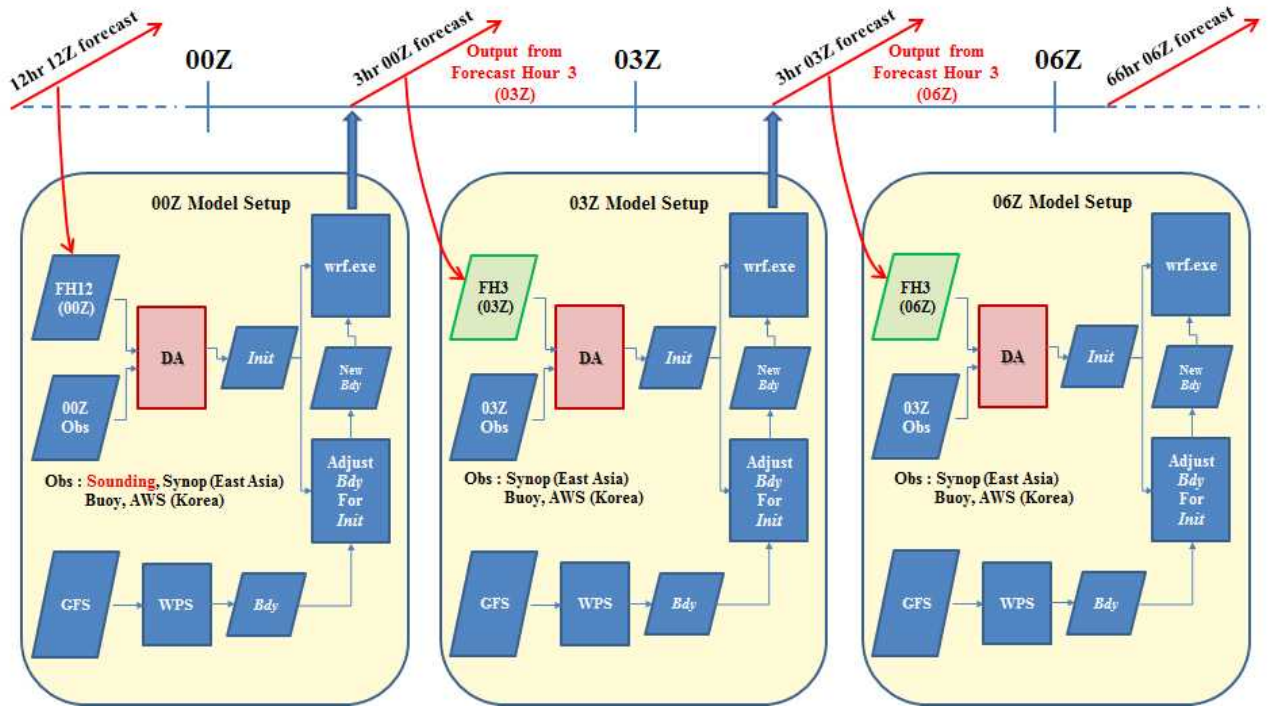


그림 3.4 Cycling 3D-Var 방법을 이용한 자료동화 시스템 구축 및 해양기상예측모델과의 연계

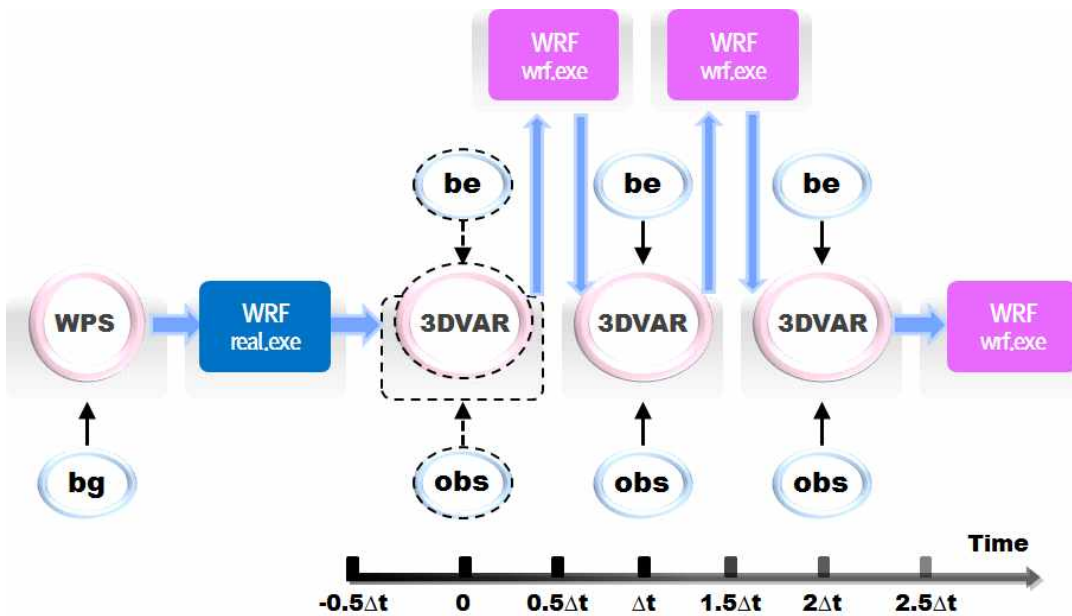


그림 3.5 Cycling 3D-Var 방법 개요

- 예측정확도 평가 결과 자료동화 적용 후 예측정확도가 2% 향상된 결과를 나타냄.

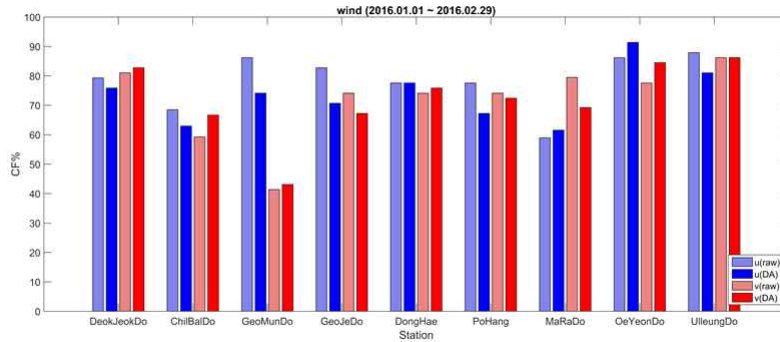


그림 3.6 2016년 1월-2월 사이의 해양기상 예측모델 예측정확도
(자료동화 적용 전: 파랑, 적용 후: 빨강)

라. 자료동화 적용 전/후의 해양기상예측시스템 (WRF) 해상풍속 결과 비교

- 9개 지점의 부이 관측자료를 사용하여 Efficiency, Index of agreement, RMSE를 산출하여 예측정확도 비교.

$$Efficiency = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

(두 통계량 모두 1.0이 perfect fit을 나타냄)

- 자료동화 적용 후의 풍속 예측결과가 적용 전보다 개선된 효과를 보이고 있음.
- 자료동화의 효과는 초기시간으로부터 40시간 까지 지속되는 효과가 나타남.

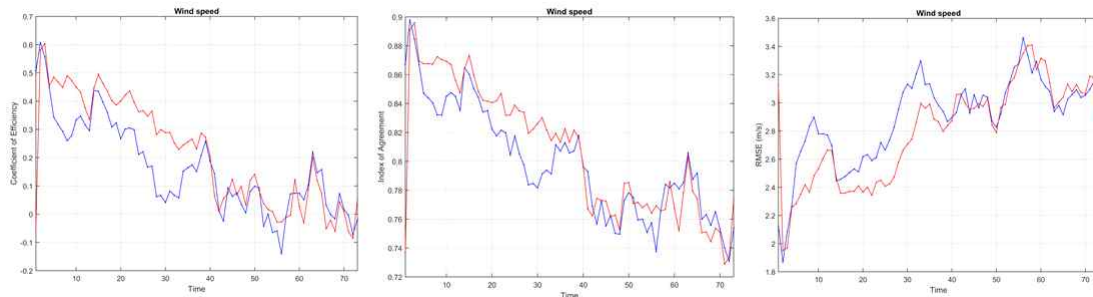


그림 3.7 자료동화 적용 전(파랑색), 적용 후(붉은 색)의 WRF 풍속 비교
(Efficiency(좌), Index of agreement(중간), RMSE(우))

2. 고해상도 부산항내 조석 및 3차원 해양순환예측 시스템

가. 시스템 개요

- 부산항 3차원 순환예측 시스템의 순환예측은 운용해양예보시스템(KOOS)에서 자료를 제공받아 부산항 인근에서 정밀격자로 순환예측을 수행함. MOHID 모델을 사용하고, 조석개방경계조건은 NAO.99jb, 3차원 초기조건은 HYCOM 자료를 사용함.

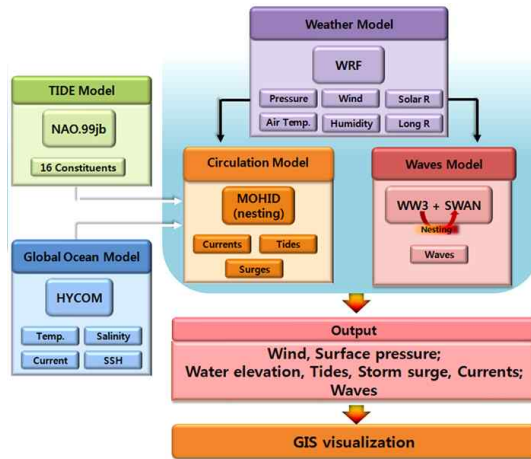


그림 3.8 시스템 개요

나. 시스템 영역

- 부산항 3차원 순환예측 시스템은 KOOS 자료를 받아 2단계 nesting 으로 이루어져 있고, L3, L4, L5 의 해상도는 각각 2 (km), 600 (m), 200 (m) 임.

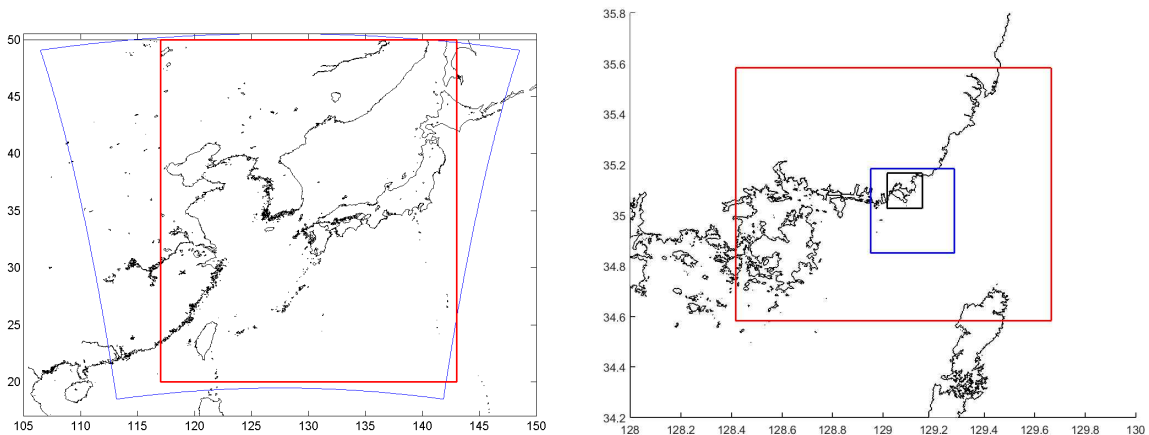


그림 3.9 KOOS (L1, L2) 격자(좌) 및 부산항 고해상도 (L3, L4, L5) 격자(우)

- 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 필요함.
- 구축하려는 격자가 연안으로 한정되어 있으므로 광역에서의 조석 및 순환결과는 운용해양예측 시스템 (KOOS)의 9 (km) 해상도의 결과를 사용하였음.
- 연안 순환 예측 시스템의 주요 개념은 보다 큰 영역에서 계산한 모형의 결과를 정밀영역에서 초기조건 및 경계조건으로 적용하는 것으로 낮은 해상도의 모형결과를 정밀 영역의 격자에 내삽 적용하여 초기조건을 구성해야 함 (Leitão et al, 2005).
- 여기에 모형을 3차원 baroclinic으로 구성하여 고해상도의 국지 조석, 조류, 기상 자료 등의 자료들을 추가하여 계산하는데, 천문조에 의한 조석 및 조류 정보는 광역에서 2차원 barotropic 모형을 구성하여 입력함.
- 연안 순환 예측 시스템은 1일 1회 운용되며, 조석, 수온, 염분의 결과의 예를 그림 3.10에 제시하였음.

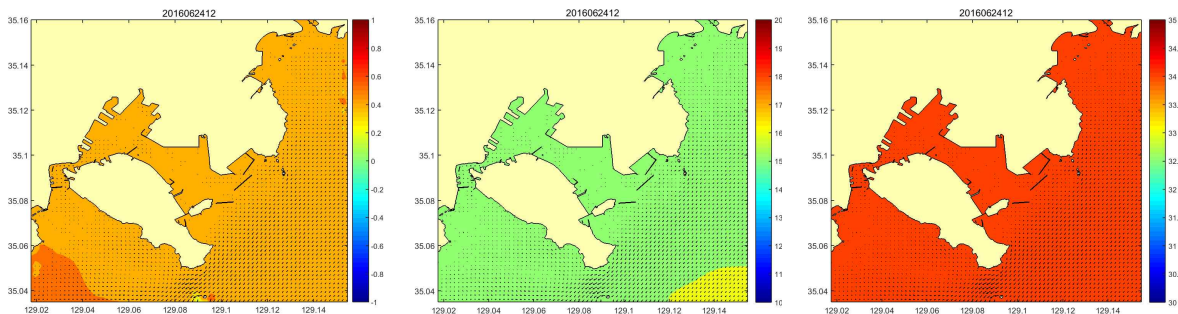


그림 3.10 유속, 유향과 같이 나타낸 조위(좌), 수온(중간), 염분(우)

3. 고해상도 부산항내 파랑예측 시스템

- 파랑예측 시스템은 연안순환예측 시스템과 같은 격자 구성으로 SWAN 모형을 이용하여 구축하였으며, 항내의 반사 및 회절 현상을 정확하게 예측하기 위하여 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 예측시스템을 추가적으로 구축함.

가. FUNWAVE-TVD 수치모형의 개선

(1) FUNWAVE-TVD 수치모형의 개요

- FUNWAVE-TVD 수치모형은 Delaware 대학의 Shi 교수 등에 의해 개발됨 (Shi et al. 2012).
- FUNWAVE-TVD 수치모형은 Chen (2006)의 강비선형 Boussinesq 방정식을 지배 방정식으로 사용하며, 파랑의 천수 및 굴절, 회절, 반사, 쇄파 등 파랑변형의 모든 효과를 고려함.
- FUNWAVE-TVD 수치모형은 flux 항에 대해서는 유한체적기법인 MUSCL-TVD를 사용하며, 분산항에 대해서는 유한차분기법을 사용함. 특히 수치기법의 안정성을 높이기 위하여 limiter를 사용함.
- Flux항을 계산할 때 MUSCL-TVD 기법에 따라 각 cell의 경계에서 좌, 우측값을 계산한 뒤 이 값을 이용하여 numerical flux를 산정하는데, numerical flux를 계산하는 기법으로는 HLL 기법을 사용함.
- FUNWAVE-TVD 수치모형은 버전 1.0이 개발된 이후 one-way nesting 기법의 추가, 바람 효과 및 공간에 따른 다른 마찰계수의 고려, 코드의 오류 수정 및 계산 속도의 개선 등이 수행되면서 버전 2.1까지 개발됨.
- FUNWAVE-TVD 수치모형에서 쇄파를 모의하는 방법은 수면변위와 수심의 비(R_{sd})를 이용하는 방법과 Kennedy 등(2000)이 제안한 eddy viscosity를 이용한 방법 2가지를 사용함. 특히 R_{sd} 를 이용하는 방법의 경우 비율이 일정 값 이상인 cell에서는 Boussinesq 방정식을 비선형 천수방정식(NSWE)으로 전환하여 NSWE에 의한 쇄파를 모의함.

(2) FUNWAVE-TVD 수치모형의 개선

- FUNWAVE-TVD 수치모형 버전 2.1의 코드를 분석하면 Shi et al. (2012)이 제시한 보존 형태의 방정식과 다른데, 본 연구에서는 보존 형태의 지배방정식을 다시 유도하여 FUNWAVE-TVD 수치모형을 수정하였음.
- Vincent and Briggs (1989)의 쇄파실험에 적용하여 그림 3.1에 수정 전 모형과 수정 후 모형의 wave-induced currents 결과를 비교함.

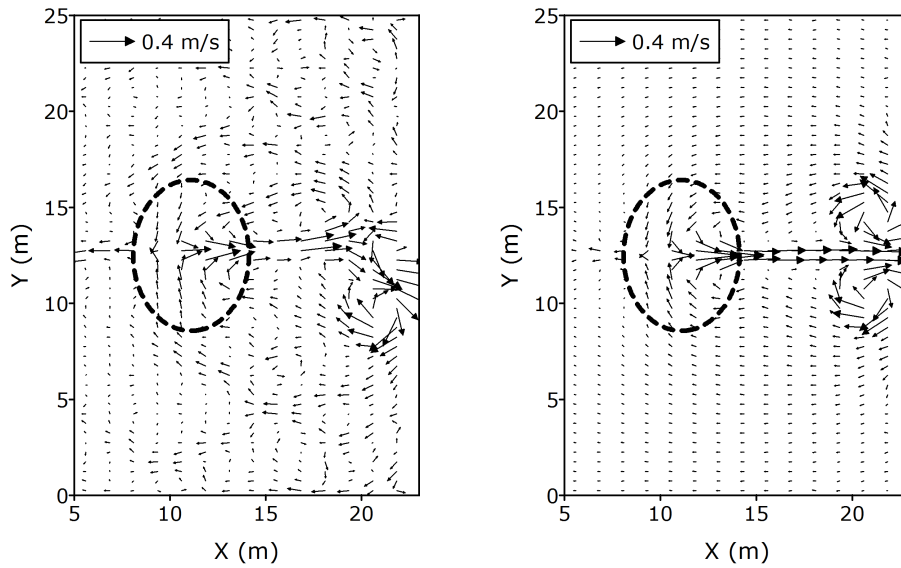


그림 3.11 수정 전(좌) 모형과 수정 후(우) 모형의 wave-induced currents 비교 (81.9 (s)에서 118.3 (s) 시간 평균함)

- 수정 전의 모형은 시간이 지남에 따라 수중천퇴의 중심선인 $y=12.5(m)$ 를 중심으로 current의 대칭성이 유지되지 않았지만, 수정된 모형은 대칭성이 유지되는 결과를 보임.
- Vincent and Briggs (1989)의 쇄파실험을 통하여 제시된 실험값과 비교하기 위하여 NSWE에 의한 쇄파 실험결과와 eddy viscosity에 의한 쇄파 실험결과를 비교함.
- Eddy viscosity를 이용한 쇄파 방법이 관측치를 잘 재현함.

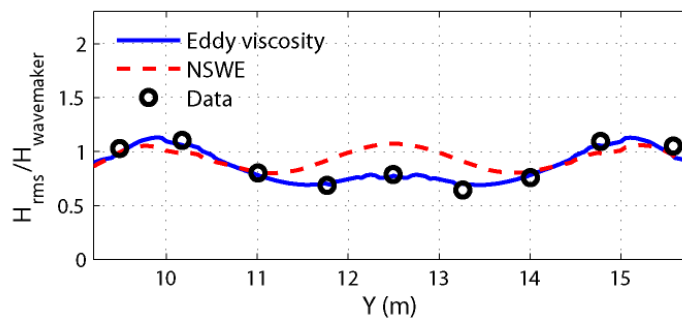


그림 3.12 NSWE에 의한 쇄파 실험결과와 eddy viscosity 방법을 이용한 쇄파 실험결과를 비교

나. FUNWAVE-TVD 수치모형을 이용한 파랑예측 시스템 구성

- 부산항의 실시간 고해상도 파랑 예측시스템을 구축하기 위하여 최근에 수정된 FUNWAVE-TVD 수치모형 (최와 서, 2015)을 사용하여 부산항 해역의 파랑변형 실험을 수행하였음.
- FUNWAVE-TVD 모형의 내부조파기를 이용하기 위하여 모의 영역을 220° 회전하여 파랑변형 실험을 수행하였으며, 모의 영역의 양 끝에는 파 흡수층(sponge layer)을 설치하였음.
- 내부조파기에서 형성되는 불규칙파 성분 중 최단파의 적절한 재현을 위하여 2.0 (m)의 정방격자를 구성하였음.
- 1.0 (m) 이상의 입사파고를 사용하여 파고, 주기, 파향 계급에 따른 실험을 수행하였으며, 모의되지 않은 파고, 주기, 파향은 내삽법(interpolation)을 이용하여 예측 시스템을 구축함.
- 총 7200 (s)를 모의하였으며, 전파되는 파랑이 충분히 발달되는 시간을 제외하여 2000 (s) - 7200 (s)까지의 결과를 유의파고의 계산에 사용하였음.
- 표 3.1에 FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 수치실험 개요를 제시함.

표 3.1 FUNWAVE-TVD 수치모형을 이용한 파랑예측 시스템 구성 수치실험 개요

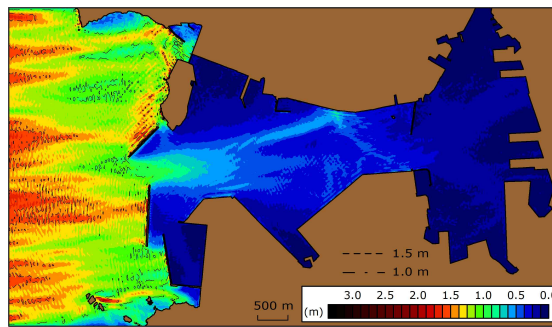
항 목	내 용			
입사파 제원	H_{mo} (m)	T_p (s)	Θ_p (°)	27 실험안
	1	8	-22.5	
	3	10	0	
	5	12	22.5	
계산 영역	$\Theta_p = -22.5$ (°)	9630 (m) × 6522 (m)		
	$\Theta_p = 0$ (°)	9630 (m) × 5542 (m)		
	$\Theta_p = 22.5$ (°)	9630 (m) × 6998 (m)		
격자 간격	$\Delta x = \Delta y = 2$ (m)			
격자수	$\Theta_p = -22.5$ (°)	15,709,792 (= 4816 × 3262)		
	$\Theta_p = 0$ (°)	13,349,952 (= 4816 × 2772)		
	$\Theta_p = 22.5$ (°)	16,856,000 (= 4816 × 3500)		

- 유의파고의 계산은 자유수면 변위의 분산을 이용한 다음 식을 사용함 (Goda, 2000).

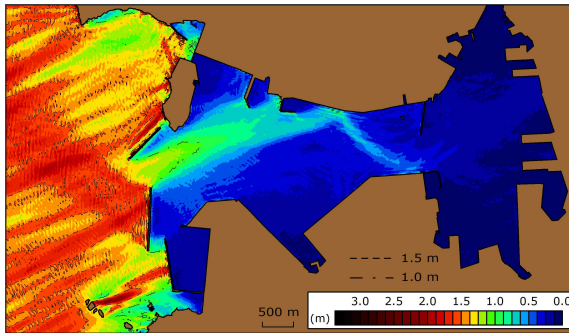
$$H_{1/3} = 4.004 \sqrt{\overline{\eta^2}}$$

여기서 η 는 자유수면 변위를 의미하며, $\overline{(\)}$ 는 2000 (s) - 7200 (s) 동안의 시간평균을 의미함.

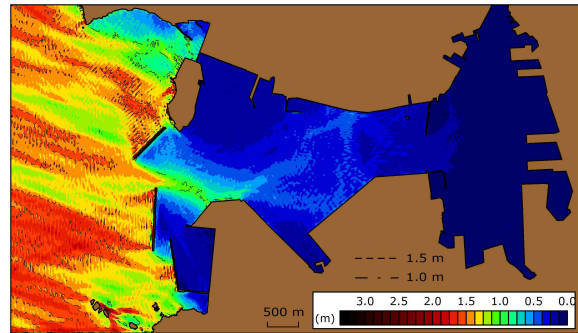
- 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과를 그림 3.13 - 3.21에 제시함.



(a) $H_{mo}=1$ (m), $T_p=8$ (s), $\Theta_p=0(^{\circ})$

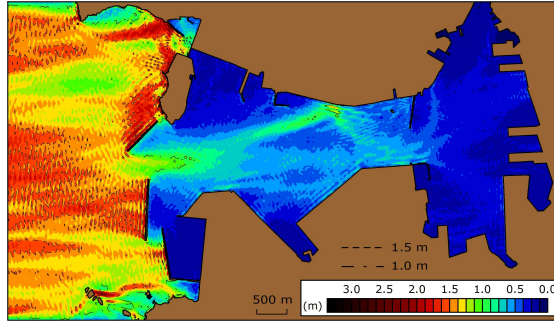


(b) $H_{mo}=1$ (m), $T_p=8$ (s), $\Theta_p=22.5(^{\circ})$

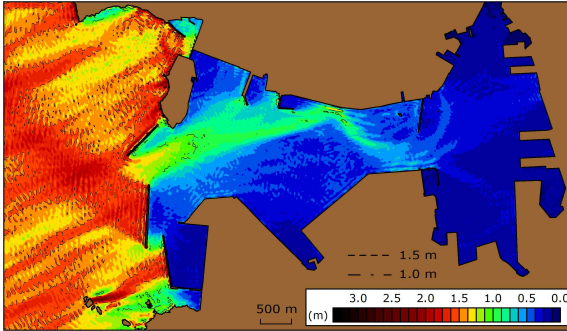


(c) $H_{mo}=1$ (m), $T_p=8$ (s), $\Theta_p=-22.5(^{\circ})$

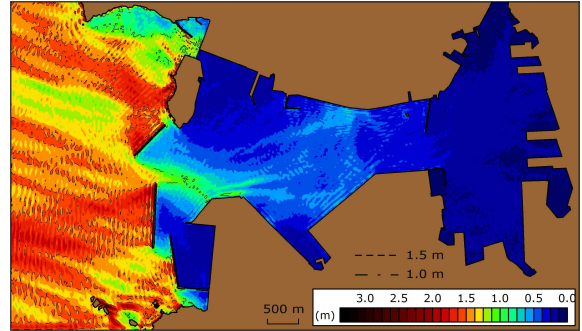
그림 3.13 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{mo}=1$ (m), $T_p=8$ (s))



(a) $H_{m0}=1$ (m), $T_p=10$ (s), $\Theta_p=0^\circ$

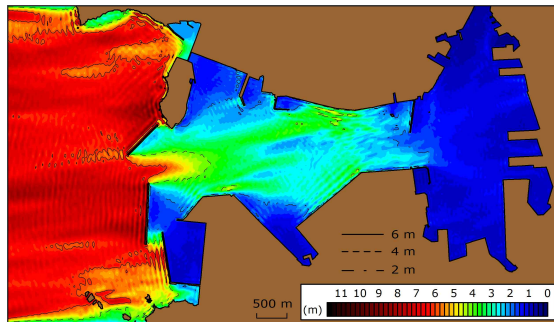


(b) $H_{m0}=1$ (m), $T_p=10$ (s), $\Theta_p=22.5^\circ$

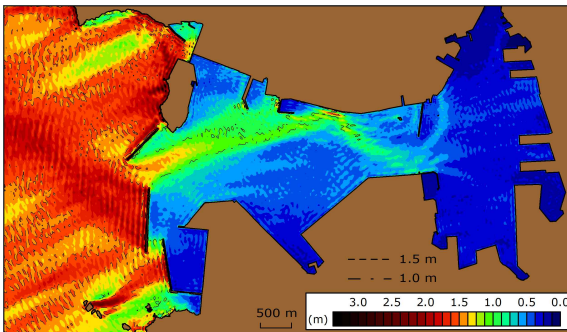


(c) $H_{m0}=1$ (m), $T_p=10$ (s), $\Theta_p=-22.5^\circ$

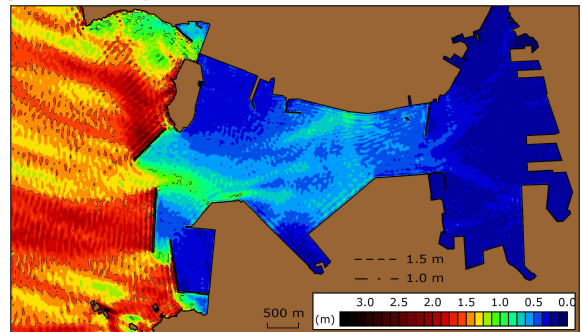
그림 3.14 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=1$ (m), $T_p=10$ (s))



(a) $H_{m0}=1$ (m), $T_p=12$ (s), $\Theta_p=0^\circ$

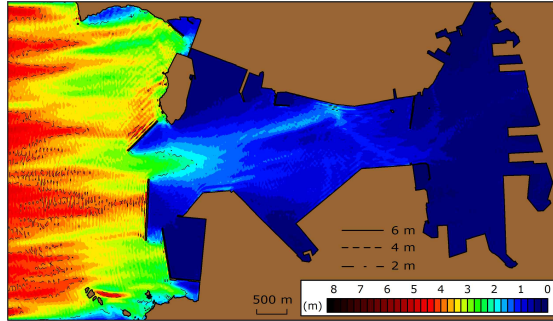


(b) $H_{m0}=1$ (m), $T_p=12$ (s), $\Theta_p=22.5^\circ$

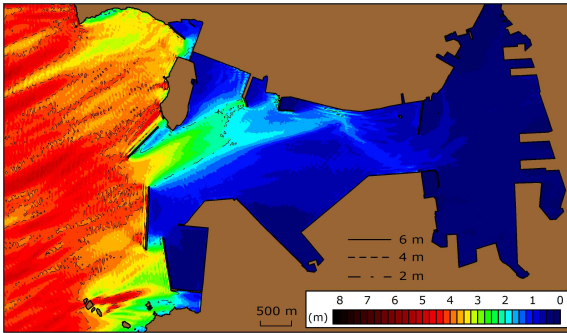


(c) $H_{m0}=1$ (m), $T_p=12$ (s), $\Theta_p=-22.5^\circ$

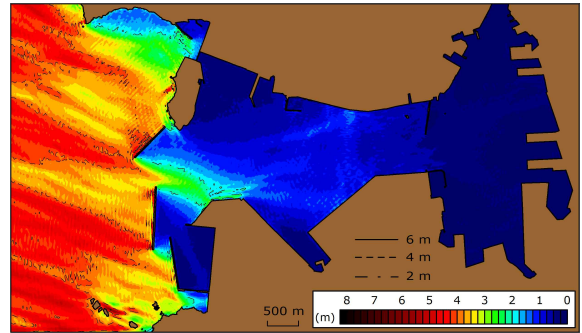
그림 3.15 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=1$ (m), $T_p=12$ (s))



(a) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=8$ (s), $\Theta_p=0(^{\circ})$

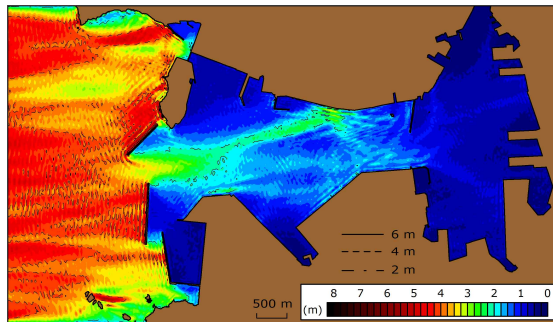


(b) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=8$ (s), $\Theta_p=22.5(^{\circ})$

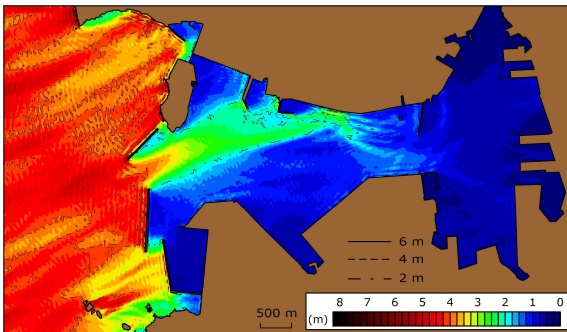


(c) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=8$ (s), $\Theta_p=-22.5(^{\circ})$

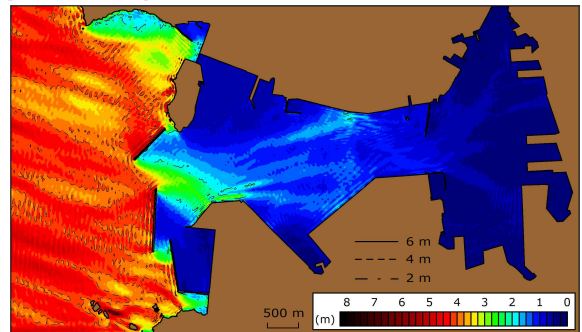
그림 3.16 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{mo}=3$ (m), $T_p=8$ (s))



(a) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=10$ (s), $\Theta_p=0(^{\circ})$

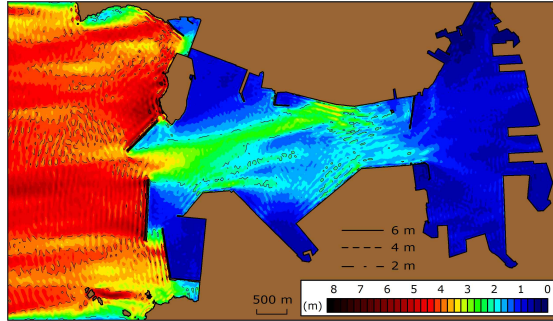


(b) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=10$ (s), $\Theta_p=22.5(^{\circ})$

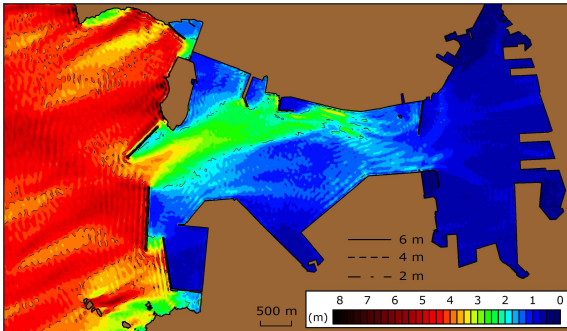


(c) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=10$ (s), $\Theta_p=-22.5(^{\circ})$

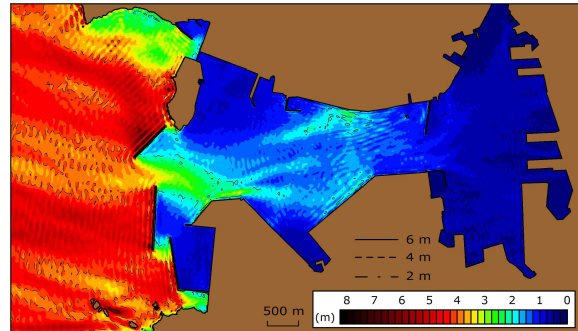
그림 3.17 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{mo}=3$ (m), $T_p=10$ (s))



(a) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=12$ (s), $\theta_p=0^\circ$

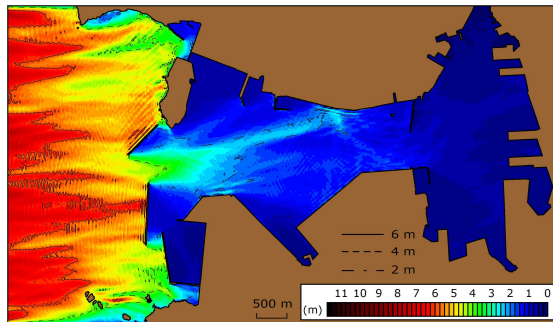


(b) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=12$ (s), $\theta_p=22.5^\circ$

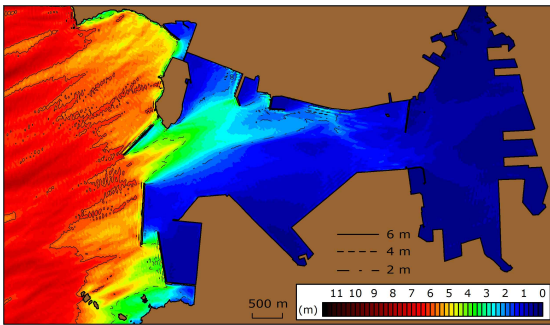


(c) $H_{mo}=3$ (m), $T_p=12$ (s), $\theta_p=-22.5^\circ$

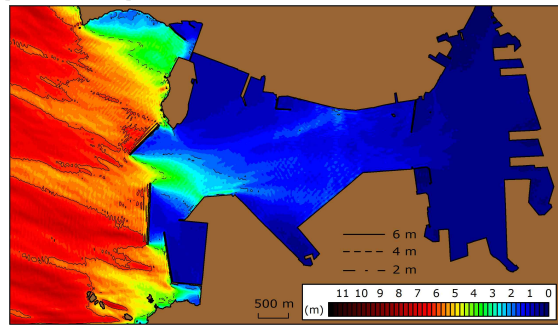
그림 3.18 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{mo}=3$ (m), $T_p=12$ (s))



(a) $H_{mo}=5$ (m), $T_p=8$ (s), $\theta_p=0^\circ$

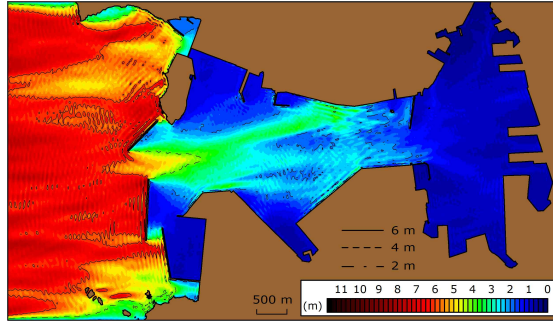


(b) $H_{mo}=5$ (m), $T_p=8$ (s), $\theta_p=22.5^\circ$

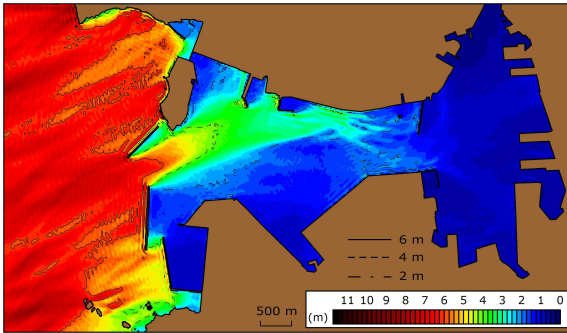


(c) $H_{mo}=5$ (m), $T_p=8$ (s), $\theta_p=-22.5^\circ$

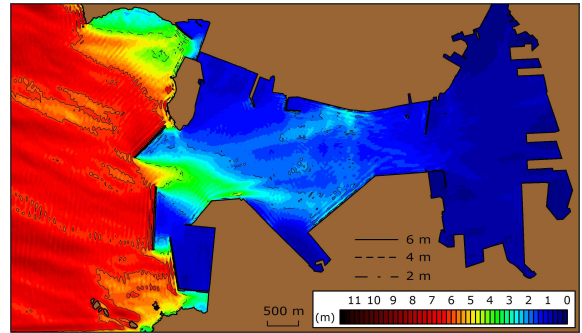
그림 3.19 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{mo}=5$ (m), $T_p=8$ (s))



(a) $H_{m0}=5$ (m), $T_p=10$ (s), $\theta_p=0^\circ$

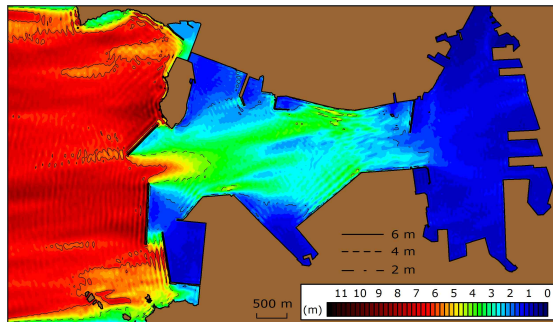


(b) $H_{m0}=5$ (m), $T_p=10$ (s), $\theta_p=22.5^\circ$

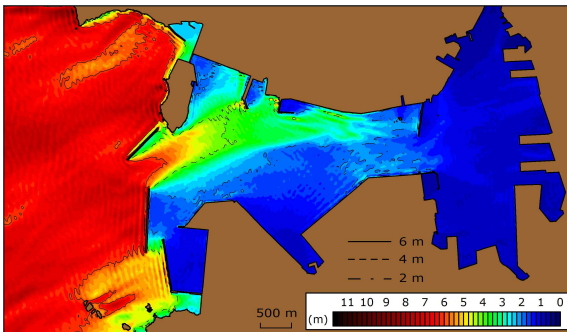


(c) $H_{m0}=5$ (m), $T_p=10$ (s), $\theta_p=-22.5^\circ$

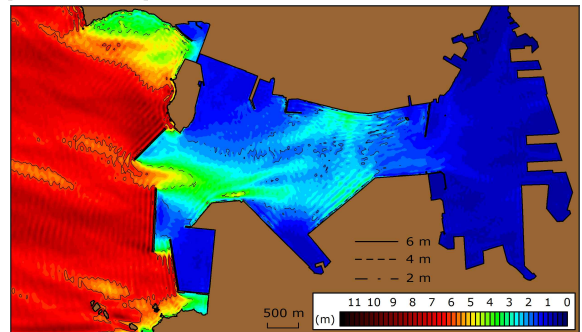
그림 3.20 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=5$ (m), $T_p=10$ (s))



(a) $H_{m0}=5$ (m), $T_p=12$ (s), $\theta_p=0^\circ$



(b) $H_{m0}=5$ (m), $T_p=12$ (s), $\theta_p=22.5^\circ$



(c) $H_{m0}=5$ (m), $T_p=12$ (s), $\theta_p=-22.5^\circ$

그림 3.21 파고, 주기, 파향 계급에 따른 유의파고 계산 결과 ($H_{m0}=5$ (m), $T_p=12$ (s))

4. 관측 자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화

가. 파랑 관측

- 파랑예측시스템의 검증을 위하여 2016년 1월부터 수압식 파고계를 이용하여 파랑 관측을 수행함.
- 파랑예측시스템의 검증을 위한 관측은 수압식 파고계를 이용하여 정점 T1, T2, T3에서 수행함.

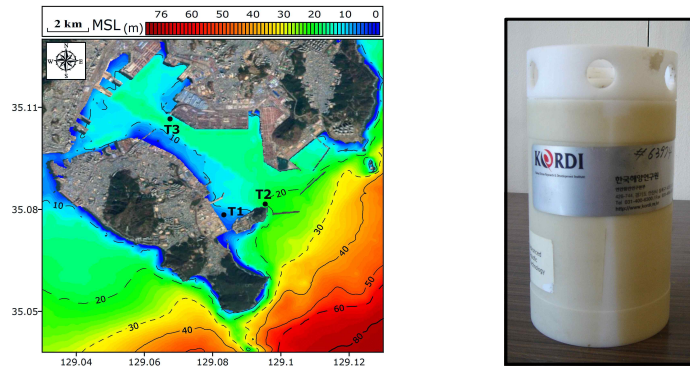


그림 3.22 파랑 관측 정점 및 수심도(좌)와 수압식 파고계(우)

- 각 정점에서 FFT 방법을 사용하여 유의파고 및 유의파 주기를 분석함.
- 정점 T1, T2, T3에서 관측된 유의파고의 범위는 각각 0.03-0.78 (m), 0.05-1.79 (m), 0.03-0.81 (m) 임.
- 정점 T1, T2, T3에서 관측된 유의파고와 유의파 주기를 제시함.

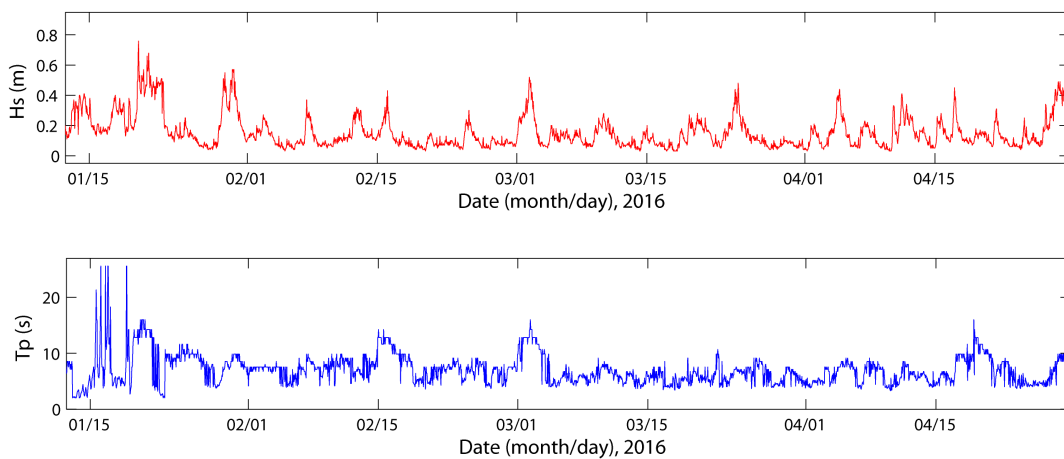


그림 3.23 T1에서 관측된 유의파고 및 유의파 주기

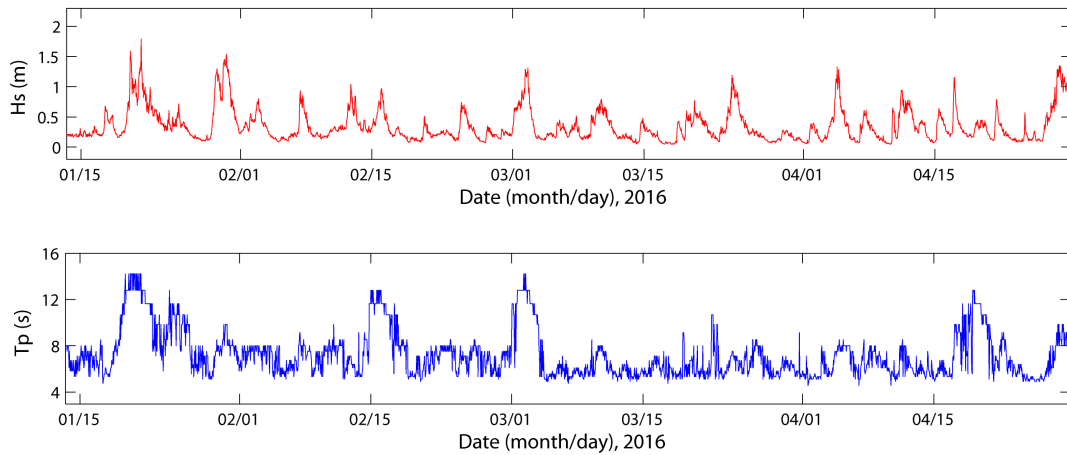


그림 3.24 T2에서 관측된 유의파고 및 유의파 주기

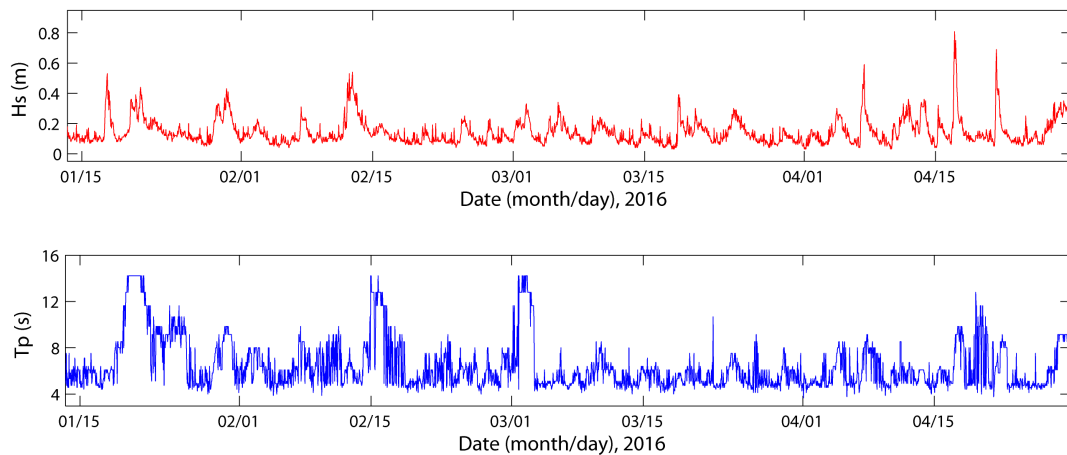


그림 3.25 T3에서 관측된 유의파고 및 유의파 주기

나. 관측자료 수집

- 부산항 인근에서 관측한 국립해양조사원의 부산 조위관측소의 조위자료와 대한해양 관측 정점의 유속, 유향 관측자료 획득.
- 부산항 인근에서 관측한 기상청의 부산항 북항 파고부이 관측 정점에 대하여 파고, 주기, 파향 관측자료 획득.

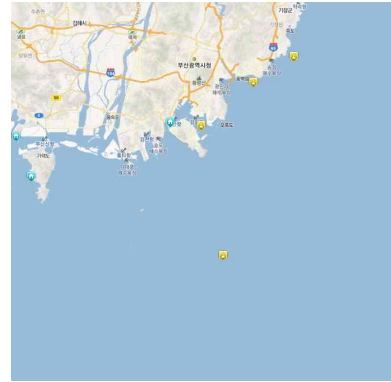
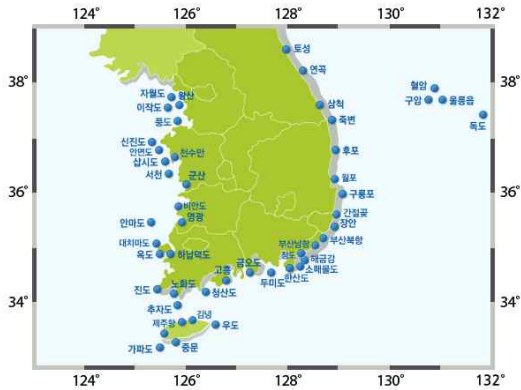


그림 3.26 기상청 파랑관측 정점(좌)과 국립해양조사원 조위, 유속관측 정점(우)

다. 3차원 해양순환 예측시스템의 조석 비교

- 과업기간 중 2016년 1월 - 2016년 4월의 자료와 예측결과의 조석 비교를 통한 모델검증 수행.
- 비교기간 동안 조석의 RMSE 는 10 (cm) 를 보였음.

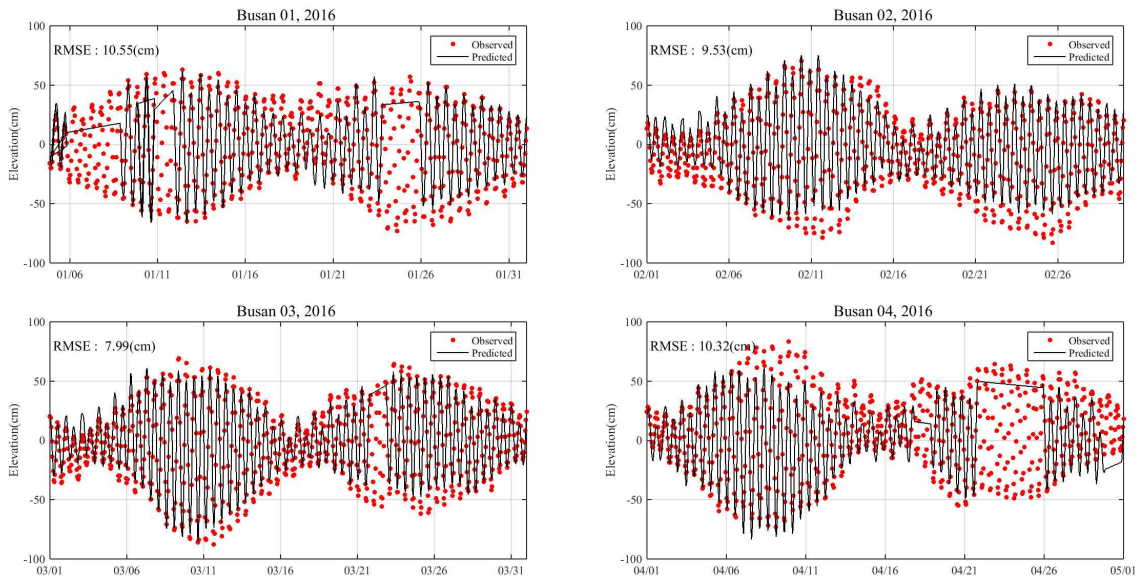


그림 3.27 2016년 1월 - 2016년 4월 조석비교

라. 3차원 해양순환 예측시스템의 수온 비교

- 과업기간 중 2016년 1월 ~ 2016년 4월의 자료와 예측결과의 수온 비교를 통한 모델검증 수행.

- 비교기간 동안 수온의 RMSE 는 1.1°C, BIAS 는 0.8°C 를 보였음.

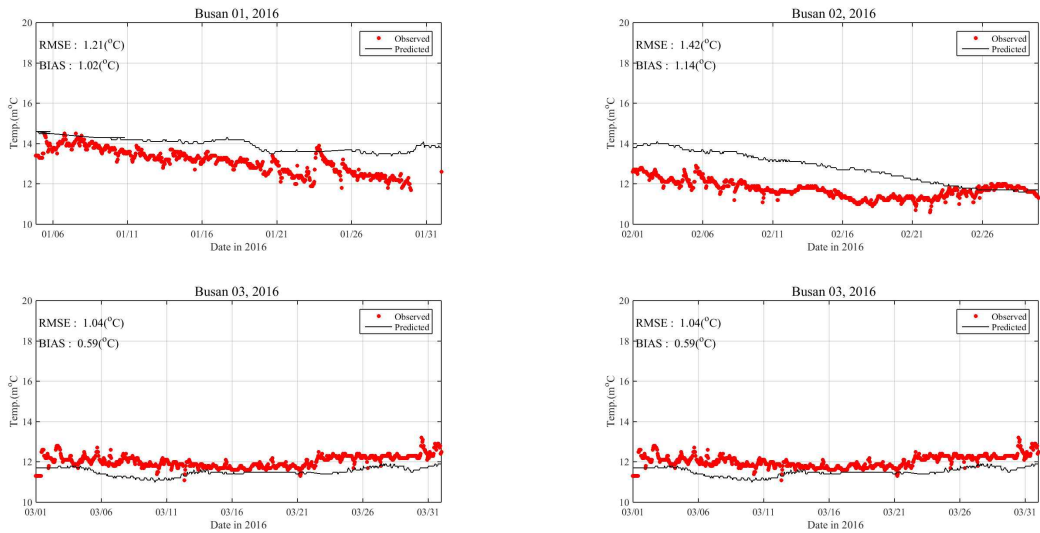


그림 3.28 2016년 1월 - 2016년 4월 수온비교

바. 파랑 예측시스템의 검증

- 과업기간 중 2016년 1월 ~ 2016년 4월의 자료와 예측결과의 파고, 주기의 비교를 통한 모델검증 수행.
- 비교기간 동안 파고의 RMSE 는 0.32 (m), BIAS 는 0.26 (m) 이고, 주기의 RMSE는 2.5 (s)를 보였음.

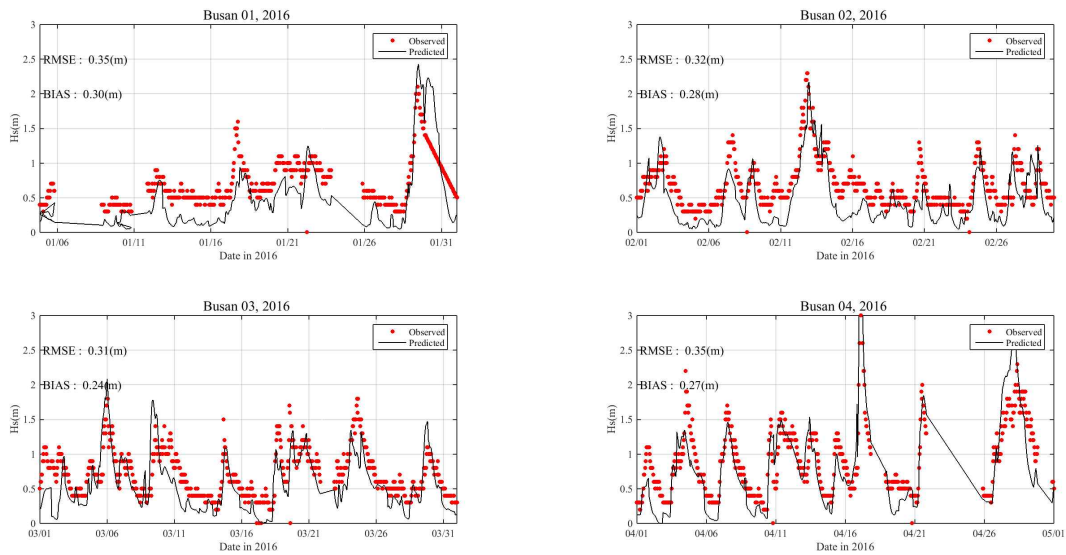


그림 3.29 2016년 1월 - 2016년 4월 파고 비교

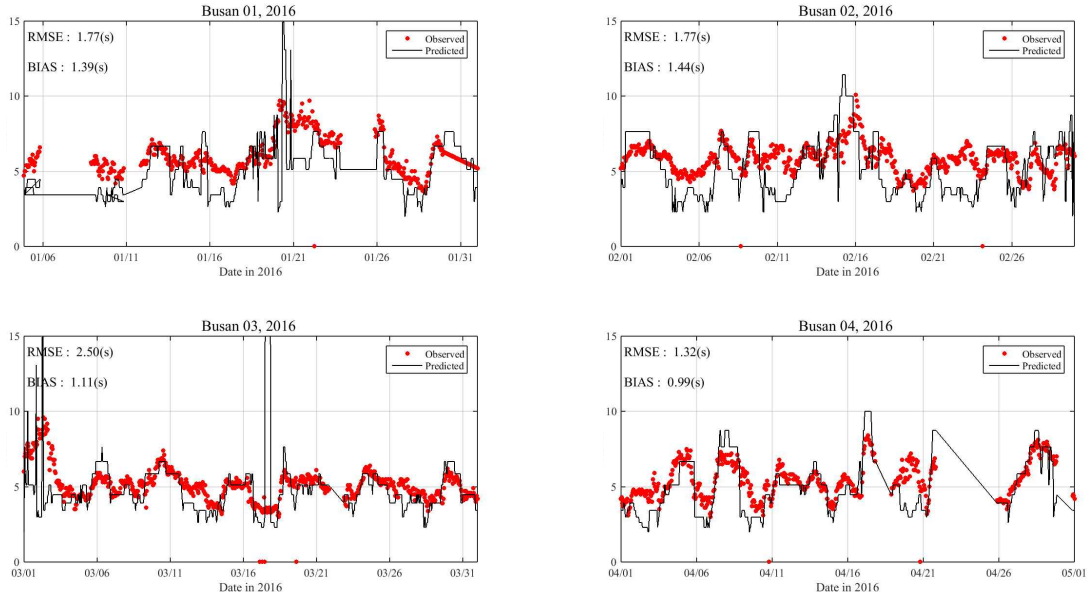


그림 3.30 2016년 1월 - 2016년 4월 주기 비교

사. FUNWAVE-TVD 모형을 이용한 파랑예측시스템의 검증

- 파랑 관측을 통하여 얻어진 각 정점의 유의파고를 이용하여 파랑 예측시스템의 검증에 이용하였음.
- 예측시스템 검증 시 경계에서 필요로 하는 입사파고는 한국해양과학기술원의 해양 예보시스템에서 매시간 계산되어지는 SWAN 모형을 이용함.
- SWAN 모형에서 계산되어진 예측시스템 경계의 파고값을 제시함.

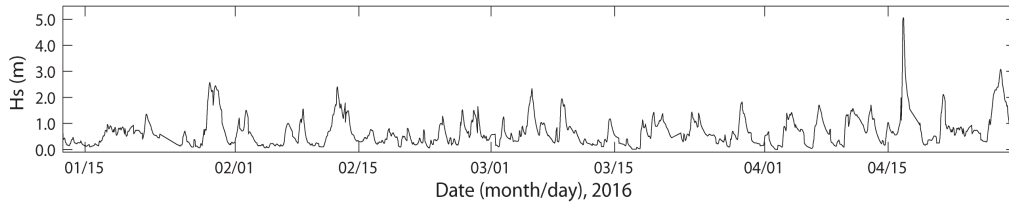


그림 3.31 검증에 사용된 예측시스템 경계의 입사파고

- 1 (m) 미만의 입사파고는 부산항내에서 정온한 것으로 가정을 하여 1 (m) 이상의 입사파고를 사용하여 관측값과 검증하였으며, 그림에 제시함.

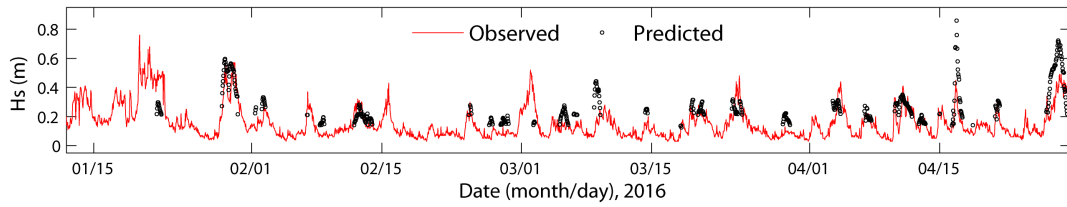


그림 3.32 T1 정점에서 유의파고 검증 결과

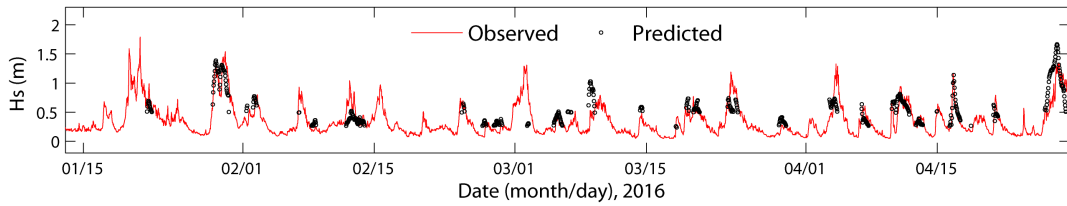


그림 3.33 T2 정점에서 유의파고 검증 결과

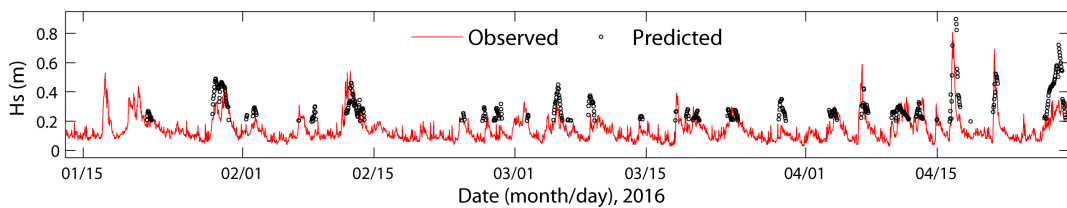


그림 3.34 T3 정점에서 유의파고 검증 결과

제 2 절 부산항 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작, 설치 및 운영

1. 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 시제품 제작

- 표출항목은 기상관측 정보, 파랑예측정보, 조위, 유속 예측정보 등이며, 특정 IP에 대하여 수시 확인이 가능하도록 웹서버구축.

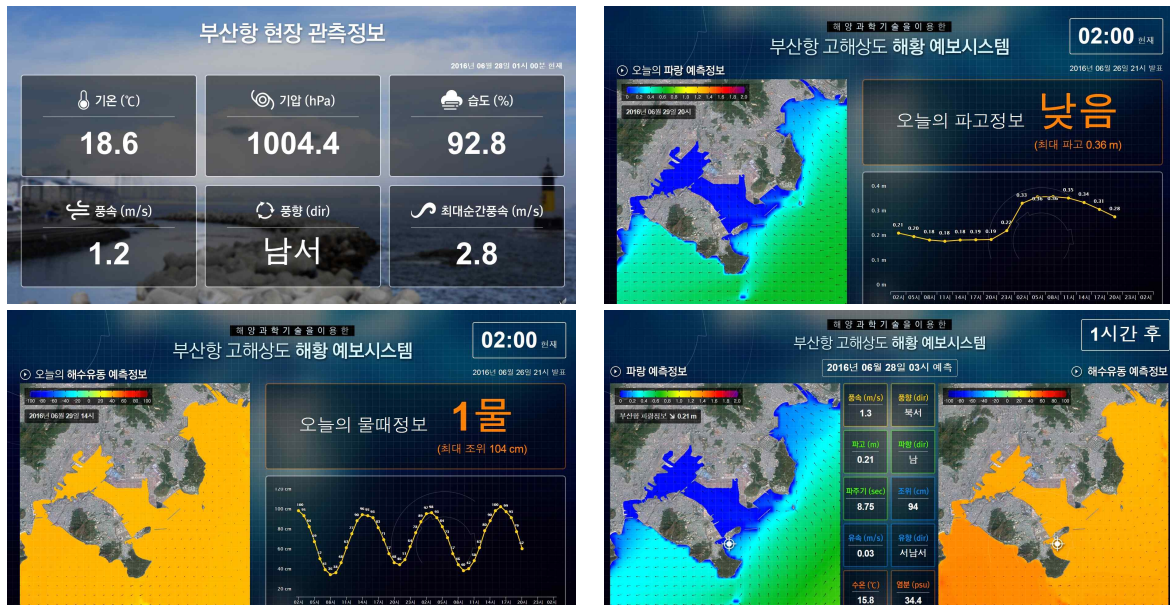


그림 3.35 부산항 (북항) 주변의 해황예측 표출 시스템 제작

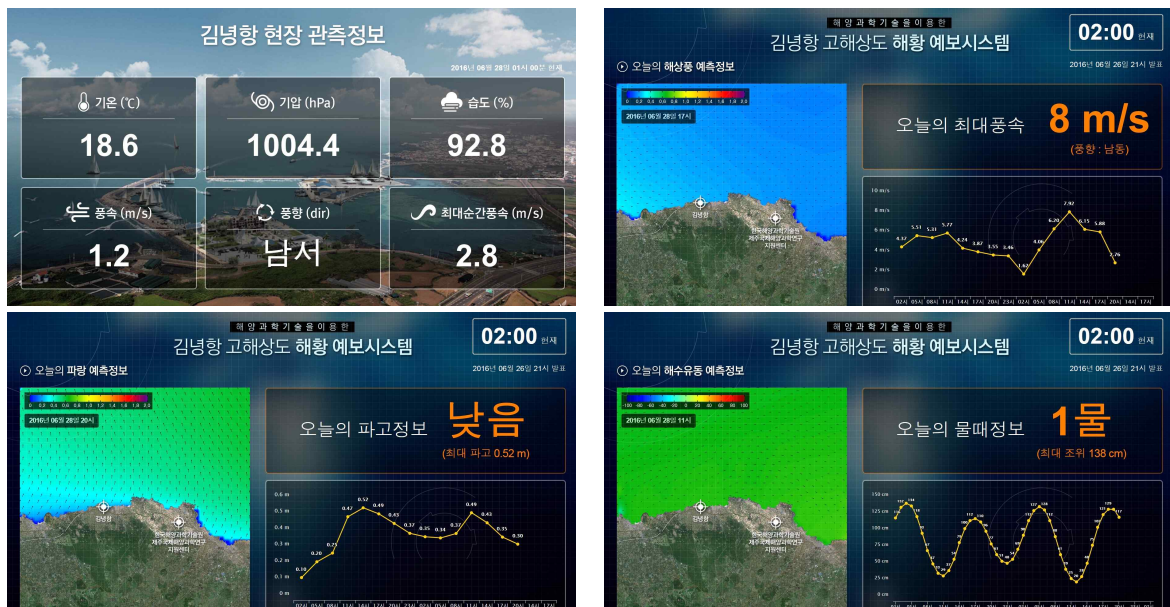


그림 3.36 김녕항 주변의 해황예측 표출 시스템 제작

2. 유관 기관에 시제품 설치, 활용기술 교육, 지원을 통한 예측시스템 개선
- 부산시청과 제주센터에 설치, 홍보



그림 3.37 부산 시청(좌) 및 제주 센터(우) 설치

제 3 절 제주 김녕항 고해상도 해양정보제공시스템 구축 및 운영

- 본 사원의 목표 중에 하나인 우리원 지역거점 역량강화를 위하여 부산 뿐아니라 제주해양과학연구지원센터 인근 김녕항에 대하여 예측시스템 구축.
- 영역은 아래의 그림과 같고 영역을 제외한 예측 방법을 비롯한 모든 프로세스는 부산항 해양정보제공시스템과 동일함.

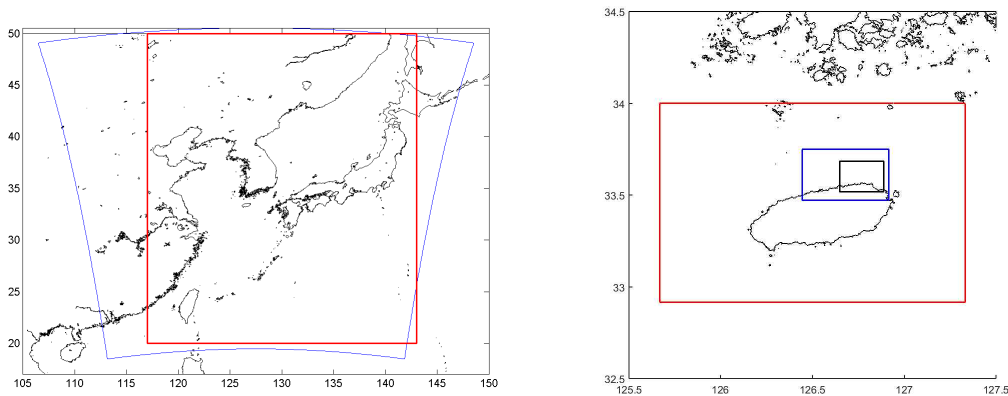


그림 3.38 KOOS (L1, L2) 격자(좌) 및 김녕항 고해상도 (L3, L4, L5) 격자(우)

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

표 4.1 연구개발목표 달성도

성과목표	연구성과	최종목표 달성도
1. 부산항 실시간 고해상도 해황정보제공시스템 개발, 구축 및 운영 (75%)	<ul style="list-style-type: none"> - 고해상도 부산항 해양기상예측 시스템 - 고해상도 부산항내 조석 및 3차원 해양순환예측 시스템 - 고해상도 부산항내 파랑예측 시스템 - 관측 자료를 이용한 검증 및 시스템 고도화 	100%
2. 부산항 해황정보 표출시스템 (시제품) 제작, 설치 및 운영 (25%)	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템 실수요자를 위한 표출 방식 구상 및 시제품 제작 - 관련 기관에 시제품 설치, 활용기술 교육, 지원 	100%
합계 (100%)		100%

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 국지 해황정보제공시스템 구축을 통해 고해상도 해황예측 기술을 확보하였으며, 특히 항내 60 m 격자간격의 예측 시스템을 구축하고 안정적인 운영 및 서비스를 함으로써 실질적인 활용을 가능토록 함.
- 부산항 주변 해역의 해상상태를 예측할 수 있는 체계적인 고해상도 해양예측시스템의 수립과 1일 2회 12시간 간격의 72시간 예측을 수행하고 대국민 서비스에 기여할 수 있는 프로토콜을 제시함.
- 관련 기관에 시제품을 설치, 활용기술 교육을 통하여 표출 시스템에 대한 생산자와 예측자료 실사용자와의 교류를 통한 예측자료의 해석 및 전달을 수행함.

2. 경제·산업적 측면

- 부산항 뿐만 아니라 제주 김녕항에 해황예보시스템을 구축하고 안정적인 운영 및 서

비스를 함으로써 해양레저 산업 발전 및 지역사회의 발전에 기여함.

- 관련 기술의 이전을 통해 산업 발전에도 기여할 것으로 기대함.
- 실시간 예측정보 활용으로 안전항해를 지원하며, 사고 발생 시 대책 수립 및 피해저감에 기여함.
- 부산항내 항해안전을 위한 정밀한 해양환경 현황 및 예측정보 제공함.
- 실시간 관측 및 예측 시스템을 운영하여 항만 이용자들에게 제공함으로써 부산항 활용도 제고와 선사유치에 기여함.

3. 사회·문화적 측면

- 고해상도 해황예보시스템의 우수성을 널리 알리고, 향후 전국 마리나항으로 확대 수립하여 대국민 서비스 향상에 기여함.

4. 연구원 고유기능 발전과의 연관성

- 해양과기원의 부산캠퍼스 시대를 맞아 부산시와 시민을 대상으로 해양과기원의 연구 활동을 홍보하고 부산항만의 효율적인 관리 및 항해안전에 기여하는 선도적인 역할을 수행함으로써 항만운영 효율을 제고하고 미래지향적인 비전을 홍보함.
- 부산항 초입에 위치한 해양과기원이 부산항 정밀 해황정보제공시스템을 개발, 구축 및 활용을 통해서 해양과기원이 위치한 지역사회(부산)의 발전에 기여하였으며, 실시간 예측정보 활용으로 안전항해를 지원하고 사고 발생 시 대책수립 및 피해저감에 기여할 수 있음.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 기술적 측면

- 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.
- 개선된 파랑수치모형을 이용하여 이안류가 빈번하게 발생하는 해역에 모델링을 수행, 이안류 발생의 정확한 원인 분석 및 피해저감 대책 수립에 활용.
- SWAN-FUNWAVE TVD 모형을 이용한 연안해역에서의 정밀한 파랑변형 예측.

2. 경제·산업적 측면

- 해양관련 현안 문제 발생 시 적시에 해양 정보의 제공을 통한 재해 저감 및 관련 연구사업의 개발 유도.
- 구축된 해양예보시스템의 해양 유관기관 및 해양 산업체로의 기술이전 및 기술교육을 통해 실질적인 해양예측 현업화 진행 및 산업화 기반 제공에 활용.

3. 사회·문화적 측면

- 항만 운영, 효율적인 공사계획, 해양환경 보전 및 국민의 레저 활동 등 다양한 해양 서비스로의 확장, 활용 가능함.

제 6 장 참고문헌

- Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures. World Scientific.
- Leitão, P., Coelho, H., Santos, A. and Neves, R. (2005). Modelling the main features of the algarve coastal circulation during July 2004 : A downscaling approach. Journal of Atmospheric and Ocean Science, 10(4), 421-462.
- 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.
- 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.
- 최영광, 서승남 (2015). 수정 FUNWAVE-TVD 수치모형을 이용한 파랑변형. 한국해양·해양공학회논문집, 27(6), 406-418.