

BSPE99865-12510-2

2021.02.28.

다중 목적 기계학습을  
이용한 최적 해양  
관측망 설계 모듈 개발

[www.kiost.ac.kr](http://www.kiost.ac.kr)

Development of an optimal design module for an ocean monitoring network based on multi-objective machine learning

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “다중 목적 기계학습을 이용한 최적 해양 관측망 설계 모듈 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021.02.28.

총괄연구책임자 : 김 남 훈

참 여 연 구 원 : 최 정 운

권 영 연

정 상 훈

김 호 진

## 보 고 서 초 록

|  |                          |  |                            |             |                              |
|--|--------------------------|--|----------------------------|-------------|------------------------------|
| 과제고유<br>번호   | PE99865                  | 해당단계<br>연구기간   | 2020/05/01 -<br>2020/12/31 | 단계 구분       | 단년도 과제                       |
| 연구사업명  | 중사업명                     | 미래선도사업   |                            |             |                              |
|  | 세부사업명                    | 신진중견연구자 및 창의적 아이디어 지원  |                            |             |                              |
| 연구과제명  | 대과제명                     | 다중 목적 기계학습을 이용한 최적 해양 관측망 설계 모듈 개발   |                            |             |                              |
|  | 세부과제명                    |  |                            |             |                              |
| 연구책임자  | 김 남 훈                    | 해당단계<br>참여연구원수   | 총 : 5명<br>내부: 1명<br>외부: 4명 | 해당단계<br>연구비 | 정부: 48,000천원<br>계 : 48,000천원 |
|  |                          | 총연구기간<br>참여연구원수  | 총 : 5명<br>내부: 1명<br>외부: 4명 | 총<br>연구비    | 정부: 48,000천원<br>계 : 48,000천원 |
| 연구기관명<br>및<br>소속부서명  | 한국해양과학기술원<br>해양재난·재해연구센터 |  | 참여기업명                      |             |                              |
| 국제공동연구<br>위탁연구   |                          |  |                            |             |                              |
| 요 약  |                          |  |                            | 보고서<br>면수   | 56                           |
| <p>○ 다중 목적 기계학습을 이용한 최적 해양 관측망 설계모듈 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 수치 모델 기반의 입력 자료 DB 구축 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수치 모델 검·보정 평가, Testbed 선정 및 분석 항목에 대한 입력 자료 DB 구축</li> </ul> </li> <li>□ 진화 알고리즘 기반의 다중 목적 기계학습 모듈 구축 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 분석 항목들에 대한 DB 기반 목적함수 구축</li> <li>- MOEAs 기반 MOO solver 구축 및 ML 모듈 접합(MOML)</li> </ul> </li> <li>□ 최적 해양 관측망 설계 모듈 적용 및 평가 <ul style="list-style-type: none"> <li>- MOML 모듈 기반의 최적 해양 관측망 설계 실험적 적용</li> <li>- 설계된 최적 관측망에 대한 통계적 성능 평가</li> </ul> </li> </ul> |                          |  |                            |             |                              |
| 색인어<br>(각 5개<br>이상)  | 한 글                      | 해양 관측망; 부이 관측망; 다중 목적 최적화; 기계학습; 파레토 프론트   |                            |             |                              |
|  | 영 어                      | Ocean Monitoring Network; Buoy Network; Multi-Objective Optimization; Machine Learning; Pareto-Front |                            |             |                              |

# 요 약 문

## I. 제 목

다중 목적 기계학습을 이용한 최적 해양 관측망 설계 모듈 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 다중 목적 진화알고리즘 솔버 기반의 다중 목적 기계학습 모듈 구축
- 최적 관측망 설계 시범 적용

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 수치 모델 기반의 입력 자료 DB 구축
  - 한반도 주변 해역을 대상으로 한 수치 모델 검·보정 평가
  - 모델 결과 분석을 통한 testbed 선정
  - 분석 항목에 대한 입력자료 DB 구축
- 진화알고리즘 기반의 다중 목적 기계학습 모듈 구축
  - 분석 항목들에 대한 DB 기반 목적함수 구축
  - 다중 목적 진화알고리즘 기반의 다목적 최적화 솔버 구축
  - 기계학습 모듈 집합
- 최적 해양 관측망 설계 모듈 적용 및 평가

- 다중 목적 기계학습 기반의 testbed 해역 적용
- 최적 설계에 대한 통계적 성능 평가

#### IV. 연구개발결과

- 다중 목적 기계학습을 이용한 해양 부이 관측망 최적화 모듈 개발
  - 다중 목적 진화알고리즘 솔버에 기계학습 모듈이 접합된 관측망 최적화 설계 모듈 개발
  - 높은 검·보정률을 가진 Coastal KOOS의 MOHID L2 자료를 입력 자료로 활용
  - 우리나라 남해안을 대상으로 실험적으로 적용하여 기존 부이 관측망에 추가 정점 설계 방안 마련

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 표준화된 해양 관측망 설계전략 제시
  - 제도적으로 정립된 가이드라인 없이 경험적 설계에 의존해 오던 해양 관측망 설계에 대하여, 공학적 근거가 마련된 표준 해양 관측망 설계 전략 수립에 기초자료로 활용 가능
- 원내·외 관측망 설계 의사결정 시 기술적 지원 가능

# SUMMARY (영문 요약문)

## I. Title

Development of an optimal design module for an ocean monitoring network based on multi-objective machine learning

## II. Necessity and Background

- Establishing the multi-objective machine learning module based on multi-objective evolutionary algorithm solver
  
- Pilot test of the design for optimal monitoring network

## III. Methodology and Scope

- Construction of the input DB based on numerical model
  - Evaluation of the numerical model around Korean Peninsula
  - Testbed selection
  - Construction of the input DB for design variables
  
- Development of the module for the multi-objective machine learning based on evolutionary algorithms
  - Objective functions for each design variable
  - Multi-objective optimization solver based on multi-objective evolutionary algorithms

- Coupling the machine learning module
- **Application and evaluation of the optimal design module**
  - Applying the design module to the testbed
  - Statistical performance evaluation

#### IV. Results

- **Development of the optimization module for the ocean buoy observation network using multi-objective machine learning**
  - Development of an optimal design module for an ocean observation network in which machine learning module is attached to multi-objective evolutionary algorithm solver
  - Use of well-calibrated/validated KOOS' MOHID L2 data as an input value
  - Designing the buoy observation network

#### V. Plan to use research results

- **Suggestion of a standardized ocean observation network design strategy**
  - Utilization of the fundamental guideline to establish a standard ocean observation network design strategy with an engineering basis
- **Technical support for designing ocean observation networks in-/outside the KIOST**

# 목 차

|   |      |
|---|------|
| 제 출 문 .....                                 | i    |
| 보 고 서 초 록 .....                             | ii   |
| 요 약 문 .....                                 | iii  |
| SUMMARY (영문 요약문) .....                      | v    |
| 목 차 .....                                   | vii  |
| 표 목차 .....                                  | viii |
| 그림 목차 .....                                 | ix   |
| 제 1 장 . 연구개발 과제의 개요 .....                   | 1    |
| 제 1 절 . 과업 개요 .....                         | 1    |
| 제 2 절 . 과업 추진 전략 .....                      | 3    |
| 제 3 절 . 과업 수행 기간 .....                      | 5    |
| 제 2 장 . 국내외 연구동향 .....                      | 6    |
| 제 3 장 . 연구개발 내용 및 결과 .....                  | 10   |
| 제 1 절 . Testbed 선정 .....                    | 10   |
| 제 2 절 . 입력자료(수치모델) 구축 .....                 | 14   |
| 제 3 절 . MOEAs solver 기반 MOO solver 구축 ..... | 15   |
| 제 4 절 . ML 모듈 접합 .....                      | 17   |
| 제 5 절 . MOML 모듈 적용 .....                    | 19   |
| 제 4 장 . 연구개발 목표 및 달성도 .....                 | 39   |
| 제 5 장 . 연구개발결과 활용계획 .....                   | 40   |
| 제 6 장 . 참고문헌 .....                          | 42   |



# 표 목차

|  |    |
|--|----|
| 표 1. 연구진도 적정 수행 여부 .....   | 5  |
| 표 2. u-current 검증 결과 .....   | 11 |
| 표 3. v-current 검증 결과 .....   | 12 |
| 표 4. 수온 검증 결과 .....  | 12 |
| 표 5. 기존 관측망을 이용하여 OI 를 통해 재구성한 공간분포의 통계값 .....                               | 21 |
| 표 6. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 동서방향<br>유속(u-current)의 공간분포 상관계수 .....     | 37 |
| 표 7. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 남북방향<br>유속(v-current)의 공간분포 상관계수 .....     | 37 |
| 표 8. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 수온(water<br>temperature)의 공간분포 상관계수 .....  | 37 |
| 표 9. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 염분(salinity)의 공간분포<br>상관계수 .....           | 37 |
| 표 10. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 동서방향<br>유속(u-current)의 공간분포 RMSD .....    | 38 |
| 표 11. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 남북방향<br>유속(v-current)의 공간분포 RMSD .....    | 38 |
| 표 12. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 수온(water<br>temperature)의 공간분포 RMSD ..... | 38 |
| 표 13. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 염분(salinity)의<br>공간분포 RMSD .....          | 38 |

# 그림 목차

|   |    |
|---|----|
| 그림 1. 기계학습이 접합된 최적 해양 관측망 설계 모듈 구축 모식도(예) .....   | 2  |
| 그림 2. 연구개발 추진 체계도 .....   | 3  |
| 그림 3. 해양 관측망 설계모듈 개발 추진전략 .....   | 4  |
| 그림 4. US-EPA NCAA 의 GRTS 기반 연안 관측망 구성 현황 .....  | 7  |
| 그림 5. 국내 해양 관측망(관측 부이 및 과학기지) 현황 .....  | 9  |
| 그림 6. (a) 해양관측부이 현황 및 (b) 관측 부이 사진 .....  | 10 |
| 그림 7. (a) 관측망 최적화를 위한 testbed 및 (b) testbed 를 중심으로 해류 및 수온 .....  | 13 |
| 그림 8. (a) 외해경계 내부 및 (b) testbed 내부 입력자료 DB .....  | 14 |
| 그림 9. MOEAs 기반 MOO solver 모식도 .....   | 15 |
| 그림 10. 비열등해(non-inferior solutions)로부터 구성된 파레토 프론트(Pareto-front) .....  | 16 |
| 그림 11. 진화알고리즘 기반의 휴리스틱 최적화 기법 예시 .....  | 16 |
| 그림 12. MOEAs 기반 MOO solver 에 ML 모듈을 접합한 관측망 최적화 설계 모듈 .....   | 18 |
| 그림 13. MOML 모듈 기반의 파레토 최적해(관측망) 설계 모듈 모식도 .....   | 18 |
| 그림 14. 기존 관측망 정점에서 추출한 모델자료. (a) u-current, (b) v-current, (c) 수온, (d) 염분 .....   | 20 |
| 그림 15. Testbed 내에서의 Coastal KOOS MOHID L2 모델의 (a) 수온과 (c) 염분의 공간분포(True) 및 기존 관측망을 이용하여 OI 를 통해 재구성한 (b) 수온과 (d) 염분의 공간분포(Est.) ..... | 21 |
| 그림 16. (a) 한반도 전체 및 (b) Testbed 내의 초기 정점 배열(안) .....  | 22 |
| 그림 17. 설계 부이 개수(nb) (a) 1 개, (b) 2 개, (c) 3 개, (d) 4 개일 때 산출된 파레토 프론트(Pareto-Front) .....   | 23 |

|   |    |
|---|----|
| 그림 18. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 1 개로부터<br>도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온, 염분의<br>공간분포 .....               | 24 |
| 그림 19. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 1 개로부터<br>도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온, 염분의<br>공간분포 .....               | 25 |
| 그림 20. 유속( $uv-current$ )이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수<br>1 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온,<br>염분의 공간분포 ..... | 25 |
| 그림 21. 4 개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수<br>1 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온,<br>염분의 공간분포 .....                              | 26 |
| 그림 22. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 2 개로부터<br>도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온, 염분의<br>공간분포 .....               | 27 |
| 그림 23. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 2 개로부터<br>도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온, 염분의<br>공간분포 .....               | 28 |
| 그림 24. 유속( $uv-current$ )이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수<br>2 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온,<br>염분의 공간분포 ..... | 28 |
| 그림 25. 4 개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수<br>2 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온,<br>염분의 공간분포 .....                              | 29 |
| 그림 26. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 3 개로부터<br>도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온, 염분의<br>공간분포 .....               | 30 |
| 그림 27. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 3 개로부터<br>도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온, 염분의<br>공간분포 .....               | 31 |
| 그림 28. 유속( $uv-current$ )이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수<br>3 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속( $uv-current$ )과 수온,<br>염분의 공간분포 ..... | 31 |

그림 29. 4 개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수 3 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포 ..... 32

그림 30. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 4 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포 ..... 34

그림 31. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 4 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포 ..... 34

그림 32. 유속(uv-current)이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 4 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포 ..... 35

그림 33. 4 개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수 4 개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포 ..... 35



# 제 1 장. 연구개발 과제의 개요

## 제 1 절. 과업 개요

### ■ 사회·문화적 측면

- 정확한 해양 정보에 대한 수요 증가
  - 기후변화에 기인한 해양환경의 변화로 인해 발생하는 각종 재난·재해에 대응하기 위한 예측 모델의 수요가 증가하면서, 정확도 향상을 위한 양질의 관측 자료에 대한 수요 증가
  - 기후변화에 기인한 해양환경 변화를 감시하고 각종 해양 재난·재해 관련 현안에 대응하기 위한 예측 모델(시스템)의 정확도를 향상시킬 수 있는 관측망 구성 필요

### ■ 경제·산업적 측면

- 관측망 구성에 막대한 비용 소요
  - 관측망(부이, 관측기지 등) 운용에 막대한 비용이 요구되는 만큼 가장 효율적인 위치선정에 따른 양질의 자료 취득 필요
  - 예산 책정 혹은 예산 범위 내 의사 결정 과정에서 최적화된 관측망을 설계하기 위한 기술적 지원 체계 필요

### ■ 기술적 측면

- 표준화된 관측망 설계시스템의 부재
  - 해양 관측 정점 배열은 제도적으로 정립된 가이드라인 없이 연구자의 경험과 각종 이해당사자들간의 협의에 의해 결정되고 있어, 과학적·체계적 관측망 설계 체계 필요
  - 해양 예측모델의 정확도 향상을 위해 수반되는 최적의 관측망 구축 설계 필요
  
- 4차 산업혁명에 따른 딥러닝 분야의 현업 적용 사례 증가

- 4차 산업혁명에 대응하기 위한 데이터 기반의 기계학습 모듈의 현업 적용 필요
- 기계학습이 접합된 새로운 개념의 다목적 최적 관측망 설계 모듈 개발
- 다중목적 진화 알고리즘(Multi-Objective Evolutionary Algorithms; 이하 MOEAs) 기반의 다목적 기계학습(Multi-Objective Machine Learning; 이하 MOML) 모듈을 구축하여 최적 관측망 설계 적용

■ 관측망 설계 모듈의 핵심기술

□ 수치모델

- 관측망 최적화를 위해서는 연속된 고해상도 시·공간 분포의 참값(Ground truth) 필요
- KIOST 해양재난재해연구센터에서 운영중인 운용해양예보시스템(Korea Operational Oceanographic System, KOOS)의 후측자료 활용

□ 기계학습 모듈

- 다양한 관측항목에 대한 독립적인 목적함수를 입력값으로 구성함으로써 상호간의 비열등성을 가지고 있는 최적해들의 집합체인 파레토 프론트 형태로 출력
- 기계학습 모듈에 접합이 용이한 MOEAs를 최적해 solver로 사용함으로써 전역 해 수렴성이 높고 안정적인 파레토 프론트 출력이 가능하도록 설계

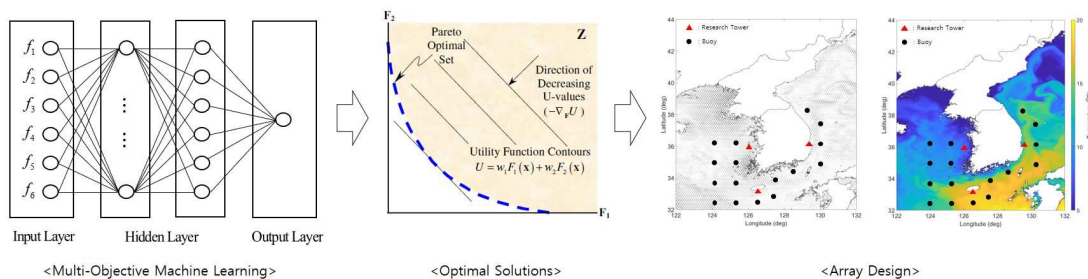


그림 1. 기계학습이 접합된 최적 해양 관측망 설계 모듈 구축 모식도(예)

## 제 2 절. 과업 추진 전략

### ■ 연구개발 추진체계

- 세부 연구내용 및 주요 핵심기술의 연계를 통한 과업 목표 달성
  - KOOS 기반의 수치 모델 파트와 MOEAs 기반의 다중 목적 기계학습 파트로 분할하여 과업 추진
  - 주/월별 연구 회의를 통하여 주요 연구내용 및 결과에 대한 논의 및 추진 협력 강화

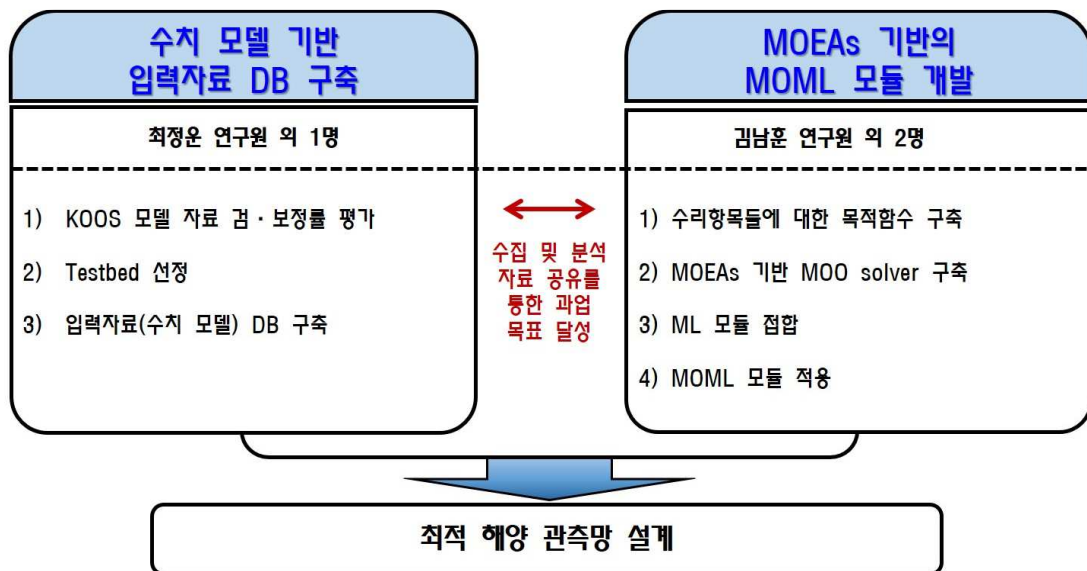


그림 2. 연구개발 추진 체계도

### ■ 연구개발 수행방법

- 표준 해양 관측망 설계 모듈 개발을 위한 단계적 접근
  - 입력자료(수치모델)
    - Coastal KOOS 후측자료를 활용한 입력 자료의 DB 구축
    - 한반도 주변 해역을 대상으로 한 모델 성능 검증
  - Testbed 선정
    - 모델자료 분석을 통한 testbed 해역 선정
  - MOEAs 기반의 MOO solver 구축
    - 설계 관측 항목들(유속, 수온, 염분)에 대한 독립적인 목적함수 구축



- 가중치 기반 단일 목적함수 변환(Weighted Sum Method, WSM)
- ML 모듈 접합
  - 은닉층(Hidden layer)으로 연결되는 입력값(설계 관측 항목들)에 대한 가중치 매트릭스 구성
  - MOEAs 기반 MOO solver에 ML 모듈 접합하여 최적해 산정
  - 최적해 수렴 안정성 평가
- MOML 모듈 적용
  - Testbed에 MOML 모듈 시범 적용하여 관측망 초안 도출
  - 최적해(관측점 배열)에 대한 통계적 성능 평가

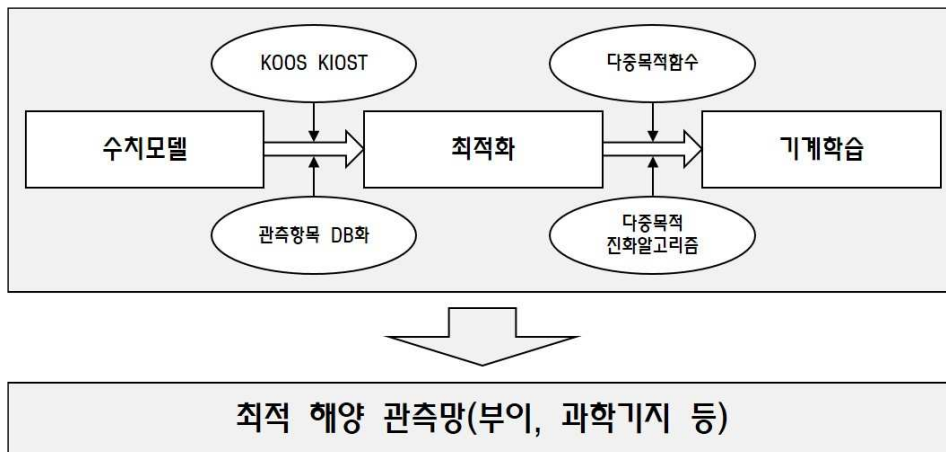


그림 3. 해양 관측망 설계모듈 개발 추진전략

### 제 3 절. 과업 수행 기간

■ 2020.05.01 - 2020.12.31 (8개월)

표 1. 연구진도 적정 수행 여부

: 연구계획   
  : 계획연장   
  : 진도

| 연번 | 연구내용                   | 월별 추진 일정 |   |   |   |   |    |    |    |
|----|------------------------|----------|---|---|---|---|----|----|----|
|    |                        | 5        | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1  | MOEAs 기반 MOO solver 구축 |          |   |   |   |   |    |    |    |
| 2  | ML 모듈 접합               |          |   |   |   |   |    |    |    |
| 3  | Testbed 선정             |          |   |   |   |   |    |    |    |
| 4  | 입력자료 구축                |          |   |   |   |   |    |    |    |
| 5  | MOML 모듈 적용(관측망 최적화 조인) |          |   |   |   |   |    |    |    |

## 제 2 장. 국내외 연구동향

### ■ 국외 관측망 최적화 연구 동향

- 국외에서는 다양한 방법으로 관측망 최적화 연구가 수행되고 있음.
- 공간분포 평가 기반의 정점 배열 설계는 시행착오 기법을 활용한 Bretherton *et al.* (1976)에 의해 처음 고안되었으며, 이후 Barth and Wunsch (1990) 및 Barth (1992)에 의해 정점 배열 설계 시 최적화 기법(e.g., 모의 담금질, 유전 알고리즘 등)의 적용 필요성이 제기되었음.
- 최적화 기법을 활용한 배열 설계 기법은 표층 뜰개(drifter) 초기 정점 선정 (LeTraon and Hernandez, 1992; Hernandez *et al.*, 1995), 해면 고도를 측정하기 위한 계류기 설치 위치 설계(Hackert *et al.*, 1998), 북대서양 해류를 모니터링하기 위한 센서의 배열 설계(Baehr *et al.*, 2004; 2008), 항내 염분 분포 측정을 위한 센서의 배열 설계(Rogowski, 2009), 기 구축된 관측망 재배열 (Gao *et al.*, 2015; Fan *et al.*, 2017; Bian *et al.*, 2019) 등 다양한 방식으로 활용되고 있으며, 대부분 궁극적인 목적은 수치모델의 정확도 향상(Chu *et al.*, 2001; King *et al.*, 2005; Turner *et al.*, 2005) 및 자료동화 최적화에 초점이 맞추어져 있음(Fujii *et al.*, 2019).
- 하지만, 대부분의 연구는 특정 해역의 목적 달성형 연구결과로서 국가 단위의 범용적인 표준 가이드라인을 제시하기 위한 연구 개발은 수행된 바 없음.
- 최근, 전지구 해양 관측망에 대한 수요가 증가하고 있음에도 불구하고 연구자의 판단에 근거하여 정점이 결정되고 있음에 따라 합리적인 정점의 위치를 선정하기 위한 프로토콜 개발의 필요성이 제기되고 있음(Karidis and Kitsiou, 2012).

### ■ 국내 관측망 최적화 연구 동향

- 국내에서는 관측망 최적화 연구가 거의 수행된 바 없음.
- Kim *et al.* (2018)은 최적 내삽 기법과 도식 최적화 기법을 결합한 연안 관측망 최적화 기법을 제안한 바 있으며, 이를 토대로 금강하구를 대상으로 한 수질 관측망 최적화 연구를 수행한 바 있음(Kim *et al.*, 2020).
- 하지만, 상기 연구결과 역시 소규모 연안 해역에서의 목적 달성형(정기 현장

관측을 통한 단편 하구역의 수질 평가) 연구결과로서, 범용적인 표준 가이드 라인을 제시하기에는 한계가 있음.

- 또한, 국내 해양 관측망(해양 관측부이 및 과학기지 등)의 지속적인 수요 증가에 따른 대규모 해역(수심 100 m 이상)에서도 적용이 가능한 모듈 개발 필요한 상황임.

■ 국외 관측망 설계 표준 가이드라인 현황

- 미환경보건국(US Environment Protection Authority) “National Coastal Condition Assessment (NCCA)”

- 미국 환경보건국(US EPA)은 미국 연안(북동부, 남동부, 멕시코만 등)에서의 관측 표준 매뉴얼을 제시한 바 있음.
- 관측 정점의 배열(개수 및 위치) 설계는 GRTS (Generalized Random Tessellation Stratified, GRTS) 무작위 추출법을 통해 결정함.
- 하지만, 관측망 구성 계획이 연안에 집중되어 있고 난수 추출법 기반으로 정점의 배열을 결정하고 있어, 가이드 라인의 범용성이 낮고 불확실성이 큰 단점이 있음.

This survey design is efficient and cost-effective compared with the alternative of conducting a complete census survey. In the NCCA, sampling sites were selected using a technique called “Generalized Random Tessellation Stratified” (GRTS) survey design, which minimizes clumping of site locations that may result from a purely randomized design. It also provides weighting factors that are used during the analysis stage.

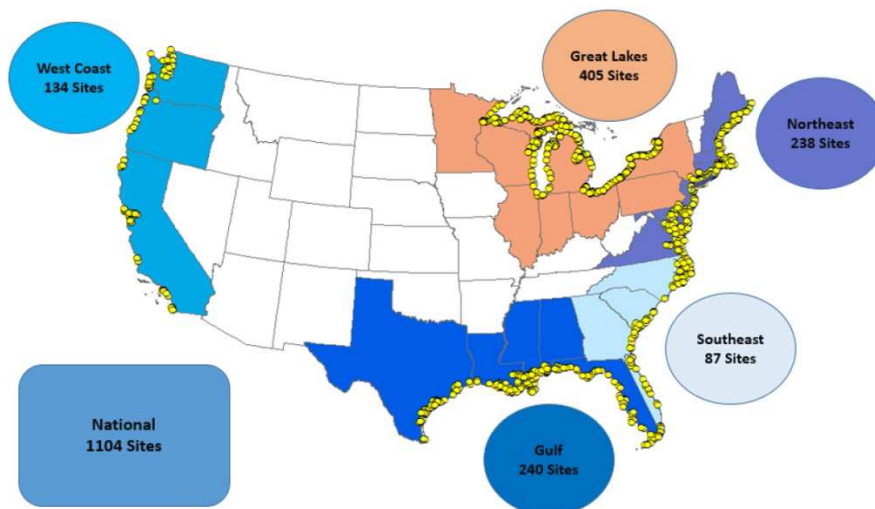


그림 4. US-EPA NCCA의 GRTS 기반 연안 관측망 구성 현황

■ 국내 관측망 설계 표준 가이드라인 현황

- 해양수산부 고시 “해양환경측정망 구성·운영계획(2020 개정)”에 따르면, 조사 방법 및 주기에 대한 가이드라인이 제시된 바 있으나, 조사 정점 배열(개수 및 위치) 선정에 관한 내용은 부재인 상태임.
- 또한, 해양수산부 고시 “제2차 해양조사 기본계획 개정(안) (2016-2020)”에 따르면, 관측소의 해역별 대표성과 효율적 활용을 위한 관측시설 배치 및 관측 항목 선정의 필요성은 제기되고 있으나, 기술적으로 관측 정점의 개수 및 위치를 선정하기 위한 방안은 부재한 상태임.

■ 국내·외 관측망 현황

- 국외 해양관측망은 미국의 OOI (Ocean Observation Initiative), 캐나다의 VENUS와 NEPTUNE Canada, 유럽의 ESONET (European Seas Observatory Network), 호주의 IMOS (Integrated Marine Observing System) 등이 있음.
- 정부간 해양과학위원회(Intergovernmental Oceanographical Commission, IOC)의 전지구 해양 관측망(Global Ocean Observing System)을 구축하여 상시 관측망들에 대한 네트워크를 구축하였음.
- 우리나라 해양관측망은 국립수산과학원, 국립해양조사원, 한국해양과학기술원, 기상청 등이 있으며, 해양환경정보통합시스템(Marine Environment Information System, MEIS)을 통하여 자료가 제공되고 있음.
- 우리나라는 중국, 러시아, 일본과 함께 NEAR-GOOS (North-Eastern Asian Region)에 참여하며 관측망 네트워크를 구축하고 있음.

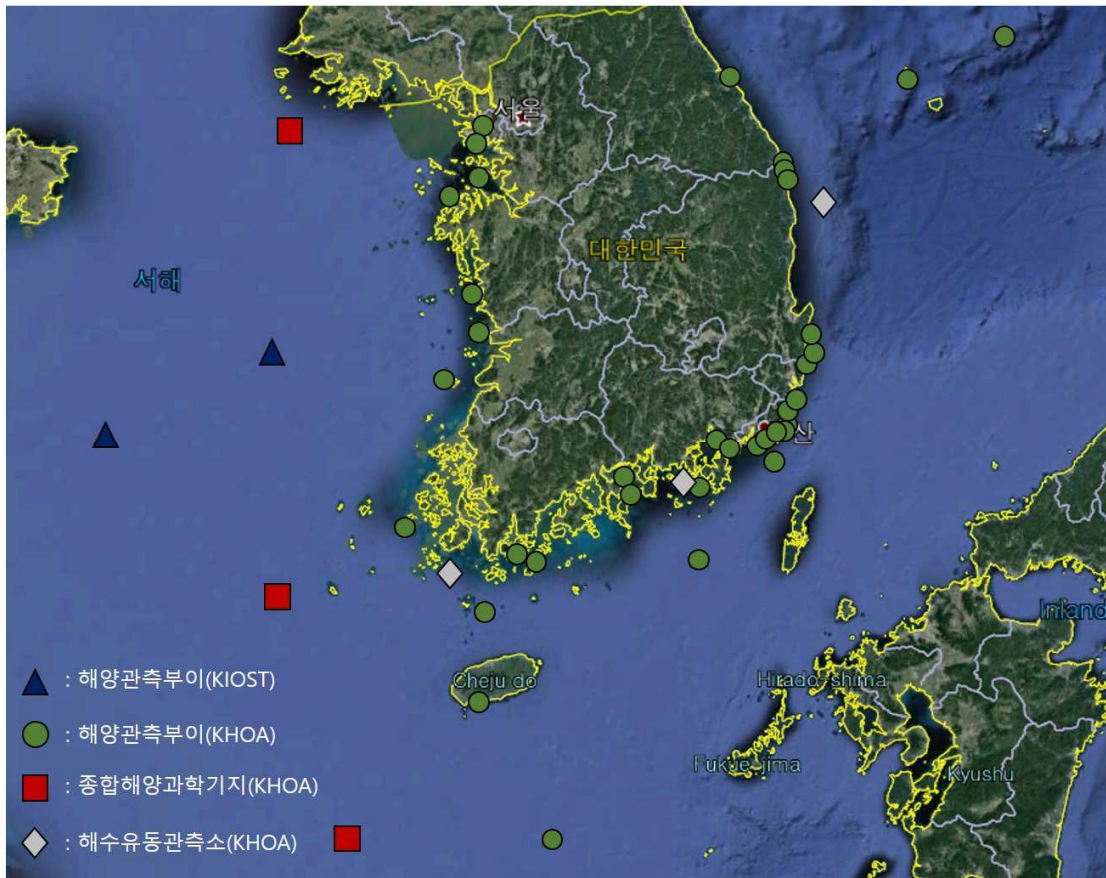


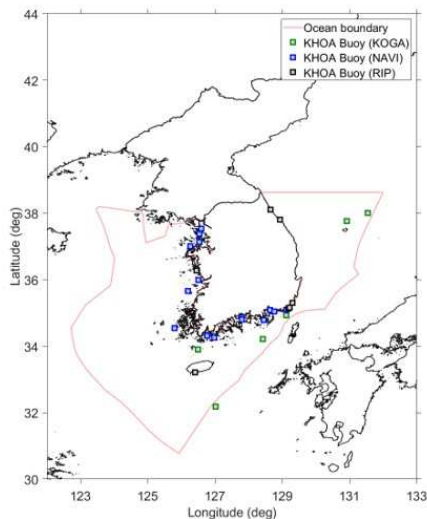
그림 5. 국내 해양 관측망(관측 부이 및 과학기지) 현황

## 제 3 장. 연구개발 내용 및 결과

### 제 1 절. Testbed 선정

#### ■ 수치모델 검증

- 본 연구에서 사용하는 최적화의 입력자료는 수치모델 자료를 참값으로 활용하기 때문에, 수치모델(입력자료) 검증이 수행되어야 함.
- 수치모델은 한국해양과학기술원(KIOST) 운용해양예보시스템의 Coastal KOOS MOHID L2 (1/48° - 2 km)자료를 사용하였으며, 기간은 2019년 06월 01일부터 2020년 05월 31일까지 1시간 간격임.
- 검증 항목은 표층 uv-current와 수온, 염분임.
- 모델 자료는 국립해양조사원(KHOA)에서 운영하는 주요해역(KOGA), 주요항로(NAVI), 이안류(RIP)의 해양관측부이 실시간 관측자료와 비교 분석을 수행하였음(그림 6).
- 검증에 활용한 모델 자료는 관측 지점과 동일한 위치에서 추출하였음.



(a)



(b)

그림 6. (a) 해양관측부이 현황 및 (b) 관측 부이 사진

- 모델의 동서방향 표층 유속(u-current)은 관측자료와 전 관측점에서 평균적

- 으로 약 0.79의 상관도를 보이고 있으며 약 0.2의 평균제곱근오차(이하 RMSD)를 보이고 있음(표 2).
- 모델의 북동방향 표층 유속(v-current)은 관측자료와 전 관측점에서 평균적으로 약 0.71의 상관도를 보이고 있으며 약 0.18의 평균제곱근오차를 보이고 있음(표 3).
  - 모델의 표층 수온(water temperature)은 관측자료와 전 관측점에서 평균적으로 약 0.95의 상관도를 보이고 있으며 약 1.61의 평균제곱근오차를 보이고 있음(표 4).
  - 모델 자료 검증 결과 유속은 0.7 이상으로 실측값과 높은 상관도를 보이고 있으며, 수온은 0.9 이상으로 실측값을 매우 정확히 예측하고 있음을 알 수 있음.
  - 염분의 경우 외해 및 연안역에서 취득할 수 있는 관측정점 및 자료품질의 제약에 따라 국립수산과학원 정선해양관측자료를 통해 비교 분석을 실시한 우리원 해양재난·재해연구센터의 “운용해양예보시스템 예측정확도 기술보고서(2019)” 결과를 참고하였음. 보고서에 따르면, 정선해양관측자료를 사용한 염분의 평균 RMSE는 회차별로 각각 0.54, 0.48, 0.53, 0.79 psu로 나타남.
  - 검증 결과를 바탕으로 관측망 설계를 위해 Coastal KOOS의 MOHID L2 자료를 입력값으로 활용하는데 충분한 신뢰도를 확보하고 있음.

표 2. u-current 검증 결과

| u-current |        |     |      |      |           |         |
|-----------|--------|-----|------|------|-----------|---------|
| 연번        | 관측지점   | 코드  | COR  | RMSD | STD_MOHID | STD_OBS |
| 1         | 제주남부   | S01 | 0.69 | 0.18 | 0.24      | 0.21    |
| 2         | 대한해협   | S02 | 0.59 | 0.31 | 0.33      | 0.36    |
| 3         | 남해동부   | S03 | 0.55 | 0.32 | 0.31      | 0.36    |
| 4         | 제주해협   | S04 | 0.77 | 0.30 | 0.47      | 0.42    |
| 7         | 군산항    | N01 | 0.90 | 0.18 | 0.35      | 0.43    |
| 8         | 평택당진항  | N02 | 0.96 | 0.17 | 0.38      | 0.49    |
| 9         | 인천항    | N04 | 0.92 | 0.18 | 0.24      | 0.37    |
| 11        | 태안항    | N07 | 0.97 | 0.16 | 0.61      | 0.63    |
| 12        | 상왕등도   | N08 | 0.92 | 0.15 | 0.24      | 0.34    |
| 13        | 우이도    | N09 | 0.76 | 0.27 | 0.40      | 0.23    |
| 14        | 생일도    | N10 | 0.75 | 0.19 | 0.21      | 0.29    |
| 17        | 부산항신항  | N14 | 0.69 | 0.13 | 0.15      | 0.18    |
| 18        | 대천해수욕장 | R02 | 0.81 | 0.12 | 0.08      | 0.18    |
| 평균        |        |     | 0.79 | 0.20 | 0.31      | 0.35    |



표 3. v-current 검증 결과

| v-current |        |     |      |      |           |         |
|-----------|--------|-----|------|------|-----------|---------|
| 연번        | 관측지점   | 코드  | COR  | RMSD | STD_MOHID | STD_OBS |
| 1         | 제주남부   | S01 | 0.69 | 0.17 | 0.22      | 0.22    |
| 2         | 대한해협   | S02 | 0.51 | 0.30 | 0.32      | 0.28    |
| 3         | 남해동부   | S03 | 0.31 | 0.22 | 0.19      | 0.18    |
| 4         | 제주해협   | S04 | 0.48 | 0.20 | 0.18      | 0.21    |
| 7         | 군산항    | N01 | 0.77 | 0.19 | 0.24      | 0.30    |
| 8         | 평택당진항  | N02 | 0.79 | 0.15 | 0.22      | 0.25    |
| 9         | 인천항    | N04 | 0.87 | 0.17 | 0.30      | 0.19    |
| 11        | 태안항    | N07 | 0.89 | 0.17 | 0.37      | 0.37    |
| 12        | 상왕등도   | N08 | 0.75 | 0.18 | 0.26      | 0.25    |
| 13        | 우이도    | N09 | 0.95 | 0.22 | 0.59      | 0.68    |
| 14        | 생일도    | N10 | 0.70 | 0.14 | 0.14      | 0.20    |
| 17        | 부산항신항  | N14 | 0.69 | 0.11 | 0.10      | 0.15    |
| 18        | 대천해수욕장 | R02 | 0.89 | 0.15 | 0.26      | 0.31    |
| 평균        |        |     | 0.71 | 0.18 | 0.26      | 0.28    |

표 4. 수온 검증 결과

| u-current |        |     |      |      |           |         |
|-----------|--------|-----|------|------|-----------|---------|
| 연번        | 관측지점   | 코드  | COR  | RMSD | STD_MOHID | STD_OBS |
| 1         | 제주남부   | S01 | 0.87 | 2.26 | 3.63      | 2.89    |
| 2         | 대한해협   | S02 | 0.91 | 2.25 | 3.66      | 2.71    |
| 3         | 남해동부   | S03 | 0.94 | 1.68 | 3.84      | 3.15    |
| 4         | 제주해협   | S04 | 0.91 | 2.40 | 3.84      | 3.56    |
| 7         | 군산항    | N01 | 0.99 | 0.91 | 6.08      | 6.25    |
| 8         | 평택당진항  | N02 | 0.99 | 0.95 | 5.59      | 5.09    |
| 9         | 인천항    | N04 | 1.00 | 0.70 | 5.81      | 5.93    |
| 11        | 태안항    | N07 | 0.96 | 1.29 | 4.33      | 4.07    |
| 12        | 상왕등도   | N08 | 0.99 | 1.15 | 4.36      | 4.46    |
| 13        | 우이도    | N09 | 0.87 | 2.78 | 4.00      | 3.08    |
| 14        | 생일도    | N10 | 0.92 | 2.21 | 4.33      | 3.26    |
| 17        | 부산항신항  | N14 | 0.98 | 1.32 | 4.78      | 4.05    |
| 18        | 대천해수욕장 | R02 | 0.99 | 1.07 | 5.56      | 5.26    |
| 평균        |        |     | 0.95 | 1.61 | 4.60      | 4.14    |

■ Testbed 선정

- Testbed는 우리나라 남해로 선정하였음(그림 7).
- 우리나라 남해는 쿠로시오로부터 분지된 대마 난류 통과 해역으로써, 대마 난류는 우리나라 남해안을 지나 황해와 동해로 유입되는 수송량의 근원임.
- Coastal KOOS와 같이 우리나라 근해역 예측 시스템에서는 남해안으로 유입 및 유출되는 수송 정보가 매우 중요함(경계역 구축, 자료동화 등).
- 또한, 우리나라 연안의 장기 해수면 변화를 보면 서해안이나 남해안보다 제주도 주변에서 해수면 상승률이 2배 이상 크게 나타남(Jeon, 2008).
- 최근, 양자강에서 유출된 고온/저염수도 남해안 내 영향을 미치고 있는 것으로

- 파악됨.
- 우리나라 주변 해양의 변화 원인(대마 난류, 해수면 상승, 저염수 등)을 파악하기 위한 목적과 더불어 예측 모델의 정확도 향상을 위해 남해를 testbed로 선정하여 최적 관측망을 구성할 필요가 있음.
  - 따라서, testbed 내의 관측망 설계는 우리나라에 영향을 주는 태풍의 영향, 동중국해 순환, 동해 해류 특성, 남해 내 물성 수송 등 다양한 연구에 필수적이며 실시간으로 자료가 생산되면 Coastal KOOS와 같은 해양예측 모델의 경계자료 구축 혹은 자료동화에 해상수송 정보로 중요한 역할을 하게 될 것임.

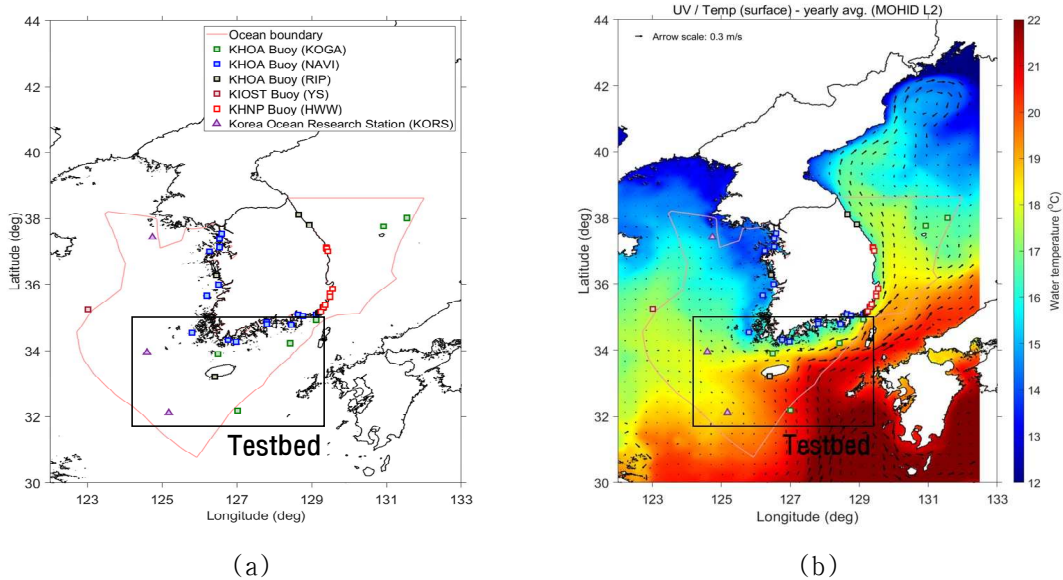


그림 7. (a) 관측망 최적화를 위한 testbed 및 (b) testbed를 중심으로 해류 및 수온 공간분포(연평균)

## 제 2 절. 입력자료(수치모델) 구축

- 관측망 최적화를 위해서 입력자료는 Coastal KOOS MOHID L2의 1시간 및 연평균 자료의 형태로 DB를 구축함(그림 7b).
- 또한, 관측점 추가가 가능한 우리나라 외해 경계를 설정하여 경계 내부 자료에 대한 DB도 구축하였으며(그림 8a), testbed 내부에서의 자료도 DB화 하였음(그림 8b).

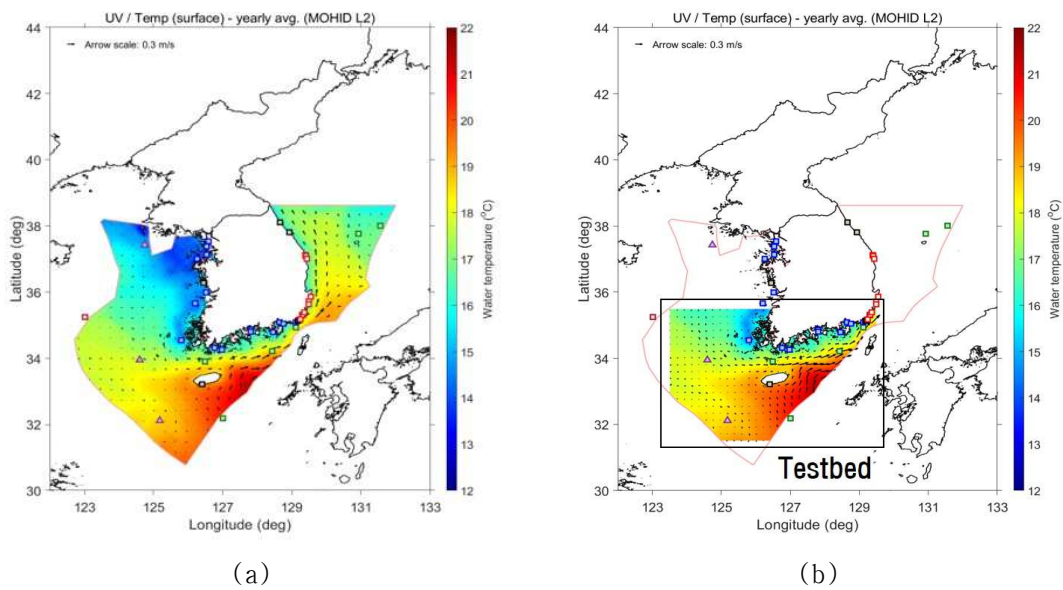


그림 8. (a) 외해경계 내부 및 (b) testbed 내부 입력자료 DB

### 제 3 절. MOEAs solver 기반 MOO solver 구축

- 설계항목(u/v-current/표층수온/염분)에 대한 독립적인 목적함수를 다중으로 구축하고, 이를 가중치 기반 단일 목적함수(식 1, 2)로 변환하여 MOEAs solver 를 이용하여 최적해 산정함(그림 9).

$$\begin{aligned} &\text{minimize } F(\mathbf{X}) = [f_u(\mathbf{X}), f_v(\mathbf{X}), f_{temp}(\mathbf{X}), f_{sal}(\mathbf{X})] \\ &\text{subject to } \mathbf{X}^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^U \end{aligned} \quad (1)$$

$$F(\mathbf{X}) = w_u f_u(\mathbf{X}) + w_v f_v(\mathbf{X}) + w_{temp} f_{temp}(\mathbf{X}) + w_{sal} f_{sal}(\mathbf{X}) \quad (2)$$

- 설계항목에 대한 독립적인 목적함수는 RMSD와 같은 스칼라 함수를 사용함(식 3).
- RMSE는 참값으로 가정한 수치모델의 공간분포(True)와 최적관측망으로부터 최적 내삽기법(Optimal Interpolation, OI)을 이용하여 재구성된 공간분포(Est.)로부터 계산됨.

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (True - Est.)^2} \quad (3)$$

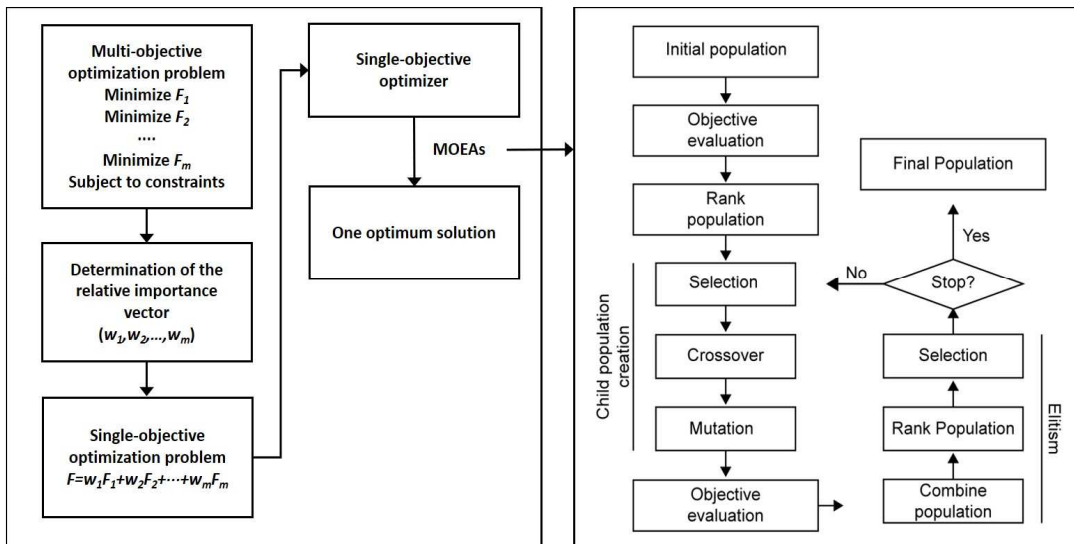


그림 9. MOEAs 기반 MOO solver 모식도

- MOO (Multi-Objective Optimization) 최적해(설계 정점의 개수에 대한 정점의

최적 위치)는 상호간에 비열등성을 가지고 있는 최적해들(non-inferior solutions)의 집합체인 파레토 프론트 형태로 출력(그림 10).

- 파레토 프론트를 찾기 위한 MOO solver로는 진화알고리즘(Evolutionary Algorithms, EA) 기반의 메타 휴리스틱 최적화 기법(e.g., 유전알고리즘 등)을 활용함(그림 11).

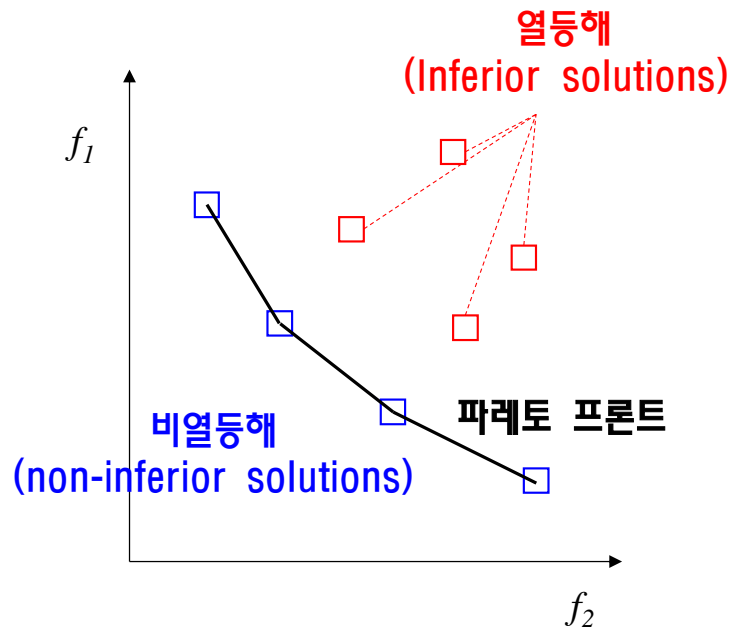


그림 10. 비열등해(non-inferior solutions)로부터 구성된 파레토 프론트(Pareto-front)

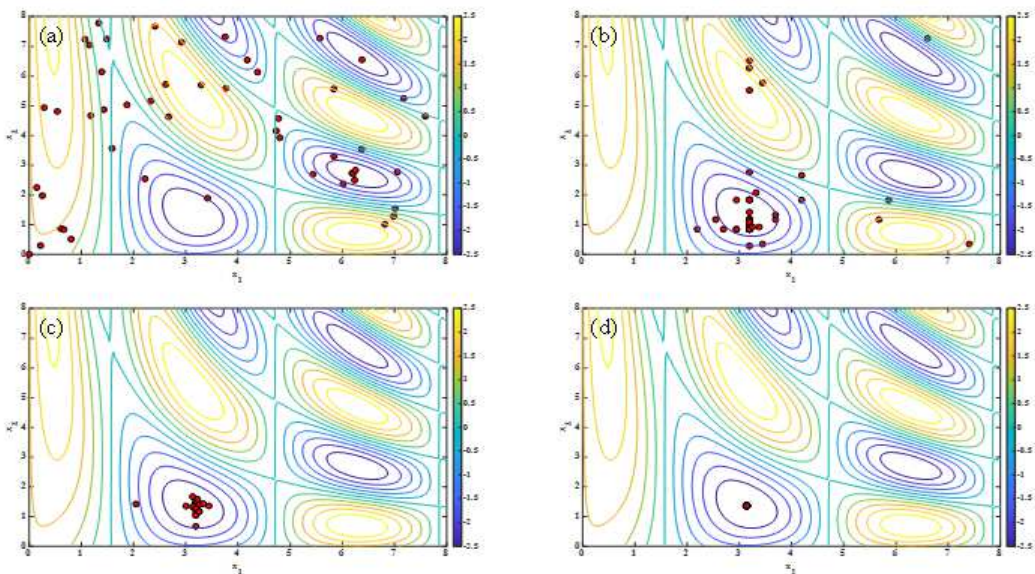


그림 11. 진화알고리즘 기반의 휴리스틱 최적화 기법 예시

## 제 4 절. ML 모듈 접합

- 최적화 문제의 경우 최적해를 산정하기 위해 솔루션 산출을 위한 탐색영역 (searching space or feasible region)의 개념이 존재하는데, 이러한 탐색영역이 매우 클 경우 산정된 최적해가 지역해(local solution)에 수렴할 우려가 있음.
- 특히, 정규격자 형태의 정점 배열 중에서 가장 최적의 위치를 찾는 문제의 경우 탐색영역의 개수가 기하급수적( $n!/(n-k)!k!$ )으로 늘어남.
- 물론 최적화 과정에서 모든 경우의 수를 탐색하는 이른바 무차별 대입 최적화 (Brute-Force Optimization, BFO)를 수행할 경우 전역해에 해당하는 최적해를 산출해 낼 수 있지만, CPU 혹은 GPU 연산을 수행한다 하더라도 로드를 감당할 수 없음.
- 또한, 설계 정점 개수 증가에 따른 탐색 영역의 증가는 최적화 과정에서 연산량 증가를 초래할 뿐만 아니라, 솔루션 탐색 시 전역해에 수렴하지 않고 지역해에 수렴할 가능성이 매우 높아 설계 정점 개수 증가에 따라 일관된 정점의 배열 형태가 도출되지 못할 가능성이 매우 높음.
- 이러한 기존의 수학적 최적화(Mathematical Optimization)와 경험적 최적화 (Heuristic Optimization)의 문제점을 보완하기 위해 최적화 탐색 과정에서의 기계학습(Machine Learning, ML) 모듈 접합을 수행함.
- ML 모듈은 MOEAs 기반 MOO solver의 전역해(global solution) 수렴안정성을 확보하기 위해, 최적해 솔버로서 모듈에 결합하여 MOML 모듈을 구축함(그림 12, 13).

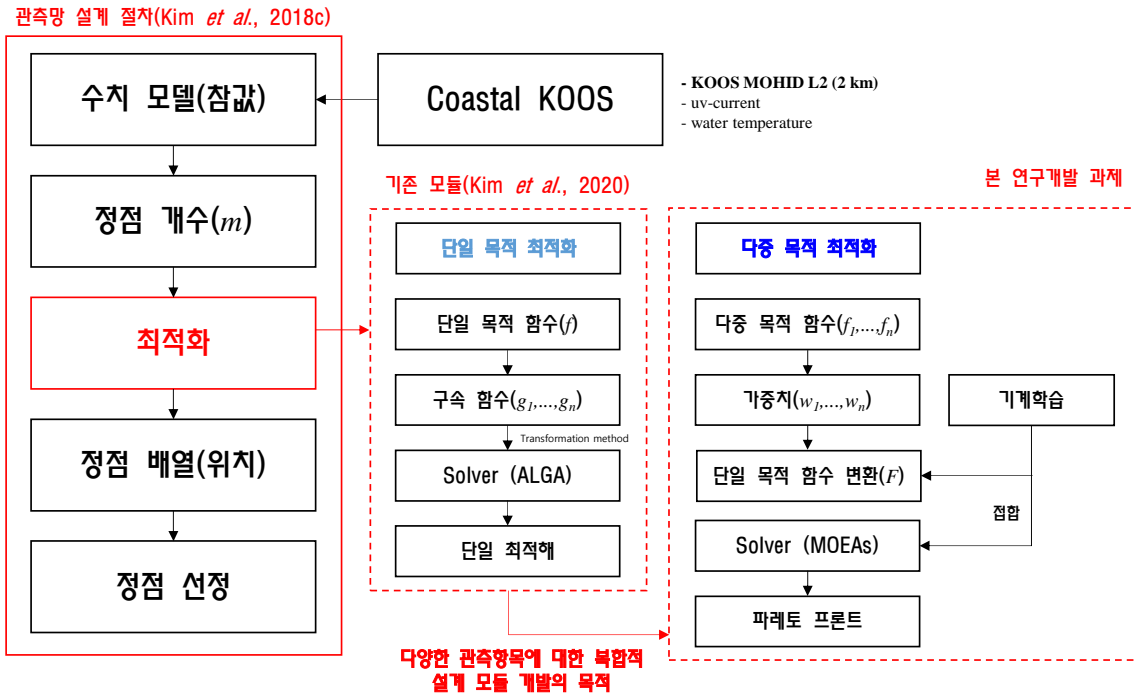


그림 12. MOEAs 기반 MOO solver에 ML 모듈을 접합한 관측망 최적화 설계 모듈

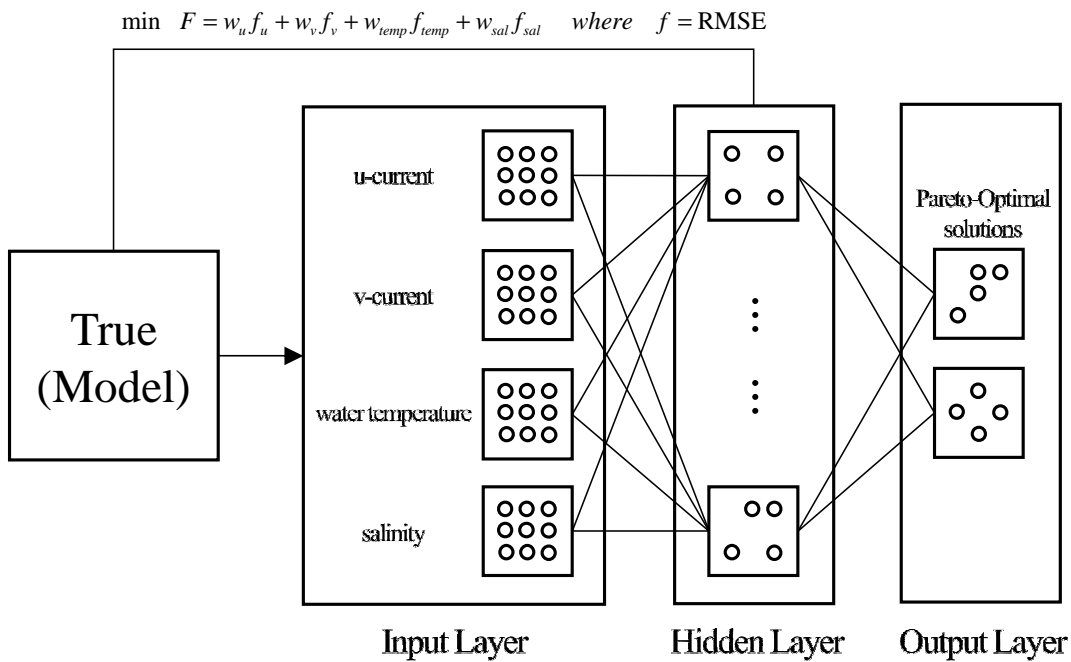


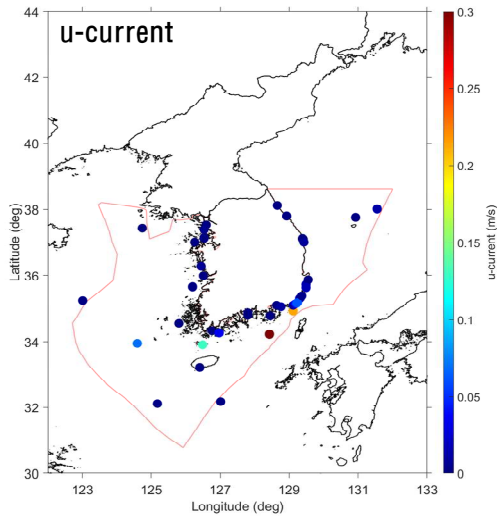
그림 13. MOML 모듈 기반의 파레토 최적해(관측망) 설계 모듈 모식도

## 제 5 절. MOML 모듈 적용

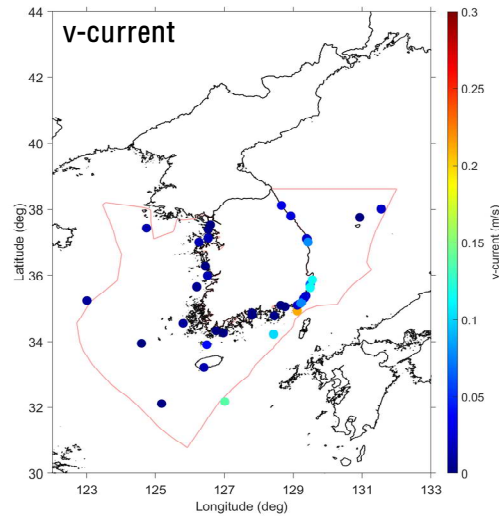
### ■ 기존 관측망 평가

- 최적 관측망 설계에 앞서 기존에 우리나라 근해에 구축되어 있는 부이 및 과학기지 관측망에 대한 성능 평가를 실시하였음.
- 기존 우리나라 근해 부이 관측망은 본 연구의 설계항목인  $u/v$ -current, 수온, 염분 4가지 항목에 대한 자료를 실시간으로 취득하고 있는 부이 및 과학기지만을 분류하여 평가하였음(그림 7a).
- 설계 관측 항목인  $u/v$ -current, 수온, 염분 4가지 항목에 대한 자료를 실시간으로 취득하고 있는 관측점은 국립해양조사원(KHOA)에서 운영하고 있는 주요해역(KOGA) 부이 6개소, 주요항로(NAVI) 부이 15개소, 이안류(RIP) 부이 7개소, 과학기지 3개소, 한국해양과학기술원(KIOST)에서 운영하고 있는 황해중부부이(YS) 1개소, 그리고 한국수력원자력(KHNP)에서 운영하고 있는 해양관측부이 9개소임.
- 모델 격자체계에서 기존 관측점과 동일한 위치에서의 설계항목들에 대한 자료를 추출하여 평가의 입력값으로 활용하였음(그림 14).
- 입력자료 검증과는 달리, 기존 관측망 평가에서는 모델에서 반영하기 힘든 격자 외 관측 정점들도 OI 과정에서 최대한 반영하기 위해 관측점에 최근접점에 해당하는 격자점의 자료를 추출하여 입력값으로 활용함(그림 14).
- Testbed 내에서의 기존 관측망을 이용하여 OI를 통해 공간분포를 재구성함(그림 15).
- 참값(그림 15a,c)과 비교하여 기존 관측망에서는 황해부근에서 발생하는 남향성분의 해류와 대한해협을 통과하는 대마난류의 흐름특성을 모의하기 못하는 것으로 판단되며, 수온과 염분 역시 황해 및 서해 연안 부근에서 cold bias가 과대 모의되고 대한해협을 통과하는 수온과 염분 전선에 대한 구조적인 특성을 재현해 내지 못하고 있음(그림 15b,d). 또한, 염분의 경우 여수/광양 부근에서 cold bias가 과대 모의되고 있으며, 양자강으로부터 유출되는 저염수의 구조적 특성을 재현해 내지 못하고 있음.
- 기존 관측망으로부터 재구성된 공간분포는 참값으로 활용한 Coastal KOOS MOHID L2 모델 자료와 비교하여 상관계수와 RMSD를 표 5에 정리하였음.

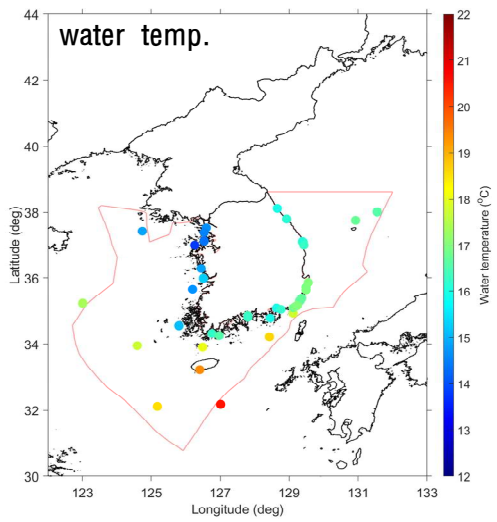




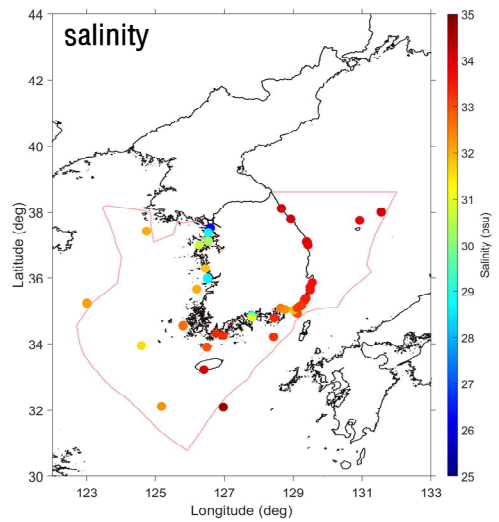
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 14. 기존 관측망 정점에서 추출한 모델자료. (a) u-current, (b) v-current, (c) 수온, (d) 염분

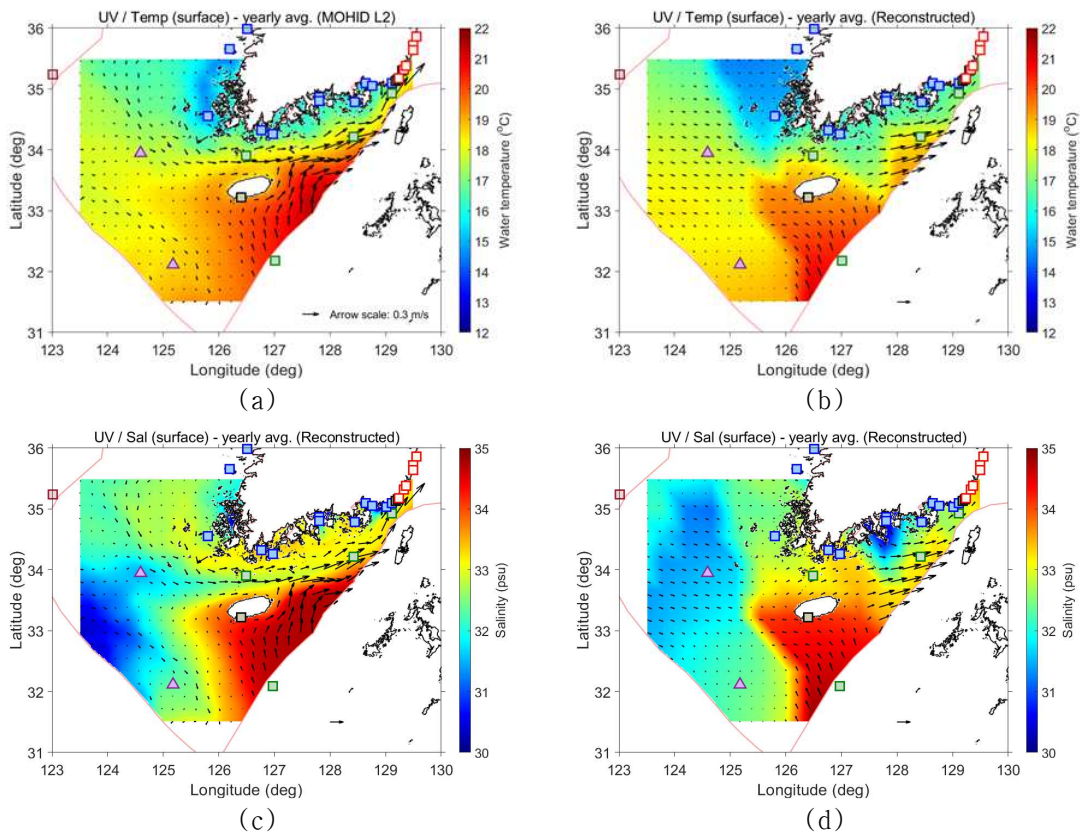


그림 15. Testbed 내에서의 Coastal KOOS MOHID L2 모델의 (a) 수온과 (c) 염분의 공간분포(True) 및 기존 관측망을 이용하여 OI를 통해 재구성한 (b) 수온과 (d) 염분의 공간분포(Est.)

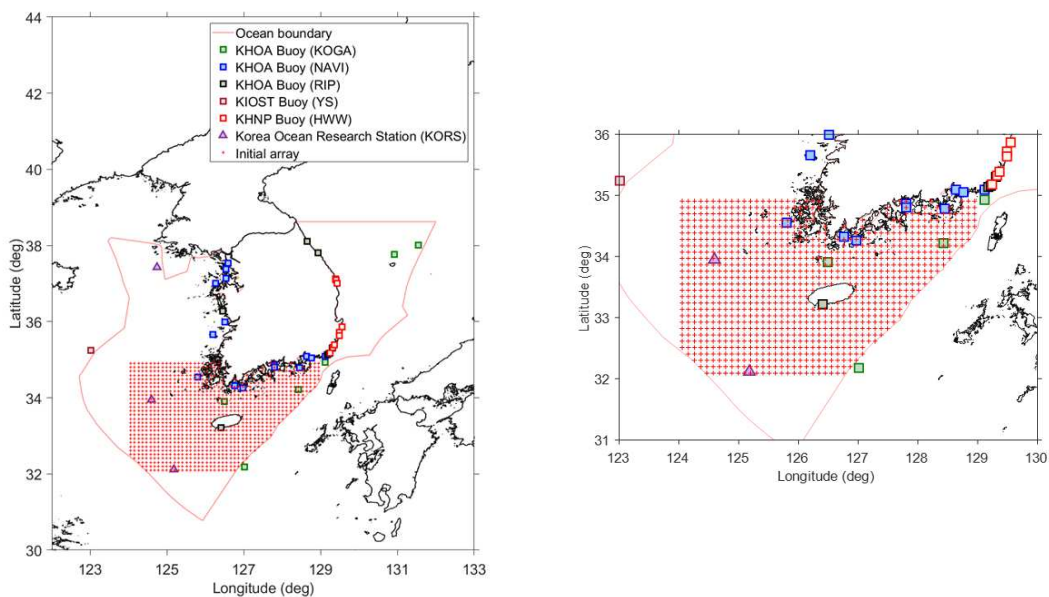
표 5. 기존 관측망을 이용하여 OI를 통해 재구성한 공간분포의 통계값

| Statistics  | u-current | v-current | water temp. | Salinity |
|-------------|-----------|-----------|-------------|----------|
| Correlation | 0.75      | 0.64      | 0.90        | 0.78     |
| RMSD        | 0.70      | 0.85      | 0.44        | 0.65     |

### ■ 최적관측망 설계

- 최적화 과정에서 필요한 초기 정점의 배열은 우리나라 외해 경계 내부의 Testbed 내에서 978개 정점을 정규격자 형태로 구성함(그림 16).
- 초기 정점의 개수 및 위치(배열형태)는 전산자원의 한계를 고려하여 고/저해 상도로 조정 가능하도록 모듈을 구성함.
- 모델 격자 체계에서 각 초기 정점 위치와 동일한 위치에서 설계 항목들에 대한 자료를 추출하여 최적화의 입력자료로 사용함.

- Testbed 내에서의 관측망은 기존 관측망에 추가 설계 부이 개수( $n_b$ )를 1개에서 4개까지 조정하며 설계하였음.
- 그림 17는 설계 부이 정점의 개수( $n_b$ ) 1개부터 4개까지의 파레토 프론트(또는 파레토 최적해)를 산정한 것임.
- 파레토 프론트를 구성하는 점들은 수많은 가능해들 중에서 각 관측 항목별 목적함수를 trade-off 시키는 비열등 최적해(non-inferior solution)를 의미함.
- 설계 부이 정점의 개수가 1개( $n_b=1$ )일 때는 파레토 최적해 8개로 파레토 프론트가 산정됨(그림 17a). 이는, 설계 관측 항목별 가중치가 변함에 따른 설계 정점의 위치(배열 형태)가 크게 변하지 않음을 의미함.
- 설계 정점의 개수가 2개( $n_b=2$ )일 때부터 매우 많은 파레토 최적해로부터 파레토 프론트가 산정되게 되는데(그림 17b-d), 이는 설계 관측 항목별 가중치의 변화에 따른 정점의 배열 형태가 여러 세트로 산정될 수 있음을 의미함.
- 파레토 최적해들은 각각 서로 다른 관측점의 배열 형태를 산출하게 되며, 이는 각 관측점의 배열 형태에 따라 재구성되는 공간분포의 구조적 특성이 다르기 때문임.
- 각 설계 관측 정점의 개수별로 산출된 최적 관측망을 이용하여 재구성된 관측 항목별 공간분포는 그림 18-33임.



(a)

(b)

그림 16. (a) 한반도 전체 및 (b) Testbed 내의 초기 정점 배열(안)

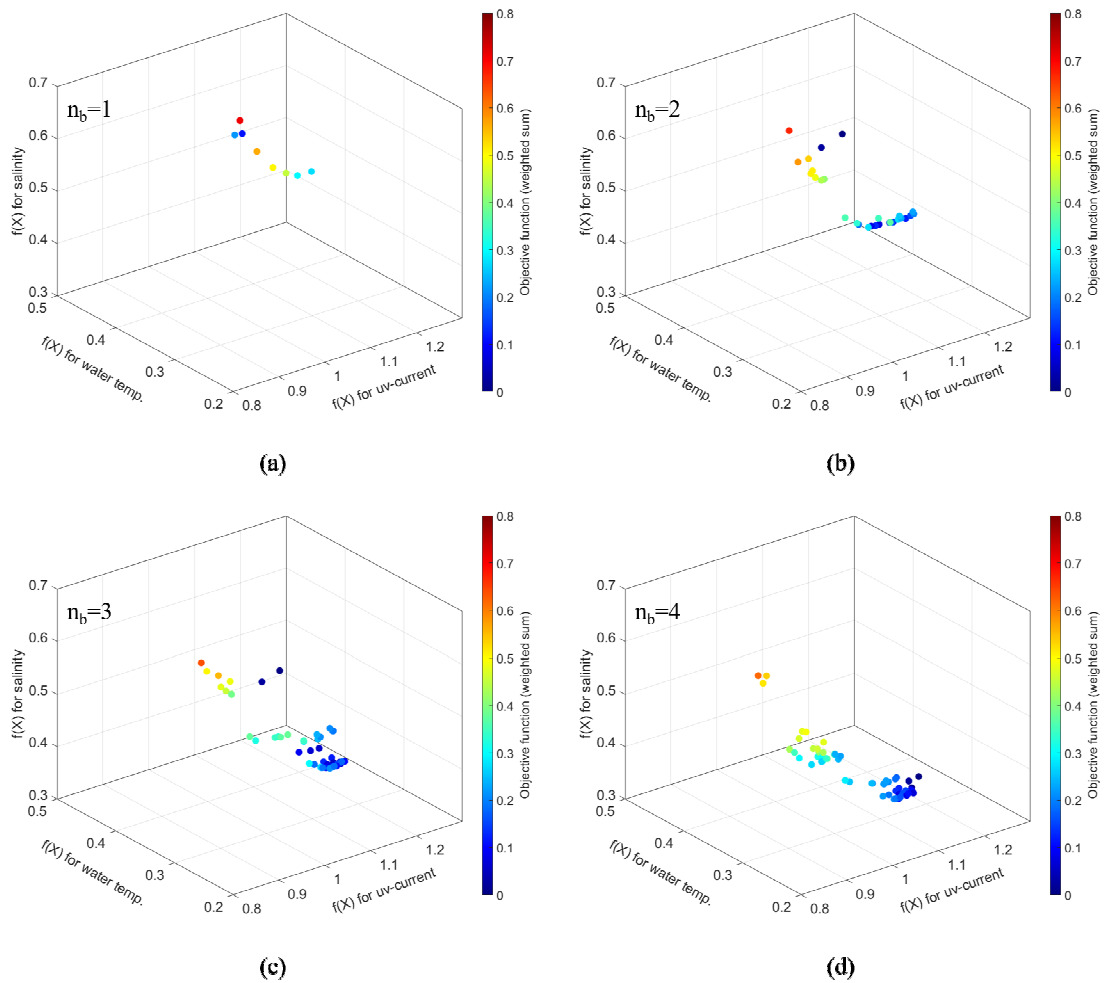


그림 17. 설계 부이 개수(nb) (a) 1개, (b) 2개, (c) 3개, (d) 4개일 때 산출된 파레토 프론트(Pareto-Front)

- 그림 18는 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수( $n_b$ ) 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 최적으로 선정된 정점은 황동중국해 부근으로 선정되었으며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 양자강 저염수의 구조적 특성을 재현해 내기 위함으로 보임.
- 그림 19은 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수( $n_b$ ) 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 최적으로 선정된 정점은 제주 동부(대마난류 통과해역)로 선정되었으며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 대마난류의 hot bias 특성을 재현해 내기 위함으로 보임.

- 그림 20은 유속(uv-current)이 우세한 경우( $w_{u,v} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수( $n_b$ ) 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 최적으로 선정된 정점은 제주도 북동방향에 위치하며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현하지 못했던 유속 벡터의 방향성을 재현해 내기 위함으로 보임.
- 그림 21은 4개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우( $w_u, w_v, w_{temp}, w_{sal} = 0.25$ ) 설계 정점( $n_b$ )의 개수 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 최적으로 선정된 정점은 유속과 수온 우세에서 선정된 정점 사이인 제주도 동부로 선정되었으며, 이는 4개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치가 부여됨에 따른 중립적 위치인 것으로 판단됨.

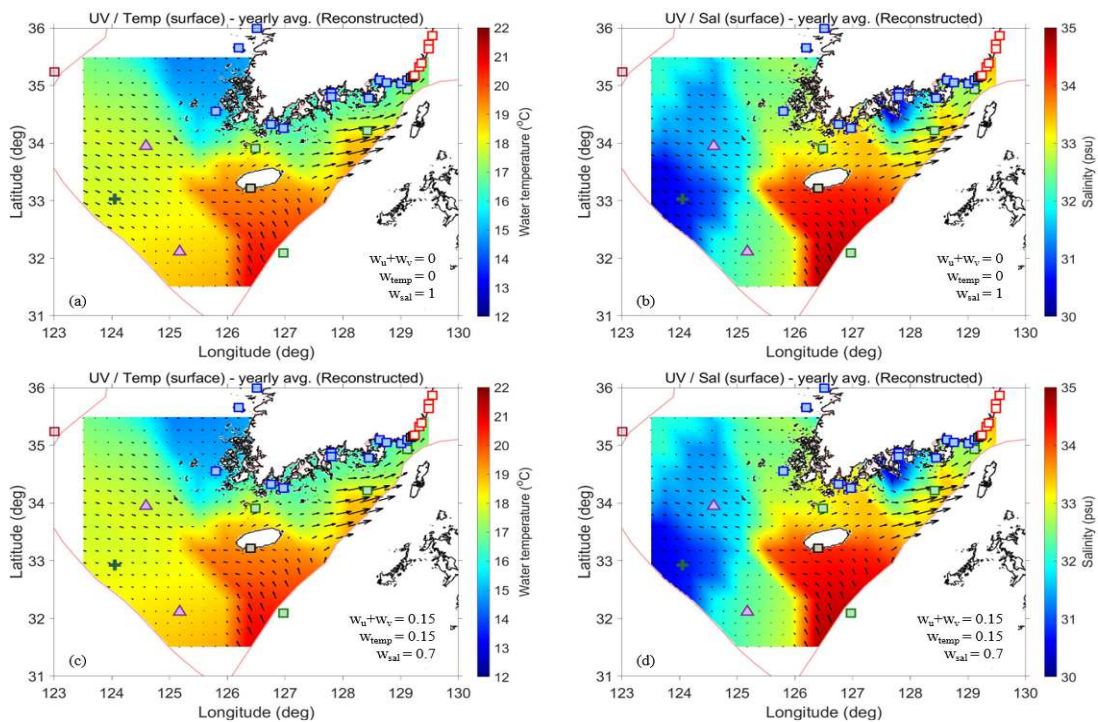


그림 18. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

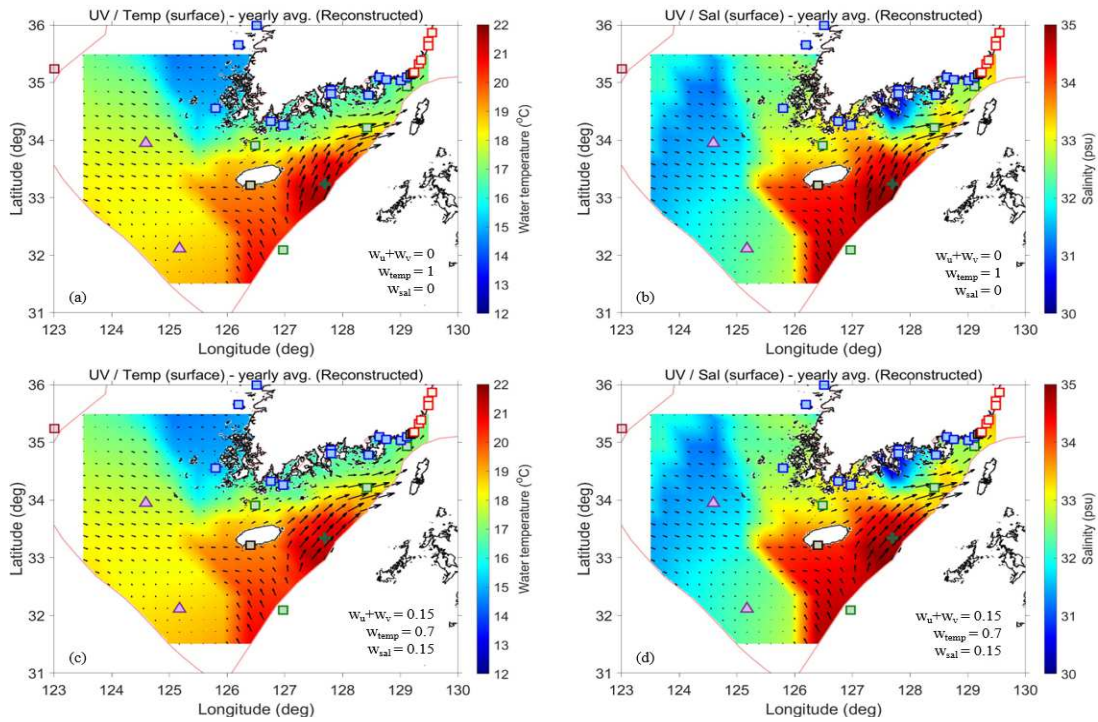


그림 19. 수온이 우세한 경우 ( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

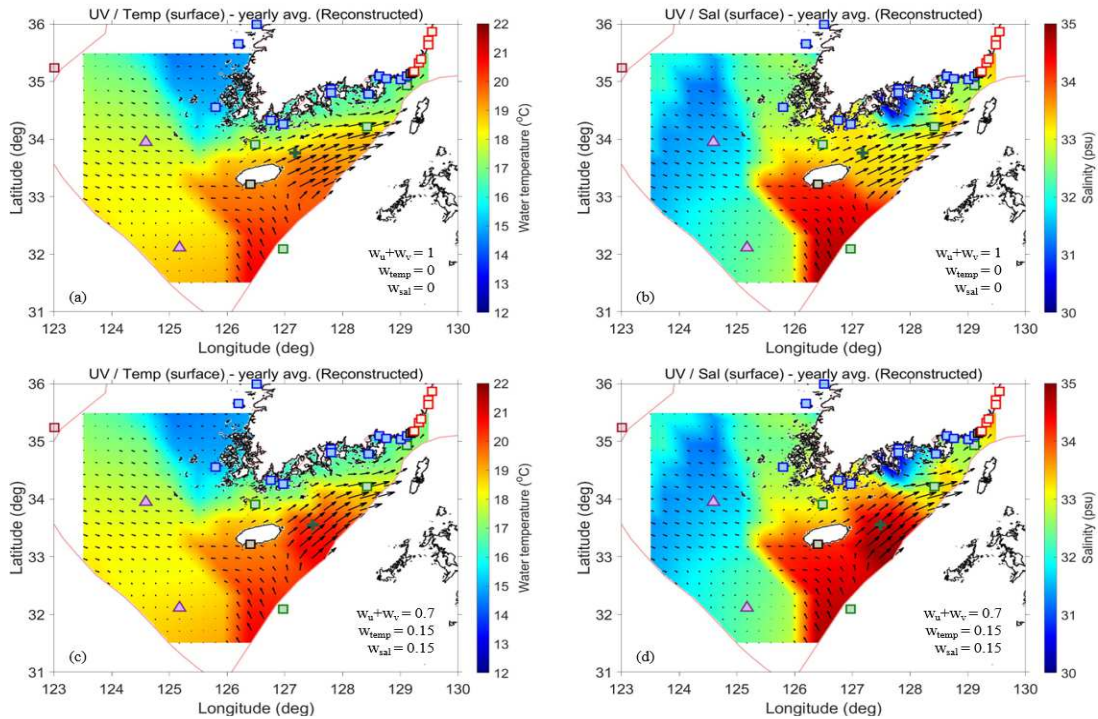


그림 20. 유속(uv-current)이 우세한 경우 ( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

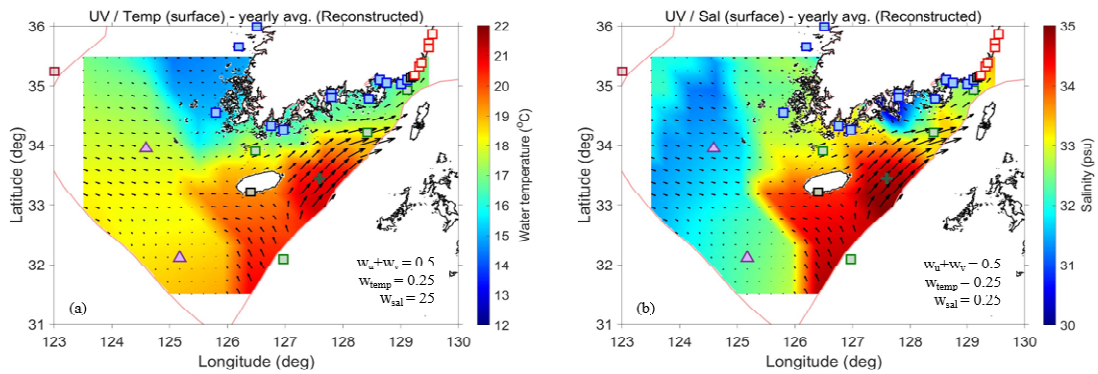


그림 21. 4개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수 1개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

- 그림 22-26은 각 설계 관측 항목의 가중치에 따라 설계 정점의 개수( $n_b$ )가 2개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 전체적으로 설계 정점의 개수가 1개일 때 선정된 정점이 그대로 유지된 상태에서 각 항목별 가중치에 따라 공간분포의 구조적 특성을 보정하기 위한 정점들이 추가적으로 선정되었음.
- 염분이 매우 우세한 경우( $w_{sal}=1; w_u, w_v, w_{temp}=0$ ) 추가 정점은 여수/광양에 가까운 연안해역에서 선정된 것을 알 수 있으며 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현하지 못했던 여수/광양 부근의 염분 cold bias를 보정하기 위한 것으로 보임(그림 22a,b). 반면 염분이 우세하지만 다른 설계 관측 항목들에도 가중치가 부여된 경우( $w_{sal}=0.75; w_u, w_v, w_{temp}=0.15$ ) 추가 정점은 수온 우세인 제주 동부(대마난류 통과해역) 부근에 선택됨을 확인할 수 있음(그림 22c,d). 이는, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15 b,d)에서 재현해 내지 못했던 대마난류의 염분전선의 구조적 특성을 재현해 내기 위함으로 보임.
- 수온이 매우 우세한 경우( $w_{temp}=1; w_u, w_v, w_{sal}=0$ ) 추가 정점은 서해방향 흑산도 외해 부근에 선택됨(그림 23a,b). 이는, 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 서해 연안에서의 cold bias 성분을 보정하기 위한 것으로 보임. 또한, 수온의 경우 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여( $w_{temp}=0.75; w_u, w_v, w_{sal}=0.15$ )된다 하더라도 수온이 매우 우세한 경우( $w_{temp}=1; w_u, w_v, w_{sal}=0$ )의 정점이 그대로 유지되고 있음(그림 23a,b 및 그림 23 c,d).

- 유속이 매우 우세한 경우( $w_{u,v}=1; w_{temp}, w_{sal}=0$ ) 추가 정점은 제주 남부 해역 부근(이어도 과학기지와 KOGA 제주 남부 부이 사이)에 선택됨(그림 24a,b). 이는, 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 쿠로시오로부터 분지된 대마난류가 황해와 남해로 유입되는 유속의 방향벡터 성분을 보정하기 위함으로 보여짐. 또한, 유속의 경우 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여된 경우( $w_{u,v}=0.75; w_{temp}, w_{sal}=0.15$ ) 기존에 선택된 정점 부근에 추가적으로 정점이 선택되어 있는데, 이는 선택된 해역의 유속벡터 방향 성분을 좀 더 보강하기 위해 선택된 것으로 보여짐(그림 24c,d).
- 4개의 설계 관측 항목에 동일한 가중치가 부여된 경우 ( $w_u, w_v, w_{temp}, w_{sal}=0.25$ ), 추가 정점은 서해방향 흑산도 외해 부근에 선택되었으며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 서해 연안에서의 cold bias 성분을 보정하기 위함으로 보여짐(그림 25).

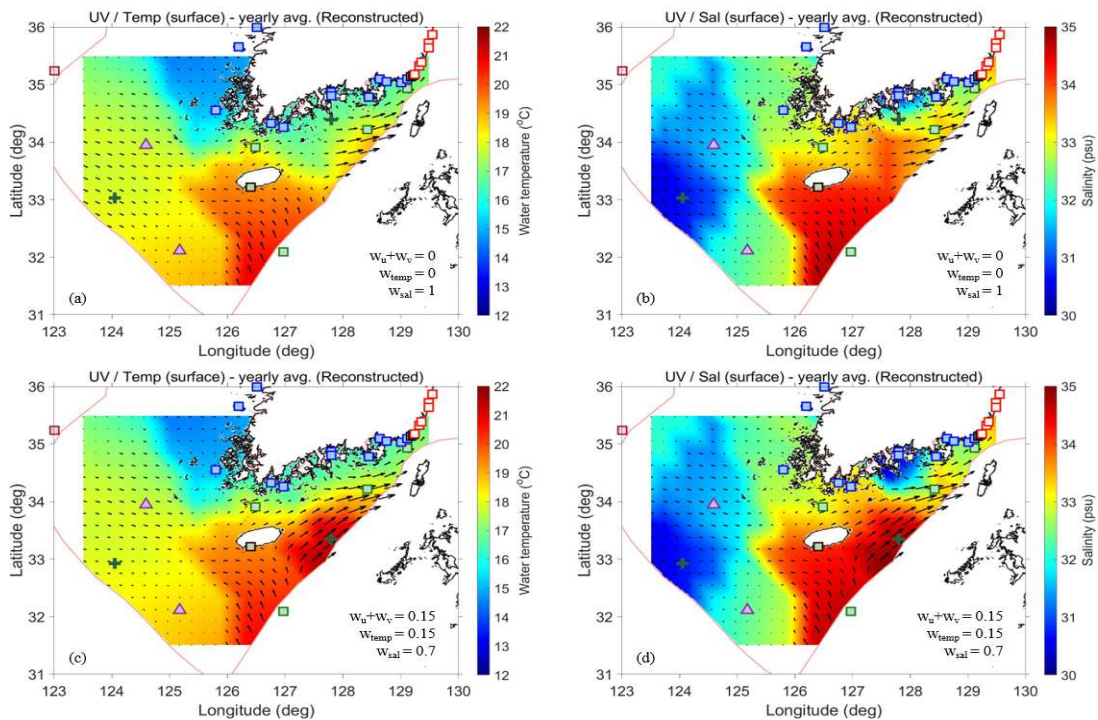


그림 22. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 2개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포



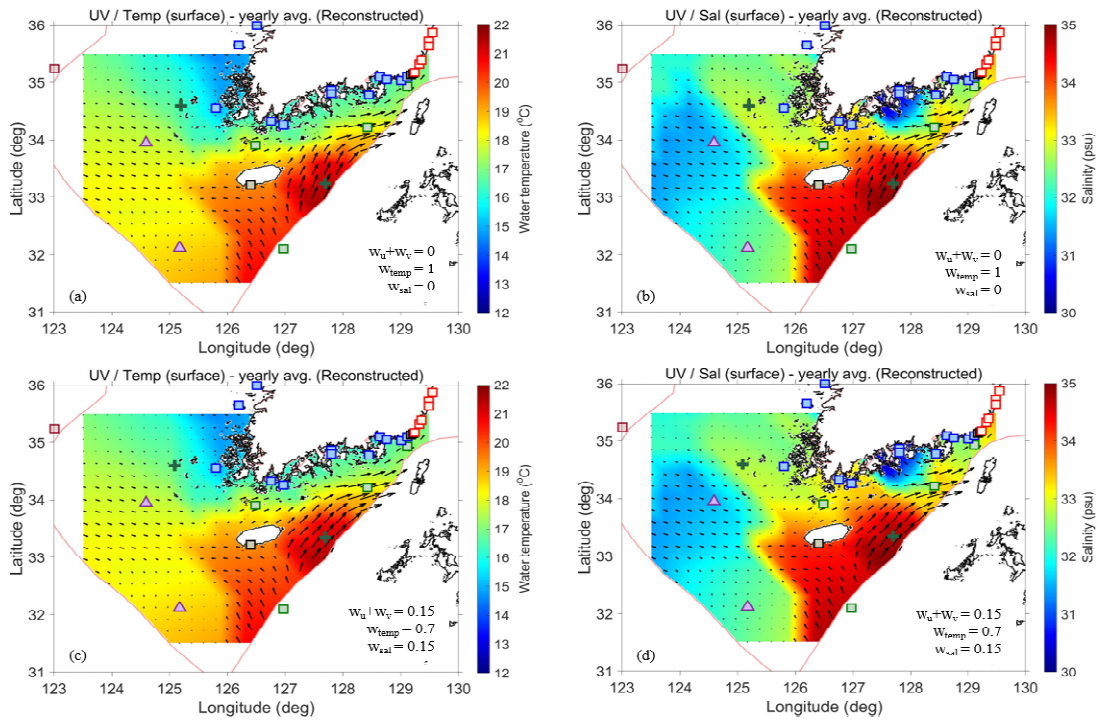


그림 23. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 2개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

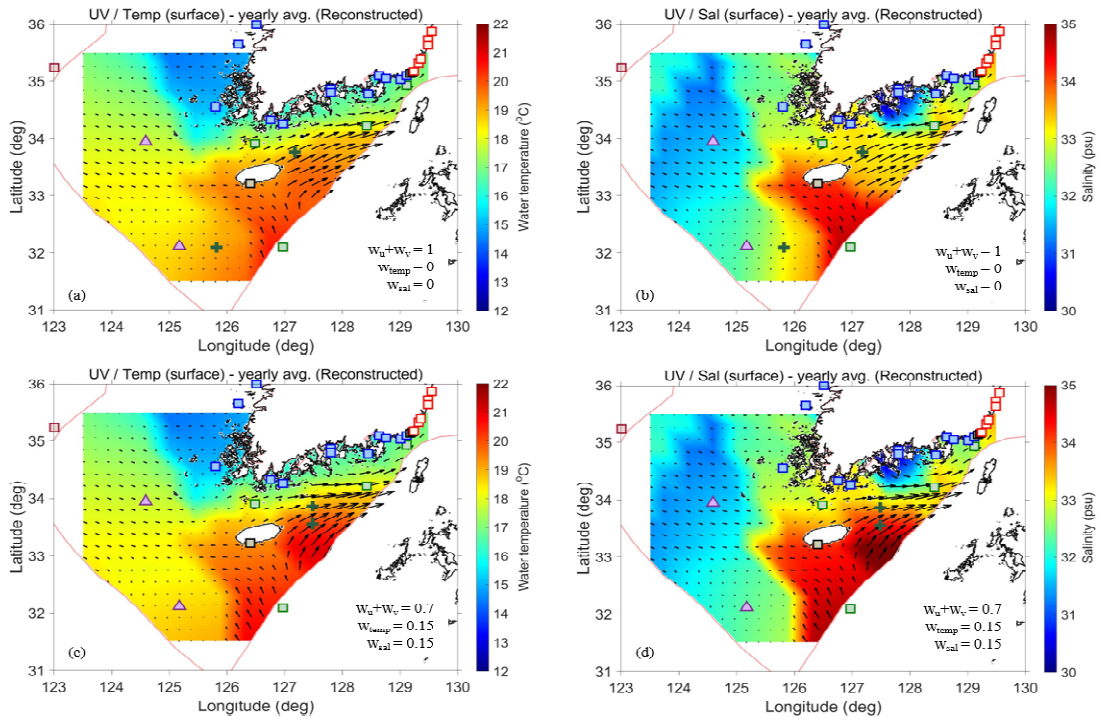


그림 24. 유속(uv-current)이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 2개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

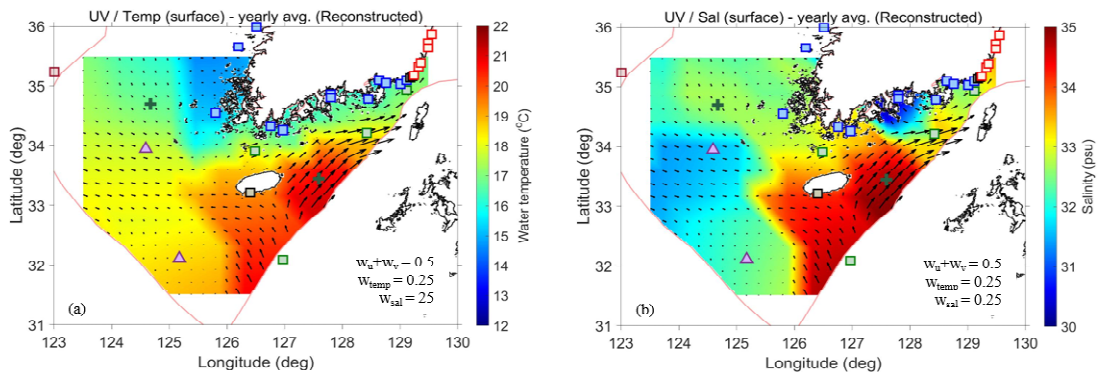


그림 25. 4개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수 2개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

- 그림 26-29은 각 설계 관측 항목의 가중치에 따라 설계 정점의 개수(nb)가 3개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 전체적으로 설계 정점의 개수가 2개일 때 선정된 정점이 그대로 유지된 상태에서 각 항목별 가중치에 따라 공간분포의 구조적 특성을 보정하기 위한 정점들이 추가적으로 선정되었음.
- 염분이 매우 우세한 경우( $w_{sal}=1; w_u, w_v, w_{temp}=0$ ) 추가 정점은 서해방향 흑산도 외해 부근에 선택되어졌으며, 이는 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 서해 연안에서의 cold bias 성분을 보정하기 위한 것으로 보임(그림 26). 또한, 다른 설계 항목에 가중치가 부여( $w_{sal}=0.75; w_u, w_v, w_{temp}=0.15$ )되더라도 염분이 매우 우세한 경우( $w_{sal}=1; w_u, w_v, w_{temp}=0$ )의 정점이 그대로 유지되고 있음(그림 26c,d).
- 수온이 매우 우세한 경우( $w_{temp}=1; w_u, w_v, w_{sal}=0$ ) 추가 정점은 제주 남부 해역 부근(이어도 과학기지와 KOGA 제주 남부 부이 사이)에 선택되어졌으며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 쿠로시오로부터 분지된 대마난류가 황해와 남해로 유입되는 유속의 방향벡터 성분을 보정하기 위함으로 보여짐(그림 27a,b). 또한, 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여( $w_{temp}=0.75; w_u, w_v, w_{sal}=0.15$ )된다 하더라도 수온이 매우 우세한 경우( $w_{temp}=1; w_u, w_v, w_{sal}=0$ )의 정점이 그대로 유지되고 있음(그림 27c,d).
- 유속이 매우 우세한 경우( $w_{u,v}=1; w_{temp}, w_{sal}=0$ ) 추가 정점은 제주도 동부 연안 해역에 선택되었으며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 유속 벡터 방향성을 보강하기 위함으로 보여짐(그림

28a,b). 또한, 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여될 경우 ( $w_{u,v}=0.75; w_{temp}, w_{sal}=0.15$ ) 관측점은 제주 남부 해역 부근(이어도 과학기지 와 KOGA 제주 남부 부이 사이)에 선택됨(그림 28c,d). 하지만, 결과적으로 유속이 매우 우세한 경우( $w_{u,v}=1; w_{temp}, w_{sal}=0$ )와 관측점의 배열 형태는 거의 유사하게 나타남.

- 4개의 설계 관측 항목에 동일한 가중치가 부여된 경우 ( $w_u, w_v, w_{temp}, w_{sal}=0.25$ ), 추가 정점은 제주도 북동쪽에 선정되었으며, 이는 유속 방향 벡터 성분과 수온 및 염분전선에 대한 구조적인 특성을 보강하기 위해 선택된 것으로 보여짐(그림 29).

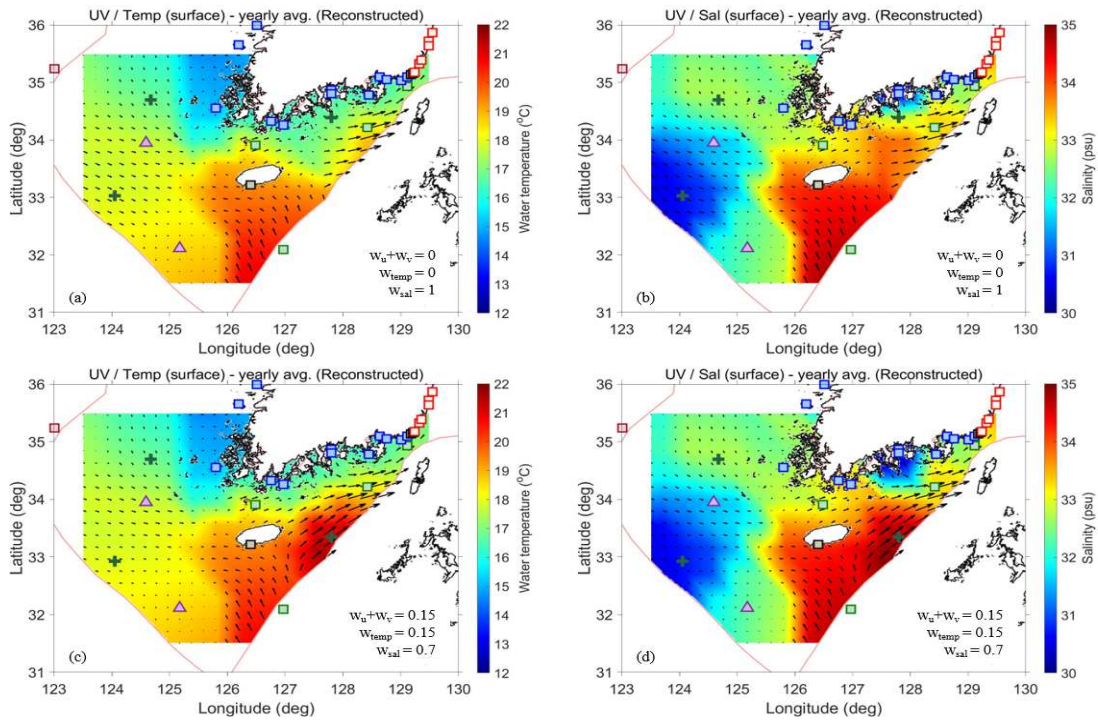


그림 26. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 3개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

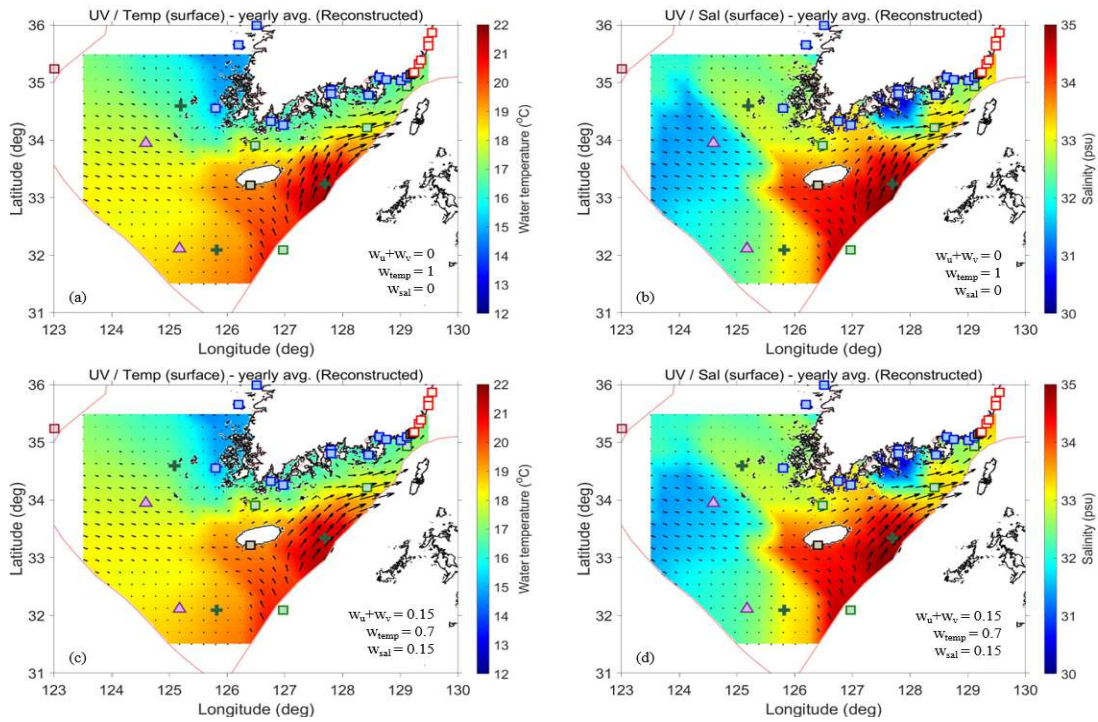


그림 27. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 3개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

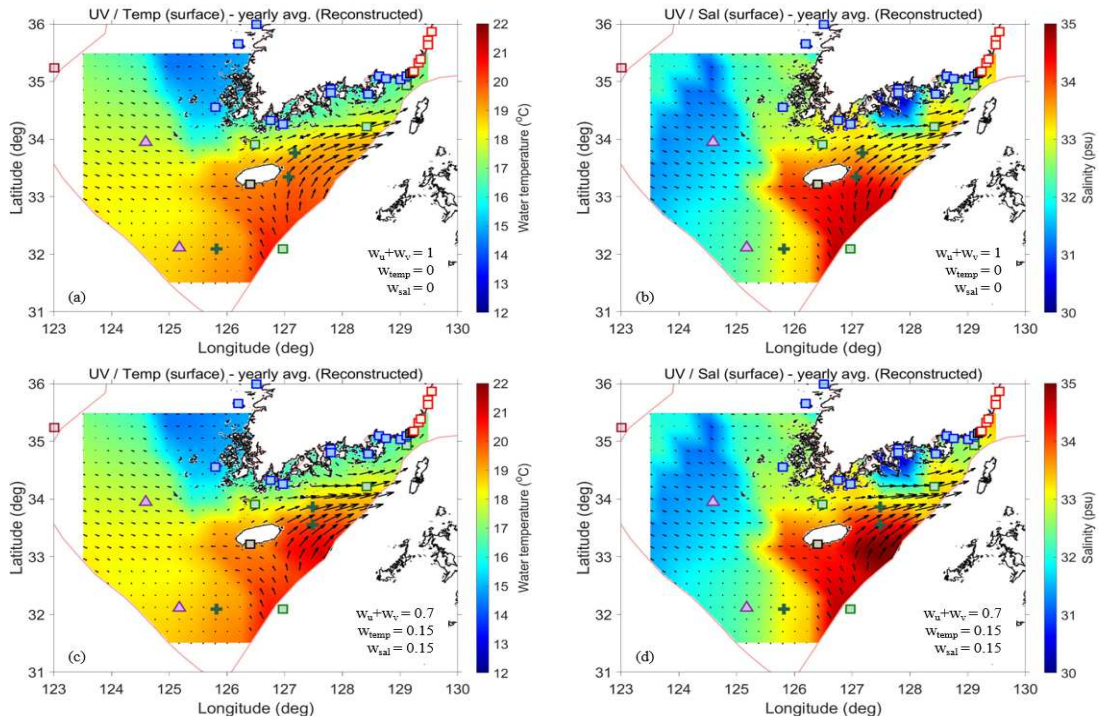


그림 28. 유속(uv-current)이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 3개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

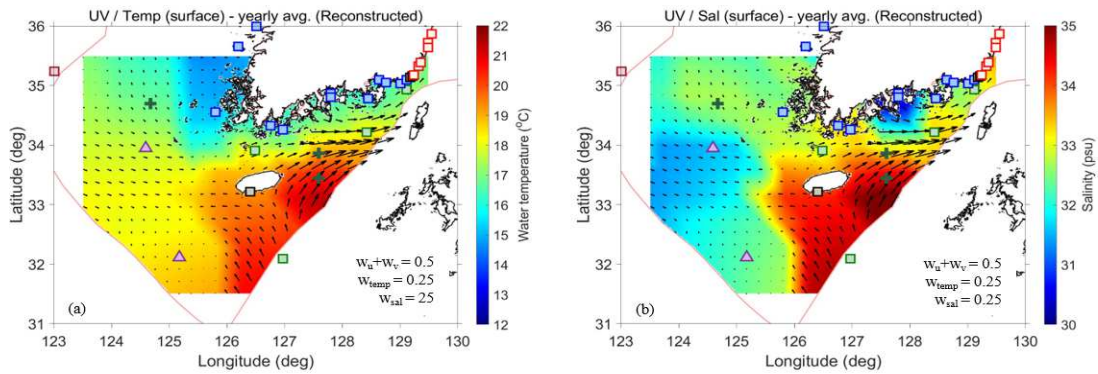


그림 29. 4개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수 3개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

- 그림 30-33은 각 설계 관측 항목이 가중치에 따라 설계 정점의 개수(nb)가 4개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포임. 전체적으로 설계 정점의 개수가 3개일 때 선정된 정점이 그대로 유지된 상태에서 각 항목별 가중치에 따라 공간분포를 보정하기 위한 정점들이 추가적으로 선정되었음.
- 염분이 매우 우세한 경우( $w_{sal}=1; w_{u,v}, w_{temp}=0$ ) 추가 정점은 제주 동부 해역에 선택되어졌으며, 이는 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 염분전선의 구조적인 특성을 보정하기 위한 것으로 보여짐(그림 30a,b). 또한, 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여될 경우 ( $w_{sal}=0.75; w_{u,v}, w_{temp}=0.15$ ) 추가 정점은 여수/광양 부근 연안해역에 선택되어졌으며, 이는 여수/광양 부근의 염분 cold bias를 보정하기 위한 것으로 보여짐(그림 30c,d). 하지만, 결론적으로 염분이 매우 우세한 경우와 염분이 우세하지만 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여된 경우의 관측망 형태는 설계 정점의 개수가 4개가 되었을 때 거의 같은 위치에서 선택되어 하나의 형태로 수렴하였음.
- 수온이 매우 우세한 경우( $w_{temp}=1; w_{u,v}, w_{sal}=0$ ) 추가 관측점은 제주도 북동방향에 선택되어 졌으며, 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포(그림 15b,d)에서 재현해 내지 못했던 수온 전선의 구조적인 특성을 보정하기 위한 것으로 보여짐(그림 31a,b). 다른 설계 관측 항목에 가중치가 부여된 경우 ( $w_{temp}=0.75; w_{u,v}, w_{sal}=0.15$ ) 추가 정점의 위치는 수온이 매우 우세한 경우 ( $w_{temp}=1; w_{u,v}, w_{sal}=0$ )와 다르게 황동중국해 부근에 선택되어짐(그림 31c,d).

이는, 염분에 대한 가중치 부여 보상으로 양자강 저염수를 재현해 내기 위해 선택된 것으로 보여짐.

- 유속이 매우 우세한 경우( $w_{u,v}=1; w_{temp}, w_{sal}=0$ ) 추가 정점은 KOGA 제주해협 부이 부근에 선택되어짐(그림 32a,b). 기존 부이의 위치 근방에 추가 정점이 선택된 것은 적절치 못한 것으로 보여지며 최적화 과정에서 지역해(local solution) 수렴 가능성도 있을 수 있음. 다른 설계 관측 항목에도 가중치가 부여된 경우( $w_{u,v}=0.75; w_{temp}, w_{sal}=0.15$ ) 추가 정점의 위치는 서해방향 흑산도 외해역에 선정되었으며, 이는 서해 부근에서 발생하는 남향 성분의 해류 유속 벡터 성분을 보정하기 위한 것으로 보임(그림 32c,d). 유속이 매우 우세한 경우( $w_{u,v}=1; w_{temp}, w_{sal}=0$ )의 관측망의 대안으로 의사결정 과정에서 유속이 우세하지만 다른 설계 관측 항목에도 가중치가 일부 부여(e.g.,  $w_{u,v}=0.75; w_{temp}, w_{sal}=0.15$ )된 다른 파레토 최적해를 탐색하여 선정하는 것이 바람직 할 것으로 보여짐.
- 4개의 설계 관측 항목에 동일한 가중치가 부여된 경우( $w_u, w_v, w_{temp}, w_{sal}=0.25$ ) 추가 정점의 위치는 서해방향 흑산도 외해역에 선정되었음(그림 33). 이는, 기존 관측망으로부터 얻은 공간분포에서 나타난 수온과 염분의 cold bias, 그리고 서해 부근에서 발생하는 남향 성분의 해류 유속 벡터 성분을 보정하기 위한 것으로 보여짐. 하지만, 궁극적으로 양자강 저염수에 대한 정보를 취득할 수 있는 정점이 선정되지 않아, 의사 결정과정에서 다른 대안을 모색해야 함.

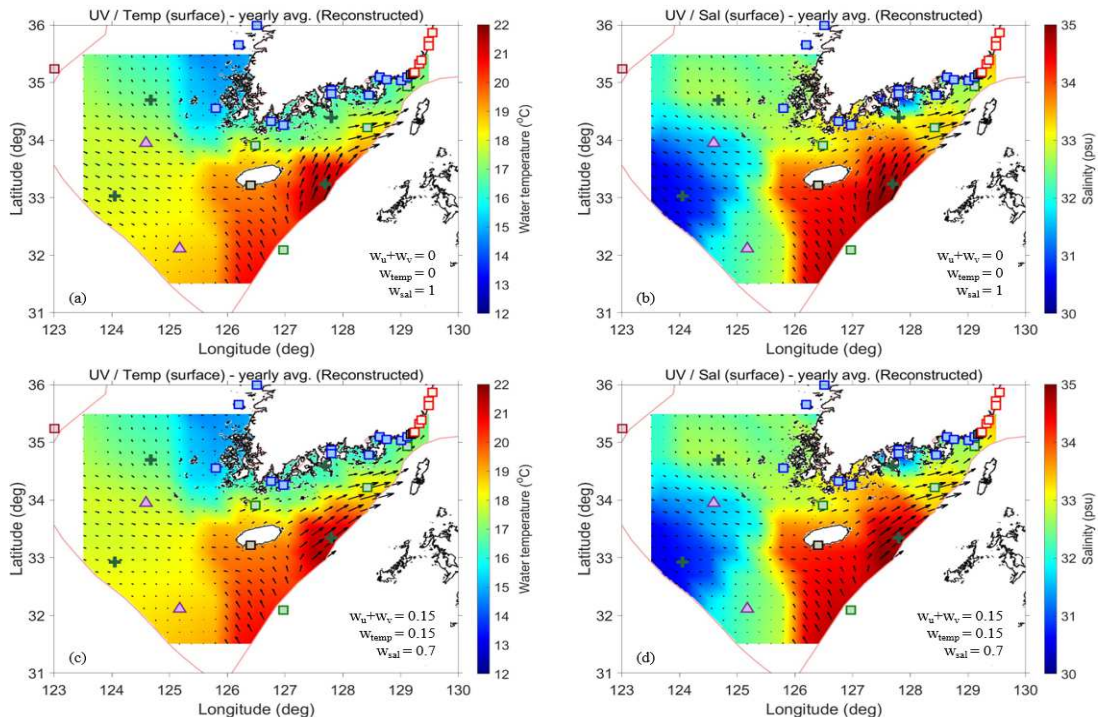


그림 30. 염분이 우세한 경우( $w_{sal} > w_u, w_v, w_{temp}$ ) 설계 정점의 개수 4개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

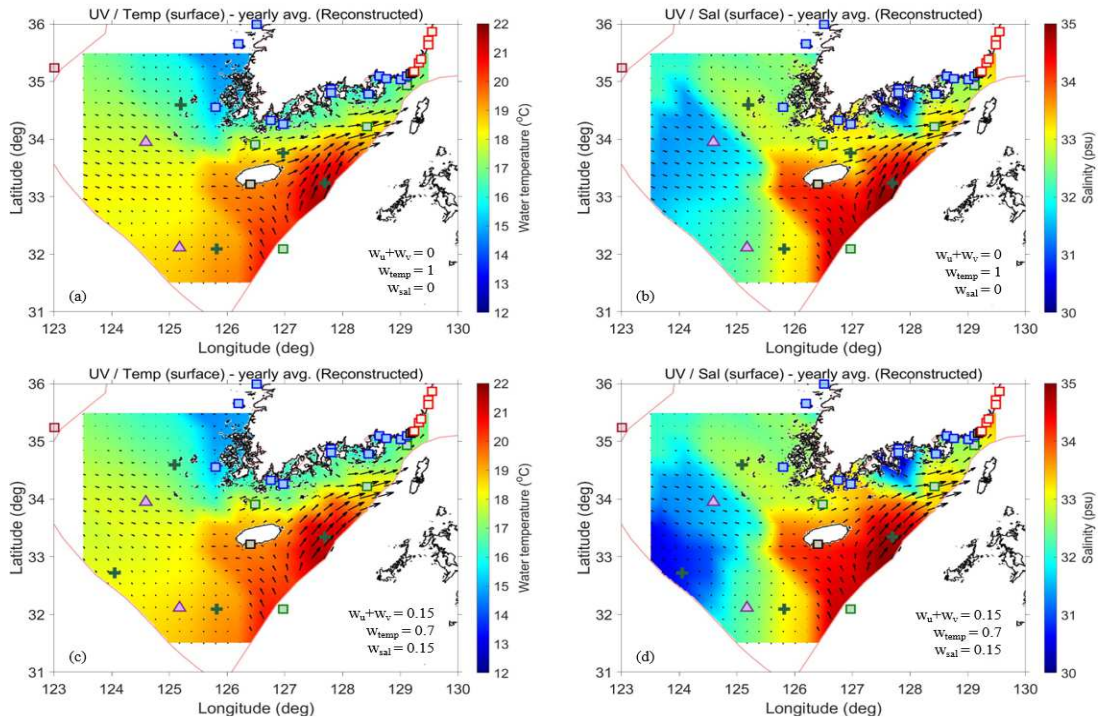


그림 31. 수온이 우세한 경우( $w_{temp} > w_u, w_v, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 4개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

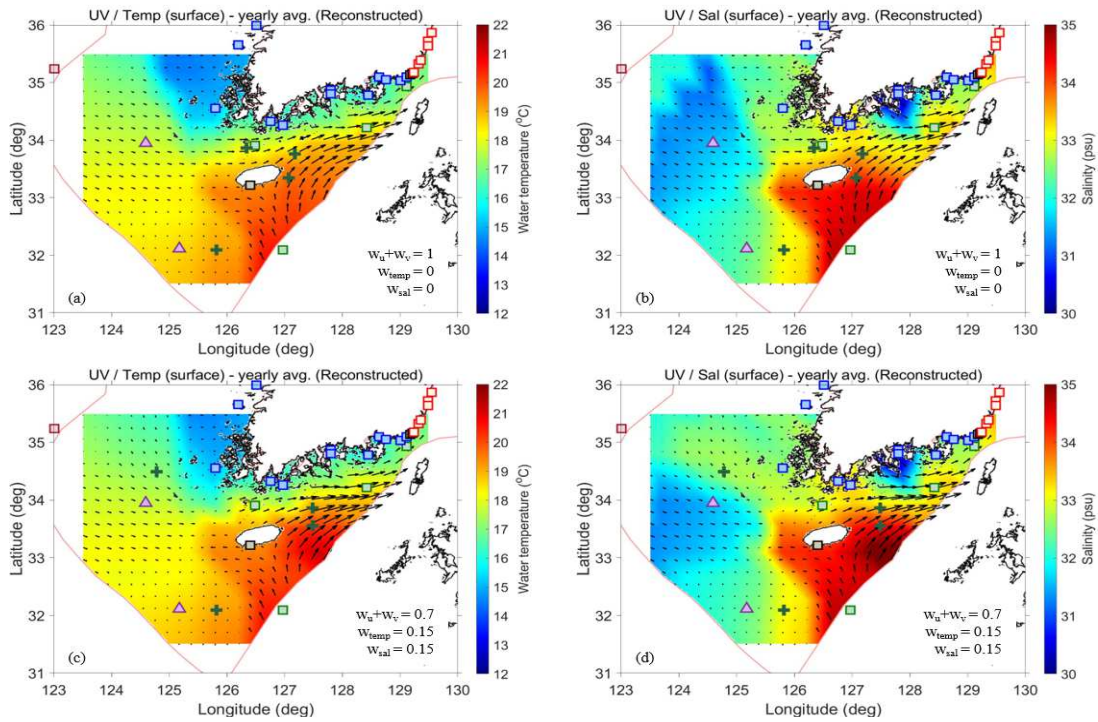


그림 32. 유속(uv-current)이 우세한 경우( $w_{uv} > w_{temp}, w_{sal}$ ) 설계 정점의 개수 4개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

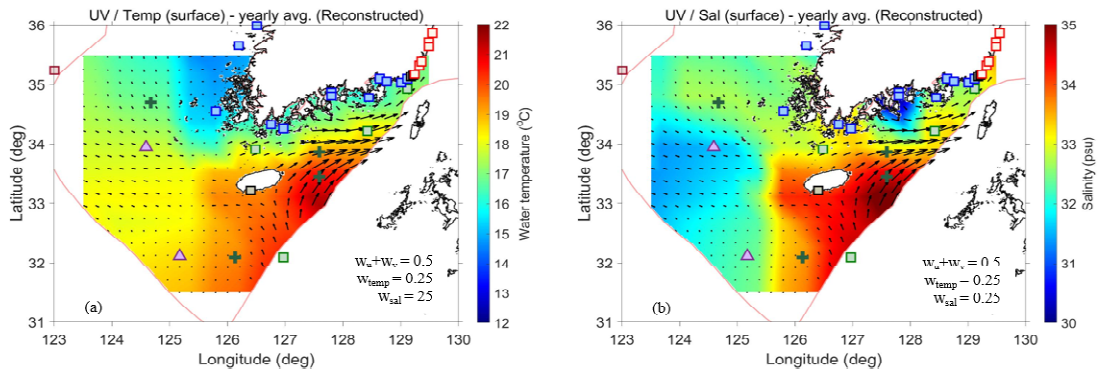


그림 33. 4개의 설계 관측 항목이 동일한 가중치를 가진 경우 설계 정점의 개수 4개로부터 도출된 최적 관측망을 이용하여 재구성한 유속(uv-current)과 수온, 염분의 공간분포

- 그림 18-33의 파레토 최적해의 공간분포에 대한 상관계수와 RMSD는 표 6-13에 정리하였음.
- 여기서 설계 정점의 개수 0은 기존관측망을 의미함.



- 관측 정점의 개수가 증가할수록 동서방향 유속(u-current), 남북방향 유속(v-current), 수온, 염분의 상관계수는 증가하고 RMSD는 감소함을 확인할 수 있음. 이는, 기존 관측망에 관측점이 추가될 경우 설계된 관측망이 해역의 지역적 특성을 효과적으로 재현해 내고 있음을 의미함.
- 한편, 염분 우세인 경우의 동서방향 유속(u-current)은 정점 추가에 따른 상관계수와 RMSD가 일관성 있게 증가/감소하는 경향을 보이진 않음. 특히, 염분만을 고려한 관측망에서는 오히려 성능이 저하되는 양상을 보임. 이는, 상대적으로 유속의 공간분포를 재현하기 위한 유속스칼라의 값이 황동중국해역에서 낮기 때문임. 다시말해, 조석에 의한 영향이 매우 우세한 해역에서 정점이 선정된 경우, 다른 설계 관측 항목들의 가중치를 신중히 조정하여 관측망을 설계할 필요가 있음을 시사함.

표 6. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 동서방향 유속(u-current)의 공간 분포 상관계수

| $n_b$            | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                  | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| COR <sub>U</sub> | 0            |                 |              | 0.74            |              |                 |                 |
|                  | 1            | 0.73            | 0.74         | 0.69            | 0.72         | 0.77            | 0.74            |
|                  | 2            | 0.65            | 0.73         | 0.69            | 0.72         | 0.78            | 0.80            |
|                  | 3            | 0.66            | 0.74         | 0.70            | 0.74         | 0.82            | 0.81            |
|                  | 4            | 0.65            | 0.72         | 0.76            | 0.74         | 0.84            | 0.81            |

표 7. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 남북방향 유속(v-current)의 공간 분포 상관계수

| $n_b$            | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                  | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| COR <sub>V</sub> | 0            |                 |              | 0.64            |              |                 |                 |
|                  | 1            | 0.62            | 0.63         | 0.74            | 0.74         | 0.72            | 0.73            |
|                  | 2            | 0.56            | 0.72         | 0.73            | 0.72         | 0.77            | 0.74            |
|                  | 3            | 0.58            | 0.71         | 0.77            | 0.77         | 0.77            | 0.78            |
|                  | 4            | 0.73            | 0.71         | 0.77            | 0.77         | 0.78            | 0.80            |

표 8. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 수온(water temperature)의 공간 분포 상관계수

| $n_b$               | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|---------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                     | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                     | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| COR <sub>temp</sub> | 0            |                 |              | 0.89            |              |                 |                 |
|                     | 1            | 0.90            | 0.90         | 0.96            | 0.96         | 0.94            | 0.95            |
|                     | 2            | 0.88            | 0.96         | 0.97            | 0.97         | 0.94            | 0.95            |
|                     | 3            | 0.89            | 0.97         | 0.98            | 0.98         | 0.94            | 0.96            |
|                     | 4            | 0.97            | 0.97         | 0.98            | 0.98         | 0.95            | 0.97            |

표 9. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 염분(salinity)의 공간분포 상관계수

| $n_b$              | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|--------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                    | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                    | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| COR <sub>sal</sub> | 0            |                 |              | 0.78            |              |                 |                 |
|                    | 1            | 0.85            | 0.82         | 0.82            | 0.82         | 0.78            | 0.82            |
|                    | 2            | 0.88            | 0.88         | 0.85            | 0.85         | 0.77            | 0.82            |
|                    | 3            | 0.90            | 0.90         | 0.85            | 0.85         | 0.80            | 0.82            |
|                    | 4            | 0.92            | 0.92         | 0.85            | 0.89         | 0.81            | 0.86            |

표 10. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 동서방향 유속(u-current)의 공간분포 RMSD

| $n_b$             | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                   | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                   | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| RMSD <sub>u</sub> | 0            |                 |              | 0.73            |              |                 |                 |
|                   | 1            | 0.73            | 0.72         | 0.79            | 0.75         | 0.68            | 0.71            |
|                   | 2            | 0.84            | 0.74         | 0.79            | 0.75         | 0.67            | 0.64            |
|                   | 3            | 0.83            | 0.72         | 0.77            | 0.73         | 0.60            | 0.62            |
|                   | 4            | 0.84            | 0.75         | 0.69            | 0.72         | 0.57            | 0.61            |

표 11. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 남북방향 유속(v-current)의 공간분포 RMSD

| $n_b$             | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                   | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                   | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| RMSD <sub>v</sub> | 0            |                 |              | 0.85            |              |                 |                 |
|                   | 1            | 0.88            | 0.87         | 0.72            | 0.72         | 0.74            | 0.73            |
|                   | 2            | 0.94            | 0.75         | 0.73            | 0.74         | 0.67            | 0.72            |
|                   | 3            | 0.92            | 0.76         | 0.67            | 0.68         | 0.67            | 0.66            |
|                   | 4            | 0.74            | 0.76         | 0.67            | 0.69         | 0.66            | 0.64            |

표 12. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 수온(water temperature)의 공간분포 RMSD

| $n_b$                | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|----------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                      | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                      | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| RMSD <sub>temp</sub> | 0            |                 |              | 0.47            |              |                 |                 |
|                      | 1            | 0.45            | 0.45         | 0.27            | 0.28         | 0.35            | 0.30            |
|                      | 2            | 0.49            | 0.28         | 0.23            | 0.23         | 0.34            | 0.30            |
|                      | 3            | 0.47            | 0.24         | 0.21            | 0.20         | 0.33            | 0.29            |
|                      | 4            | 0.25            | 0.24         | 0.19            | 0.20         | 0.33            | 0.24            |

표 13. 설계 부이 개수 및 항목별 가중치에 따른 OI 기반 염분(salinity)의 공간분포 RMSD

| $n_b$               | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=0$ | $w_u, w_v=0.15$ | $w_u, w_v=1$ | $w_u, w_v=0.7$  | $w_u, w_v=0.25$ |
|---------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
|                     | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=1$ | $w_{temp}=0.7$  | $w_{temp}=0$ | $w_{temp}=0.15$ | $w_{temp}=0.25$ |
|                     | $w_{sal}=1$  | $w_{sal}=0.7$   | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0$  | $w_{sal}=0.15$  | $w_{sal}=0.25$  |
| RMSD <sub>sal</sub> | 0            |                 |              | 0.65            |              |                 |                 |
|                     | 1            | 0.54            | 0.55         | 0.60            | 0.60         | 0.67            | 0.60            |
|                     | 2            | 0.49            | 0.50         | 0.55            | 0.54         | 0.67            | 0.60            |
|                     | 3            | 0.44            | 0.46         | 0.55            | 0.54         | 0.63            | 0.60            |
|                     | 4            | 0.41            | 0.39         | 0.55            | 0.46         | 0.62            | 0.53            |

## 제 4 장. 연구개발 목표 및 달성도

| 총연구기간 내 연차별 목표 대비 달성율(%) |                                |                             |            |                                       |                                      |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 구분                       | 연차별 달성내용                       |                             |            |                                       | 연차별<br>계획대비<br>연구실적<br>달성율(B)<br>(%) |
|                          | 성과목표                           | 연구내용                        | 가중치<br>(A) | 달성실적                                  |                                      |
| 1년차                      | 1. MOEAs solver 기반의 MOML 모듈 구축 | 1-1. MOEAs 기반 MOO solver 구축 | 0.4        | 설계 관측항목별 목적 함수 구축 및 가중치 기반 단일 목적함수 변환 | 100                                  |
|                          |                                | 1-2. ML 모듈 접합               |            | MOEAs 기반 MOO solver에 ML 모듈 접합         |                                      |
|                          | 2. 최적 관측망 설계 시범 적용             | 2-1. Testbed 선정             | 0.6        | Coastal KOOS 검증 및 분석하여 testbed 해역 선정  | 100                                  |
|                          |                                | 2-2. 입력자료 (수치모델) 구축         |            | 설계 관측항목들에 대한 입력자료 추출 및 DB 구축          |                                      |
|                          |                                | 2-3. MOML 모듈 적용             |            | 접합 모듈 testbed 내 시범 적용                 |                                      |
|                          | 계                              |                             | 1.0        |                                       | 100                                  |

## 제 5 장. 연구개발결과 활용계획

### ■ 연구 결과물의 활용성

#### □ 표준화된 해양 관측망 설계전략 제시

- 우리나라 해양의 고유 특성 변화를 보다 상세하게 이해하기 위한 다목적 최적 관측망 설계 기술 개발로, 향후 원내 혹은 원외 해양 관측망 구축 시 의사 결정에 기술적으로 지원이 가능한 표준화된 가이드라인으로 활용

#### □ 국가R&D 사업 발전 가능성

- 우리나라는 의사 결정 과정에서 제도적으로 정립된 가이드라인 없이 각종 이해 당사자들 간의 협의에 따라 해양 관측망을 구성하고 있어 기 구축된 관측망에 대한 공학적인 근거가 부족. 본 연구과제로부터 도출된 모듈을 통해 공학적 근거 마련 가능
- 연구결과로부터 도출된 모듈을 표준화 및 고도화하여 관측망 설계(안)을 제시하고, 이를 실제 해역에서 운용을 통한 적정성 평가가 이루어질 수 있도록 기술적 현안에 대한 아젠다로 발전 계획

### ■ 연구 결과물의 기술적·경제적·사회적 파급 효과

#### □ 기술적 측면

- 최근 4차 산업혁명으로 각광 받고 있는 기계학습 기술과 미개척 분야 중 하나인 최적 관측망 설계가 접목된 새로운 연구 분야 개척
- 개발되는 세부 기술은 해양 뿐만 아니라, 연안, 육상, 지하수 등 여러 대상 지역에서 표준 관측망 설계 기술로 응용이 가능한 범용성을 확보
- 에너지 효율, 자료동화 향상 등 다양한 분야로 확대 적용이 가능

#### □ 경제·산업적 측면

- 관측망을 구성하는 데 막대한 비용이 요구되는 만큼, 최소한의 비용으로 최대의 효율을 달성할 수 있는 관측망 설계 및 운용 기술력 확보는 향후 우리나라의 경쟁력 확보에 기여할 것으로 기대

□ 사회적 측면

- 국가·사회적 현안 문제를 해결하고 대응 체계를 수립하기 위한 해양 관측망 수립, 구축과 관련된 정책적 의사 결정을 지원하기 위한 과학적 수단으로 활용도가 높을 것으로 기대

## 제 6 장. 참고문헌

해양수산부, 2020. 해양환경측정망 구성·운영계획.

Baehr, J., Hirschi, J., Beismann, J.-O., Marotzke, J., 2004. Monitoring the meridional overturning circulation in the North Atlantic: a model-based array design study. *Journal of Marine Research*, 62, 283-312.

Baehr, J., McInerney, D., Keller, K. and Marotzke, J., 2008. Optimization of an observing system design for the North Atlantic meridional overturning circulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 625-634.

Barth, N. and Wunch, C., 1990. Oceanographic experiment design by simulated annealing. *Journal of Physical Oceanography*, 20, 1249-1263.

Barth, N., 1992. Oceanographic experiment design II: Genetic algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9, 434-443.

Bian, X.L.; Li, X.M.; Qi, P.; Chi, Z.H.; Ye, R.; Lu, S.W.; Cai, Y.H., 2019. Quantitative design and analysis of marine environmental monitoring networks in coastal waters of China. *Marine Pollution Bulletin*, 143, 144-151.

Bretherton, F.P., Davis, R.E. and Fandry, C.B., 1976. A technique of objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep-Sea Research*, 23, 559-582.

Chu, P.C., Lu S. and Chen, Y., 2001. Evaluation of the Princeton Ocean Model using South China Sea Monsoon experiment (SCSMEX) data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 1521-1539.

Fan, H.M.; Gao, B.B.; Xu, R.; Wang, J.F., 2017. Optimization of Shanghai marine environment monitoring sites by integrating spatial correlation and stratified heterogeneity. *Acta Oceanologica Sinica*, 36, 111-121.

Fujii, Y., Remy, E., Zuo, H., Oke, P. R., Halliwell, G. R., Gasparin, F., *et al.* 2019. Observing system evaluation based on Ocean Data Assimilation and Prediction Systems: on-going challenges and future vision for designing and supporting ocean observational networks. *Frontiers in Marine Science*, 6(417), doi:10.3389/fmars.2019.00417.

- Gao, B.-B.; Wang, J.-F.; Fan, H.-M.; Xu, K.; Hu, M.-G.; Chen, Z.-Y., 2015. A stratified optimization method for a multivariate marine environmental monitoring network in the Yangtze River estuary and its adjacent sea. *International Journal of Geographical Information Science*, 29, 1332-1349.
- Hackert, E.C., Miller, R.N. and Busalacchi, A.J., 1998. An optimized design for a moored instrument array in the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 103, 7491-7509.
- Hernandez, F., Le Traon, P.Y. and Barth, N., 1995. Optimizing a drifter cast strategy with a genetic algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12, 330-345.
- Karydis, M. and Kitsiou, D., 2012. Eutrophication and environmental policy in the Mediterranean Sea“ A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 4931-4984.
- Kim, N.H., Hwang, J.H., Cho, J. and Kim, J.S., 2018c. A framework to determine the locations of the environmental monitoring in an estuary of the Yellow Sea. *Environmental Pollution*, 241, 576-585.
- Kim, N.-H. and Hwang, J.H., 2020. Optimal design of water quality monitoring networks in semi-enclosed estuaries. *Sensors*, 20, 1498; doi:10.3390/s20051498.
- King, M.A., Penna, N.T., Clarke, P.J. and King, Ed C., 2005. Validation of ocean tide models around Antarctica using onshore GPS and gravity data. *Journal of Geophysical Research*, 110(B8), 21, doi:10.1029/2004JB003390.
- Le Traon, P.Y. and Hernandez, F., 1992. Mapping the oceanic mesoscale circulation: Validation of satellite altimetry using surface drifters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9, 687-698.
- Rogowski, P., 2009. A technique for optimizing the placement of oceanographic sensors with example case studies for the New York harbor region. ph.D. dissertation, Stevens institute of technology, Hoboken, NJ.
- Turner, M., Walker, J., Oke, P. and Grayson, R., 2005. Assimilation of sea-surface temperature into a hydrodynamic model of Port Phillip Bay,



Australia. *Coasts and Ports Australasian Conference*.

National Coastal Condition Assessment: Site Evaluation Guidelines, 2015. EPA 843-10-004; United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.

다중 목적 기계학습을  
이용한 최적 해양  
관측망 설계 모듈 개발

Development of an optimal design method for an ocean monitoring network based on multi-objective machine learning



- 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.