

# 제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “한국해 4차원 기후평균장 구축 기반 연구”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2020. 02. 28

총괄연구책임자 : 김 용 선

참 여 연 구 원 : 장 찬 주

“ : 김 철 호

“ : 정 희 석

“ : 최 원 근

“ : 방 민 경

## 과제 요약

<b>과제 고유번호</b>	PE99762		총연구기간	2019/06/01 ~ 2019/12/31 (7개월)		
<b>연구사업명</b>	세부사업명	신진 연구자의 연구기반 구축 및 창의적 아이디어 지원				
	세부과제명	한국해 4차원 기후평균장 구축 기반 연구				
<b>연구책임자</b>	김 용 선	참여연구원 수	총 : 6명 내부: 3명 외부: 3명	총 연구비	정부: 5천만원 기업: 계 : 5천만원	
<b>연구목표</b>	한국해 수온과 염분 4차원 기후 평균장 계산을 위한 기반 구축					
<b>연구내용</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 한반도 주변해역의 과거 수온, 염분 관측 자료를 기반한 빅데이터 구축</li> <li>○ 대규모 해수 물성 자료 처리를 위한 품질검증 첨단 추격 기술 시범 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자동 및 Human-in-loop 품질검증 체계도 기술 개발</li> <li>- 국제 기준에 따른 품질검증 개발</li> </ul> </li> <li>○ 기후장 구축을 위한 기술 시범 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 한국해 해역에서 최적화된 객관적 내삽 기술 개발</li> <li>- 밀도역전 처리 방안 제시</li> </ul> </li> </ul>					
<b>연구성과</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 한반도 주변해 해수물성 관측자료 데이터베이스</li> <li>○ 기후평균장 개발을 위한 자료처리 첨단 추격기술 및 소프트웨어</li> <li>○ 수온/염분 시범 기후장</li> </ul>					
<b>종료후 활용계획</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고해상도 4차원 수온/염분 기후장 구축에 활용</li> <li>○ 지역기후모델링의 초기장 및 경계자료로 입력하여 중단기 해양환경 예측에 활용</li> <li>○ 수치 모형 적분 결과 평가의 기준 자료로 활용</li> <li>○ 혼합층, 수중음향, 해수면, 열염순환 등 주요 물리 변수의 장기 변동 연구를 위한 기초 자료로 활용</li> <li>○ 구축한 빅데이터와 기후장 가시화 및 다운로드 서비스 제공으로 연구 성과 확산</li> <li>○ 국제 해양기후관련 보고서(IPCC AR6, UNRP 등) 작성 근거 마련</li> <li>○ 장기 해양 기후/수산 정책 수립을 위한 과학적 근거 자료로 활용</li> </ul>					
<b>키워드</b>	데이터베이스(database)		기후평균장(climatology)		품질검증(quality control)	
	기후변화(climate change)		해수물성(water property)		크리깅(kriging)	
<b>관련과제 국내 전문가 3명이상 제시</b>	소속	이름	대학(박사)	전공	연락처	비고
	국립수산과학원	이준수	규슈대(박사)	해양물리	051-720-2231	EAS-RC 개발 참여
	공주대학교	장유순	서울대(박사)	해양물리	041-850-8292	OA 개발
	극지연구소	박태욱	서울대(박사)	해양물리	032-760-5321	황해순환
	KIOST	김성대	서울대(박사)	해양물리	051-664-3101	해양자료

# 요 약 문

## I. 제 목

한국해 4차원 기후평균장 구축 기반 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

해양관측은 대규모 인력, 조사선, 첨단 장비를 활용하여 얻어진 자본 집약적 연구 결과임에도 불구하고 일회성 자료의 한계로 인하여 현장관측 자료를 활용하여 한국해의 장기 해양변동을 분석하거나 기후 정책 수립을 위한 과학적 근거 자료 생산에는 어려움이 존재함. 따라서, 본 연구에서는 현장관측을 통해 얻어진 해수 물성 자료를 체계적으로 수집하고 처리하여 최종적으로 한국해에서의 4차원 기후평균장 구축을 위한 원천 기술 시범 개발을 목표로 함

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 한국해에서 획득한 과거 현장관측 자료 수집
- 국제 기준에 따른 품질검증 기술 개발
- 기후장 구축을 위한 기술 시범 개발

## IV. 연구개발결과

- 한국해 해수물성 관측자료 데이터베이스
- 기후평균장 개발에 사용된 자료처리 기법, 흐름도 및 소프트웨어
- 4차원(위도, 경도, 수심, 월) 수온/염분 시범 기후장

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 고해상도 4차원 수온/염분 기후장 구축에 활용
- 지역기후모델링의 초기장 및 경계자료로 입력하여 중단기 해양환경 예측에 활용
- 수치 모형 적분 결과 평가의 기준 자료로 활용
- 혼합층, 수중음향, 해수면, 열염순환 등 주요 물리 변수의 장기 변동 연구를 위한 기초 자료로 활용
- 구축한 빅데이터와 기후장 가시화 및 다운로드 서비스 제공으로 연구 성과 확산
- 장기 해양 기후/수산 정책 수립을 위한 과학적 근거 자료로 활용

# SUMMARY and KEYWORD

## I. Title

Framework study on the 4-D climatological atlas of the Korean Seas

## II. Objective

Development of preliminary technologies of the four dimensional climatology for water temperature and salinity around the Korean Peninsular

## III. Contents

- Constructing a database of historical in-situ temperature and salinity profiles
- Development of optimized quality-control method to handle the temperature and salinity data to the Korean Seas
- Development of a kriging interpolation method for the 4-D climatology
- Preliminary development of the 4-D climatology and its performance evaluation

## IV. Results

- Auto and Human-in-Loop quality control system
- Application of a simple kriging interpolation to generate a climatology
- Preliminary monthly climatology with a  $1/4^\circ$  horizontal resolution at the standard depth up to 500-m

## V. Keywords

database, climatology, quality control, climate change, water property, kriging

# 목 차

제 1 장 연구 배경 및 목표 .....	1
(1) 연구개발의 필요성 .....	1
(2) 국내외 연구개발 현황 .....	2
(3) 연구개발 목표 및 내용 .....	10
가. 연구개발의 목표 .....	10
나. 연구 개발 내용 .....	10
다. 연구원의 비전 및 기능, 중기전략계획 등과의 연계성 .....	11
제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	12
(1) 총괄 .....	12
(2) 연구개발 수행 내용 .....	13
가. 문헌 및 기존연구 분석 .....	13
나. 데이터베이스 구축 .....	14
다. 품질검사 기법 개발 .....	15
라. 기후장 계산 기법 개발 .....	16
마. 기후장 시범 구축 및 성능 평가 .....	20
(3) 연구 요약 및 향후연구 방향 .....	24
(4) 연구의 정량 실적 .....	26
제 3장 연구개발결과의 활용계획 .....	28
(1) 연구 결과물의 활용성 .....	28
(2) 연구 기술적, 경제적, 사회적 파급 효과 .....	29
제 4장 참고문헌 .....	30

# C O N T E N T S

Chapter 1. Research background and objective .....	1
(1) The needs of research .....	1
(2) Research background .....	2
(3) Research goal and coverage .....	10
가. Final purpose .....	10
나. Research contents .....	10
다. Outreach .....	11
Chapter 2. Results .....	12
(1) Brief Summary .....	12
(2) Key Results .....	13
가. Previous Studies .....	13
나. Database .....	14
다. Quality Control .....	15
라. Kriging Interpolation Method .....	16
마. Atlas and Its performance test .....	20
(3) Summary and Future Plans .....	24
(4) Quantitative Outputs .....	26
Chapter 3. Research Applicability and Implications .....	28
(1) Applicability .....	28
(2) Implications .....	29
Chapter 4. References .....	30

## 그림 목차

그림 1. OA에서 검정별 정점에서의 기후평균 수온을 계산하기 위해서 사용되는 영 향반경( $4^{\circ} \times 2^{\circ}$ 빨간 점선) 내의 관측 정점. 정점 위에 색은 잠재와도 제한항 을 계산하여 격자값을 계산하기 위해 부여되는 가중치를 의미함(Chang and Shin 2012) .....	5
그림 2. 300 m 수심에서 (a)OA의 연평균 수온 오류(error)와 (b)WOA01q, (c)GDEM3와의 연평균 수온 차이(difference) (d-f)는 염분(Chang and Shin 2012) .....	6
그림 3. WOA13과 EAS-RC 작성하는 핵심 기법인 Barnes 객관적 내삽법의 예 ( <a href="http://damp.coas.oregonstate.edu/matlab_gridding/">http://damp.coas.oregonstate.edu/matlab_gridding/</a> ) .....	7
그림 4. GDEM을 위해 사용한 수직 내삽의 예시(Teague et al. 1990) .....	8
그림 5. GDEMv3에서 수직경도 보정항을 적용하기 전(색)과 후(굵은 선)의 예시: 황해 $126^{\circ}\text{E}$ 라인에서 3월 수온 기후장(Carnes 2009) .....	9
그림 6. (a) 위성에서 관측한 동해의 장기평균 절대 지형류(absolute geostrophic current)와 (b) EAS-RC 기후장을 사용, 500 m 수심을 level of no-motion으로 정의하여 계산한 지형류의 분포. 색은 지형류의 세기를 표 시함 .....	13
그림 7. 동해 105 라인에서 (a)관측된 평균 수온과 (b-f) 다양한 기후장의 수온 단 면(from Chang and Shin 2012) .....	14
그림 8. 연구 영역과 수집한 자료의 1월 수평분포의 예제 수온(왼쪽)과 염분(오른 쪽) .....	15
그림 9. 비방향성 반베리오그램을 계산하기 위한 주요 인자들 .....	19
그림 10. 기후장 계산을 위한 자료 처리 흐름도 .....	20
그림 11. 150m 수심 연평균 수온의 수평 분포: (a)새로운 기후장, (b)NOAA의 WOA01q. 두 기후장의 차이를 (c)에 나타내었음 .....	21
그림 12. 500m 수심 연평균 염분의 수평 분포: (a)새로운 기후장, (b)NOAA의 WOA01q. 두 기후장의 차이를 (c)에 나타내었음 .....	22

그림 13. 동해 2월 혼합층 깊이. 새로운 기후장(왼쪽)과 WOA01q(오른쪽) .....	22
그림 14. 동해 105 라인에서 수온 단면도: (a) 새로운 기후장 (b) WOA01q .....	23
그림 15. 20m 수심에서 황해의 연평균 염분의 수평 분포: (왼쪽)새로운 기후장 (오른쪽)WOA01q .....	24
그림 16. 연구성과 활용 분야 및 목표 .....	29

## 표 목차

표 1. 한국해 수온염분 기후평균 자료의 종류와 특징 .....	4
표 2. World Ocean Atlas의 서로 다른 해상도 기후장을 계산하기 위하여 사용되는 영향반경 .....	6



## 제 1 장 연구 배경 및 목표

### (1) 연구개발의 필요성

- 한국해는 전 세계에서 기후변화에 가장 취약한 해역 중 하나임(IPCC AR5). 지난 수십 년 동안 한국해 해면수온 상승률은 전 세계 해양 평균 상승률의 2배 이상이며, 해수 용존산소 농도도 빠르게 감소하고 동시에 산성도는 증가하였음. 결과적으로 수산 어종별 어획량 및 종 다양성 또한 급격한 변화를 겪고 있음. 최근에는 수온의 연변동성이 강하여 고수온 혹은 냉해 현상이 지속적으로 나타나 양식장 집단 폐사 등 어민의 재산피해가 빈번히 발생함. 기후변화에 따른 사회 경제적 피해는 지구온난화로 향후 더욱 가속화될 것으로 전망됨. 이에 따라 해양기후변화 정보와 대응 정책 마련을 위한 경제적·사회적 요구가 증대되고 있음
- 해양물성의 기후평균값과 극값, 다양한 시간규모에 따른 변동성을 정량적으로 파악할 때, 미래 해양생태계 변동 예측이 가능함. 기후 변화 및 악기상에 대비하고 생태계 기반의 해양 관리(ecosystem-based ocean management) 정책을 수립하여 해양관리와 자원관리형 어업을 위한 체계구축 등을 통해 국민의 삶의 질 향상에 기여할 수 있음
- 2019년 하와이 컨벤션센터에서 열린 국제 해양관측 전문가회의(OceanOBS19)에서 향후 10년 동안 전지구 해양관측에 있어서 중요한 발전 방향을 심해(Deep Water)로 제시하고 있음. 이는 심층 해양의 물성 변화 및 순환 변화가 전지구 기후변화에 막대한 영향을 미치기 때문임
- 그러나, 한국 주변해의 기후변화 연구는 대기 강제력 변화에 따른 해면수온과 해수면과 같이 해양의 표층 변수에 국한되어 있으며, 해수 심층 변동 연구는 시작 단계에 있음
- 기후변화에 따른 사회적 요구에 부응하고 국제 수준의 해양 기후 연구를 수행하기 위해서 과거 현장관측 자료를 체계적으로 관리하고 자료에 대한 이해를 바탕으로 수온, 염분, 순환의 평균장과 변화 양상에 대한 기초 자료가 필요함
- 평균 기후장은 수치 모형의 초기 조건으로 입력되어, 모형의 spinup 시간을 단축시켜 줌. 또한, 대부분의 모형에서 계산결과가 초기장으로부터 극단적으로 벗어나지 못하도록 restoring 시켜주는 데에도 사용. 결과적으로 모형성능은 초기 조건으로 주어지는 기후장의 성능에 의해 결정되는 경우가 많음
- 한반도 주변해를 연구하는 모형의 경우에도 초기장으로 입력하는 기후장을 전지구 기후장을 통해서 얻는 경우가 대부분임. 전지구 기후장은 한국해와 같은 지역해의 고유한 물리적 특성 (물성과 해류, 소용돌이, 담수유입, 극전선 등)을 잘 모사하지 못하는 경우가 많음
- 결과적으로, 한국해에 특화된 물성 기후장을 구축하는 것이 필수적임

## (2) 국내외 연구개발 현황

### - 과거 현장관측 자료 데이터베이스 구축

- 해양관측은 대규모 인력, 조사선, 첨단 장비를 활용하여 얻어진 자본 집약적 연구 결과임. 하지만 많은 자본을 투입하여 얻어진 개별 관측 자료는 시공간적으로 일회성 자료로 해수의 특성 및 변화, 해류 변동을 종합적으로 이해하고 분석하는데 한계가 있어 현장 관측 자료의 활용이 부족한 형편임. 결과적으로, 일회성 현장관측 자료를 활용하여 장기 해양 변화를 연구하거나 기후 정책 수립을 위한 과학적 근거 자료 생산에 어려움
- 현장관측 자료 활용 측면에서의 한계를 극복하기 위해서 전 세계적으로 다양한 해양관측 국제기구(GOOS, SOOS, jcommops 등) 및 기관이 조직됨. 이 조직은 개별 연구과제를 통해 얻은 다양한 자료를 일괄적으로 수집하여 재배포하는 작업을 수행하고 있음. 현재 우리나라는 현장관측 자료에 대한 배타적 소유권의 문제로 인하여 체계적으로 수집하여 종합적으로 운영하는 해양 연구 기관이 없는 형편임
- 해양관측 자료의 빅데이터 구축에 있어서 국제적으로 가장 선도적인 연구 그룹은 NOAA 산하의 국제기후자료센터(NCDC)의 Levitus 연구진임. Levitus 연구진은 여러 나라에서 관측하여 자발적으로 제공한 다양한 수층 관측 자료를 통합하여 세계 해양 데이터베이스(WOD: World Ocean Database)를 구축하였으며(Locarnini et al. 2013; Zweng et al. 2013; Johnson and Boyer 2015), 약 5년 주기로 관측 자료를 업데이트 하여 인터넷을 통해 과학자와 일반인에게 제공하고 있음
- WOD는 전 세계의 개별 연구책임자들이 자발적으로 제공하는 현장관측 자료를 총괄하고 있음. 하지만 자발적으로 제공된 자료이기에 다양한 관측 및 기계 오류가 포함될 수 있음. 이에 더하여 한반도 주변해역(이후 한국해)에서 관측된 다양한 현장관측 자료가 대거 포함되어 있지 않음. 해당 자료에는 국립해양조사원에서 정기적으로 관측한 최근 정선해양관측 자료, 동해에서 관측된 ARGO, 한국해양과학기술원에서 비정기적으로 관측한 현장관측 자료 등이 있음.
- 한국해에서 얻어진 개별 현장관측 자료에 대한 활용을 극대화하기 위해서는 개별 자료를 체계적으로 수집하여 데이터베이스를 구축함이 선행되어야 함. 데이터베이스를 활용할 경우, 한국해 해수 물성 및 해수 유동에 관한 평균장을 이해할 수 있으며, 또한 기후변동의 정량적 평가 및 기작 연구를 위한 핵심 자료로 활용할 수 있음

### - 품질검증 시스템

- 다양한 기관과 관측 장비를 통해서 얻어진 한반도 주변해역의 현장 관측 자료는 대략 백오

십만 프로파일이 존재하는 것으로 파악됨(Johnson and Boyer 2015). 이러한 대규모 관측 자료를 체계적으로 처리하기 위해서 **고도화된 품질검증 시스템 기법을 개발**이 선행되어야 함

- WOD를 구축하고 있는 NOAA의 국제기후자료센터의 경우, 자체적으로 국제적인 수준의 품질검증 시스템을 개발하여 자료를 처리하고 있음(Locarnini et al. 2013; Zweng et al. 2013). 그러나 이를 처리하기 위한 소프트웨어 등 원천 기술은 일반에 공개하지 않음
- 품질검증을 위한 흐름도(flowchart) 구축 및 소프트웨어 개발을 통해 대규모 관측 자료를 통합적으로 처리할 수 있는 국제적 수준의 기술 개발 필요

#### - 기후평균장 구축

- 한국해에서 사용할 수 있는 기후평균장에는 표 1에서 정리하였듯이 NOAA의 기후평균장인 WOA13(World Ocean Atlas 2013; Locarnini et al. 2013)과 EAS-RC(East Asian Seas Regional Climatology; Johnson and Boyer 2015), 미해군의 GDEMv3(Generalized Digital Environmental Model version 3; Carnes 2009), 호카이도대학의 Minobe 교수 연구진에서 개발한 동해 기후장이 존재함(Minobe et al. 2004)
- 구축된 기후장 자료는 혼합층 수심, 열수지, 해수면고도, 수중음향 환경, 지형류의 계절 변동 및 장기 변동성 연구와 같은 응용 연구(e.g., Chu et al. 1997; 2001a; 2001b)를 위한 기본 자료로 활용될 수 있으며, 지역해 해수순환 및 기후접합 모형의 경계조건 및 초기 조건으로 사용할 때 모형의 예보 성능 향상이 가능함(정 등 2018)
- 기존에 구축된 기후평균장의 경우 과도한 평탄화로 인하여 해수물성 및 수직 경사, 해류를 비교적 부정확하게 구현하고 있음. 기존 연구에서 사용한 관측자료를 포함 가능한 많은 고유 관측 자료를 포함하여 기후평균장을 구축함이 필요

표 1. 한국해 수온염분 기후평균 자료의 종류와 특징

기후자료	기관	제공년도	원자료	수평 해상도	수심	특징
WOA13 (전지구)	NOAA	2013년	WOD13 WOD01q (1776-2012)	1° 1/4°	0-5500m 표준수심	• Barnes 객관적 내삽법
EAS-RC (한국해)	NOAA	2018년	WOD13 (1804-2012)	1/10°	0-1500m 표준수심	• Barnes 객관적 내삽법
GDEMv3 (전지구)	미해군	2012년	MOODS (1930-1997)	1/4°	0-6600m 78 층	• 최소곡률 모수기법을 연직프로파일에 적용 • 수평적으로 noise 존재
OA (동해남부)	공주대	2012년	WOD09 (1930-2008) 국립수산과학원 정선해양관측자료	1/10°	10-1500m 표준수심	• 이단계 맵핑 • 잠재와도 제한항 고려
Minobe (동해)	호카이 도대	2004년	WOD98	1/2°	0, 50, 100, 200, 300, 400m 수심	• 염분 없음 • OI technique

① 공주대학교 OA

- 공주대학교 연구진은 WOD09를 기초하여 국립수산과학원의 정선해양관측자료를 활용해 동해 남서부에서 1/10°의 해상도를 가지는 Objectively Analyzed 수온 염분 기후자료 (OA)를 구축하였음(표 1; Chang and Shin 2012)
- 동한난류, 중규모 소용돌이, 동해 중층수와 같은 해양 물리적 특성을 구현하기 위하여 두 단계로 이뤄진 최적 내삽 기술(two-step optimal interpolation technique)을 적용함. 수심에 따른 지형류 효과를 수온과 염분장에 반영할 수 있도록 잠재와도 제한항(PV constraint term)을 계산하여 영향반경 내 자료에 가중치를 줌
- 공주대학교는 경도 4°, 위도 2°의 영향반경을 사용하여 비교적 넓은 해역에 존재하는 자료 바탕으로 특정 격자에서의 기후치를 계산하였음(그림1). 이러한 넓은 영향반경은 아북 극전선과 같은 미세구조를 잘 표현하지 못하는 단점을 보일 수 있으며, 경도(longitude)에 따라 긴 타원형을 보이는 영향반경을 사용함으로써 한국해에 우세하게 나타나는 자오방향(meridional) 해류, 예를 들면 동안난류, 북한한류, 일본연안류 등을 잘 모사하지 못하는 것으로 판단됨

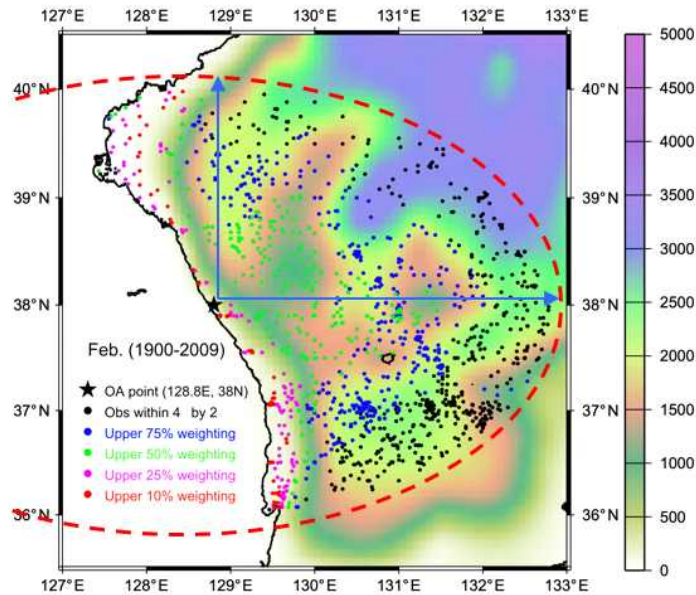


그림 1. OA에서 검정별 정점에서의 기후평균 수온을 계산하기 위해서 사용되는 영향반경(4×2 deg; 빨간 점선) 내의 관측 정점. 정점 위에 색은 수심에 따른 잠재와도(potential vorticity)를 계산하여 기후치를 계산하기 위해 부여되는 가중치를 의미함(Chang and Shin 2012)

- 공주대학교 기후자료는 기존의 기후자료인 WOA01q, GDEMv3, WOA05, WOA09와 비교하여 기후장의 성능을 분석함. Chang and Shin(2012)은 이 기후평균장이 기존의 기후자료와 비교하여 수심이 얇은 연안해역에서 수온/염분 전선을 잘 재현한다고 보고하고 있음
- OA의 수온과 염분 오류가 300m 수심에서 수평 쌍극자 형태(zonal dipole pattern)의 특징을 보임(그림2a, d). 수온의 경우, 0.12℃ 이상의 높은 수온 오류가 보이는 동편 해역에서 WOA01q GDEMv3와 비교하여 공통적으로 큰 음의 차이(cold bias)를 보임. 염분의 경우 0.007 이상의 큰 오차가 동해연안을 따라 발생하는 것을 확인할 수 있음
- 이 기후평균장은 해역이 동해 남서해역으로 국한되어 있기 때문에 향후 지역기후모형의 초기장 및 경계자료로 활용하기에 어려우며, 한국해 전역의 장기 변동성을 연구하기에는 한계가 있음
- 또한, 동해 중부에서 해양 표층은 수온을 높게 중층은 낮게 모사하는 경향이 있어서 결과적으로 해수 성층이 관측에 비하여 강한 것으로 보임

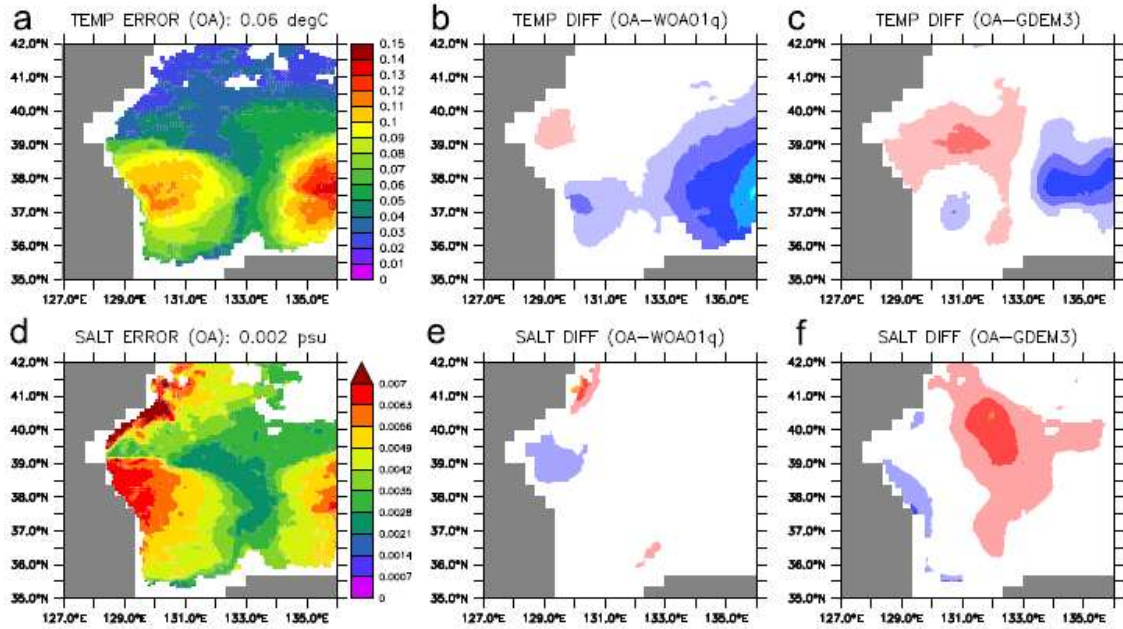


그림 2. 300 m 수심에서 (a)OA의 연평균 수온 오류와 (b)WOA01q, (c)GDEMv3와의 연평균 수온 차이 (d-f)는 염분(Chang and Shin 2012)

## ② NOAA의 EAS-RC

- NOAA는 WOD13을 사용하여 동아시아 해역 수온 및 염분 기후자료인 EAS-RC를 구축함. 이는 기본적으로 WOA13과 자료 및 처리 방법에서 동일하나 수평해상도가 1/10°임
- 높은 해상도로 인하여 수괴, 전선, 강으로부터의 담수 유입과 같은 중규모 해수 물성의 특징을 잘 모사하고 있다고 알려져 있음(Johnson and de Boyer 2015)
- WOA13과 EAS-RC는 기본적으로 기후평균장을 구성하기 위해 표준 수심에서 공간적인 수온 염분 자료에 Barnes 객관적 내삽기법(objectively interpolation)을 사용하였음(그림 3). 이 내삽법을 계산하기 위한 영향반경을 비교적 크게 적용하고 있으며(표 2), 3번에 걸친 반복 계산으로 이상신호가 없는 대신 물리적 세부구조(mesoscale features)가 평탄화(smoothing) 되는 경향이 있음(Chang and Shin 2012)
- Barnes OI의 기본 식은 아래와 같음.  $G_{i,j}$ 는 예상치(Guessed Value),  $F_{i,j}$ 는 최초예상치(First Guess Field),  $C_{i,j}$ 는 보정항임

$$G_{i,j} = F_{i,j} + C_{i,j} \quad \text{식 (1)}$$

- $C_{i,j}$ 는 보정항은 관측치인  $Q_s$ 와 가중치  $W_s$ 를 이용하여 아래와 같이 쓸 수 있음

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{s=1}^n W_s Q_s}{\sum_{s=1}^n W_s}, \text{ here } W_s = \exp\left(-4\frac{r^2}{R^2}\right) \quad \text{식 (2)}$$

- $W_s$ 는 자료의 정규분포를 가정하여 거리에 따라서 지수함수적으로 감수하는 형태로 쓸 수 있음  $r$ 은 기후치를 계산하려는 정점과 관측점 사이의 거리를 의미하며,  $R$ 은 영향반경임 (표 2)

표 2. World Ocean Atlas의 서로 다른 해상도 기후장을 계산하기 위하여 사용되는 영향반경

Pass Number	1° Radius of Influence (km)	1/4° Radius of Influence (km)	1/10° Radius of Influence (km)
1	892	321	211
2	669	267	155
3	446	214	111

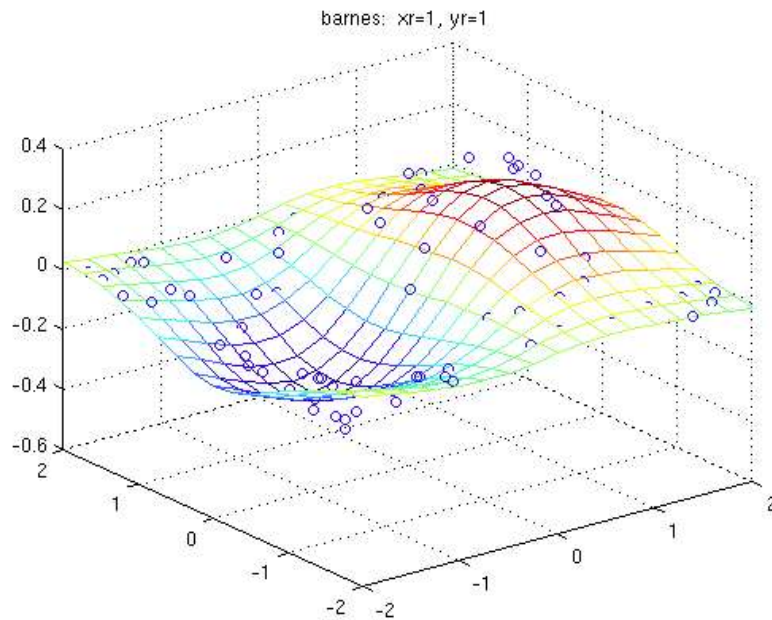


그림 3. WOA13과 EAS-RC 작성하는 핵심 기법인 Barnes 객관적 내삽법의 간단한 적용 예

- 해당 내삽법은 대양과 같은 외해에 최적화된, 비교적 넓은 영향반경을 사용함. 이 영향 반경은 한국해와 같은 지역해에서의 복잡한 해류 및 수온 염분 전선을 구현하는데 한계가 있다고 알려짐(Teague et al. 1990; Chang and Shin 2012; 2014)

- Barnes 내삽기법을 적용하기 위해서는 최초예상기후장이 필수적임. 이 최초예상 수평분포는 성긴 격자에서 연평균 기후평균값을 사용하고 있음. 결과적으로, 자료가 부족한 해역의 경우에는 최종 기후장은 최초예상기후장에 종속되는 경향이 있음
- 수직적으로 밀도역전 보정 이외의 추가 보정을 하고 있지 않아서, 수직적으로 굴곡이 존재하기도 함
- 또한, 황해와 같이 조수 간만의 차가 커서 관측 때마다 수심이 변경되는 해역에서 해저지형 주변에서 왜곡이 발생하는 문제를 가지고 있다고 알려짐(Carnes 2009)

### ③ 미해군의 GDEMv3

- 미해군은 군작전 수행을 위하여 약 10년의 개발 과정의 결과로 1984년에 1° 간격의 전지구 기후 평균장인 GDEMv1을 공개하였음(Teague et al. 1990). 최신 버전은 2012년에 공개한 GDEMv3로 수평해상도는 1/4°임(Carnes 2009)
- GDEMv3는 1995년에 구축된 수온, 염분 데이터베이스인 MOODS에서 추출한 수온 및 염분 프로파일을 이용하여 관측치에 가장 적합한 수직 구조를 모사하여 기후치를 계산함(그림 4). 따라서 각 격자내에 프로파일의 수가 적으면 내삽한 수직 구조에 대한 신뢰도가 떨어질 수 있음(Teague et al. 1990; Carnes 2009)
- 미해군사관학교의 Chu et al (2001a, 2001b)는 GDEMv1 수온, 염분 기후 평균장에 P-vector 기법을 적용하여 동해에서 절대 지형류(absolute geostrophic current)를 계산하였음. 이를 이용해 동해 열염분 구조와 계절에 따른 순환 패턴을 분석하고 해협에서의 지형류에 의한 수송량 변동성을 제시하였음

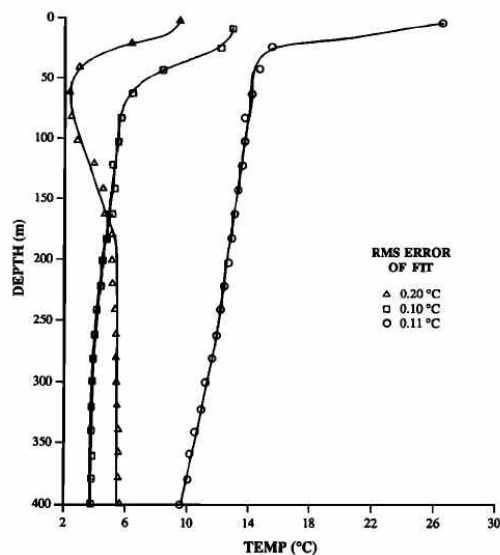


그림 4. GDEM을 위해 사용한 수직 내삽의 예시 (Teague et al. 1990)



- GDEMv3는 각 격자에서 수온과 염분의 수직구조를 모수화하여 기후평균장을 계산함. 즉, 수온과 염분이 연직방향으로 최소경사(minimum gradient)을 얻도록 최적화된 프로파일을 모수화함으로써 각 격자에서 기후평균 수직 구조를 계산함. 대규모 해저지형에서 발생하는 왜곡을 처리하기 위하여 수직경도 보정항을 계산함 (그림 5)
- 위의 방법은 격자내 수층 관측 자료가 많을 경우 좋은 성능을 보이지만 중국연안이나 동해 북부해역과 같이 단위 격자내 수층 관측 자료가 부족하거나, 평균에서 벗어난 이상치 자료가 존재하는 경우 기후 평균 수온 및 염분의 연직구조를 모사함에 있어서 문제점을 보이는 경우가 있음(Carnes 2009; Chang and Shin 2012). 결과적으로, 수평적으로 불균질한 기후장을 생성할 수 있음 (Teague et al. 1990)

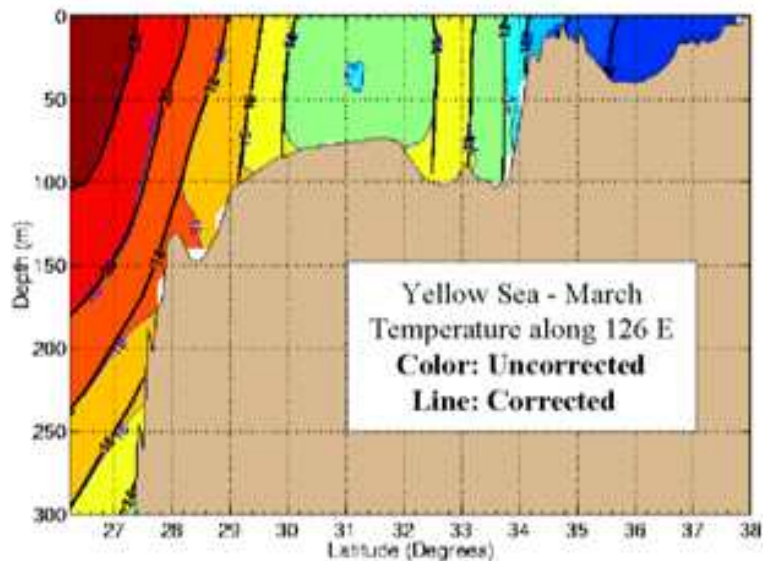


그림 5. GDEMv3에서 수직경도 보정항을 적용하기 전(색)과 후(굵은 선)의 예시: 황해 126° E라인에서 3월 수온 기후장(Carnes 2009)

#### ④ Minobe 기후장

- WOD98을 바탕으로 1/2° 수평해상도를 가지는 기후장을 공주대학교와 동일한 객관적 내삽법(Objective Interpolation)을 사용하여 표층부터 수심 400 m까지 100 m 간격으로 계산하였음
- 염분 기후장은 계산하지 않았음
- Complex EOF 분석을 통해 동해의 장기 변동성 연구를 수행하였음

### (3) 연구개발 목표 및 내용

#### 가. 연구개발의 목표

구분	내용
최종목표	한국해 수온과 염분 4차원 기후평균장 시범 구축 및 기술 개발
최종목표 설정근거	장기 해수 물성 변동성 연구를 위한 기본 자료 구축 현장관측 자료 품질검증 기법과 기후평균장 계산을 위한 추적 기술 확보 필요
세부목표	한국해 해수물성 프로파일 데이터베이스 구축 품질검증 흐름도(flowchart) 및 자료 처리 소프트웨어 개발 한국해에 최적화된 객관적 내삽기법 개발 기후평균장 수층 보정 기술 개발

#### 나. 연구 개발 내용

##### ① 한국해 수온/염분 데이터베이스 구축

- 기후장 관련 주요 논문 정리를 통한 기존 연구논문의 제한점 파악
- 가용 현장관측 자료 수집 (WOD01, ARGO, KIOST, JODC, 국립수산과학원 정선해양관측자료, 서울대학교 CREAMS 자료)
- 자료 중복성 및 자료 오류 검사

##### ② 품질검증체계 구축

- 원자료 수준과 표준수심에서의 품질검증체계 흐름도(flow chart) 개발
- 대규모 자료처리를 위한 자동 품질검증 소프트웨어 개발 및 지식재산권 등록
- Human-in-Loop 품질검증 도입

##### ③ 4차원 기후평균장 계산

- 한국해에 최적화된 객관적 내삽기법 프로그래밍 개발
- 수심을 고려한 와도 제한항 계산을 통한 평균장 보정
- 자료가 부족한 해역에서의 수층 프로파일 수정 기법 제시

## 다. 연구원의 비전 및 기능, 중기전략계획 등과의 연계성

### ① 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성

- 전략목표 중 ‘전략목표 1. 기후변화 예측 및 해양환경변화 대응’에 해당함
  - 성과목표 1-1 해양기후변화 감시와 예측
  - 성과목표 1-2 해양환경 감시 및 관리기술 개발

### ② 국가적 아젠다와의 연계성

- 정부 140대 국정과제 중 ‘기후변화 대응’ 분야에 해당함
  - 신기후체제에 대한 건실한 이행체계 구축
  - 기후변화에 대응한 환경영향 평가체계 구축
- 제3차 과학기술기본계획 중 ‘기후변화 대응력 강화’ 분야에 해당함
  - 기후변화 감시·예측·적응기술 개발
- 제1차 해양수산과학기술 육성 기본계획 중 ‘과제 2-2 국제 사회에 기여하는 해양수산과학기술 육성’ 분야에 해당
  - 기후변화에 따른 해양환경 및 생태계 변화 조사 평가를 위한 관련 기술 확보

## 제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

### (1) 총괄

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B)
	성과목표	연구내용	가중 치 (A)	달성실적	
20 19 년	1.데이터베이스 구축	1-1. 문헌 및 기존연구 분석	0.3	공주대 기후장, NOAA의 EAS-RC 구축 기법 파악 및 수집	100%
		1-2. 관측 자료 DB 구축		WODB, NSO, CREAMS, JODC, ARGO 자료 수집 및 중복성, 오류 검토	
	2.품질검사 체계 개발	2-1. NODC에서 제시하는 원자료 품질검증 체계 파악	0.4	NODC 자동 품질검증 체계 파악 및 프로그래밍	100%
		2-2. 품질검증 소프트웨어 작성		품질검사 SW 등록	
		2-3. 품질검도 흐름도 (flow chart) 구축		품질검사 및 내삽, 필터링 및 수층보정을 포함한 Flowchart 제시함	
	3. 기후평균장 계산을 위한 기술 개발	3-1 내삽기법 Programing	0.4	크리깅 기법 도입	100%
		3-2 시범기후장 구축		1/4° 시범기후장 구축 및 성능 분석	
		3-3 수층보정기술 개발		Baker and Mcdougall (2017) 수층보정 제시	
	계			1.0	100%

## (2) 연구개발 수행 내용

### 가. 문헌 및 기존연구 분석

- 한반도 주변해역에는 NOAA, 미해군, 공주대, 호카이도대에서 작성한 다양한 기후평균 자료가 존재함(표1)
- NOAA의 기후평균장인 EAS-RC(East-Asian Seas Regional Climatology, Johnson and de Boyer et al. 2015)
  - 기후평균장을 구성하기 위해 표준 수심에서 공간적인 수온 염분 자료에 Barnes 객관적 내삽기법을 사용. EAS-RC는 WOD13을 기반하여 해상도가 1/10°로 가장 고해상도 자료임

### • EAS-RC의 문제점

#### ▷ 동해 지형류 분포가 비현실적 (그림 6)

- 동해 중부에 비정상적인 강한 수평 방향의 흐름이 1° 위도 간격으로 존재함
- 동해의 대표적인 남북방향 해류인 동해난류와 북한한류가 나타나지 않음
- 동해 북부의 반시계 방향의 대규모 순환이 약함
- 이러한 수평 순환 공간분포의 문제점은 수온 기후장의 문제로 사료됨

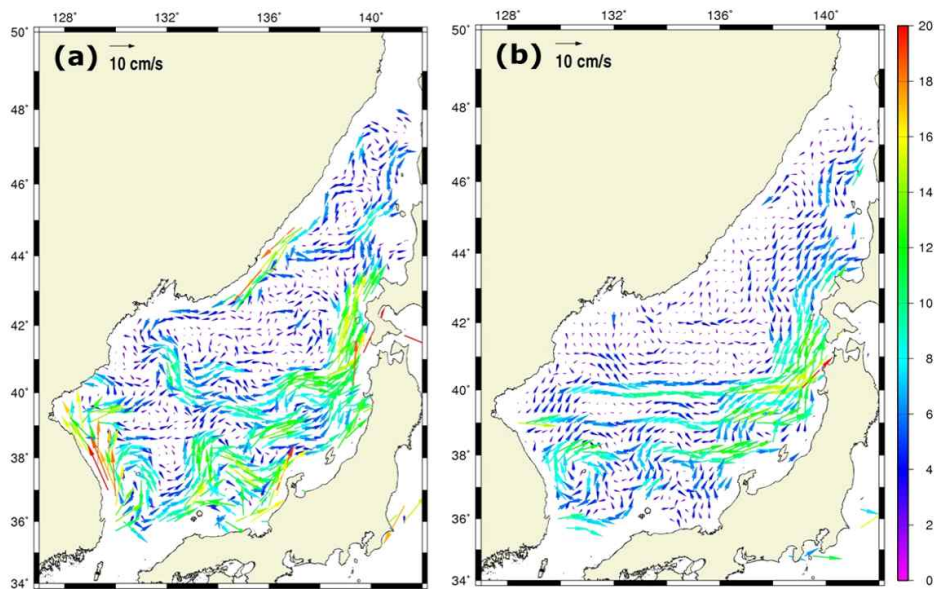


그림 6. (a) 위성에서 관측한 동해의 장기평균 절대 지형류(absolute geostrophic current)와 (b) EAS-RC 기후장의 수온과 염분을 사용하여 500-m 수심을 level of no-motion으로 정의하여 계산한 지형류의 분포. 색은 지형류의 세기를 표시함

▷ 수심이 급격히 변하는 해역의 경우, 자료의 비균질성 때문에 외양의 물성이 비정상적으로 반영되어 통계적인 오차 발생 (Chang and Shin, 2014)

- 얕은 수심 해역의 해저 바닥에서 수온 및 염분 역전 발생

- 이 경우, 밀도 역전 발생가능성으로 인하여 침강에 따른 해수 생성 등이 수치모델에서 모의될 수 있음

▷ 수평적으로 기후장을 계산하기 때문에, 자료의 개수가 부족한 곳에서 수온 및 염분 수직 구조가 불안정할 수 있음 (Carnes, 2009)

▷ 3차례에 걸쳐 반복적으로 필터링을 수행하면서 물리현상의 세부구조가 평탄화되는 경향을 보임

• 공주대학교 OA 기후장

- WOD09와 NSO를 활용하여 동해 남서부에서 1/10° 해상도를 가지는 Objectively Analyzed (OA) 기후장 생성 (Chang and Shin 2012)

- 이단계 맵핑 기술을 적용하였으며, 수심에 따른 지형류 효과를 수온과 염분장에 반영할 수 있도록 잠재외도 제한항을 계산하여 기후장을 보정함

- 기존 기후장인 WOA01q, GDEMv3, WOA05, WOA09와 비교하여 성능을 분석

- 동해 정선관측 105 Line에서 외해 방향의 수온 경사는 잘 표현하고 있으나 표층 수온은 관측보다 높고, 저층 수온은 관측보다 낮아 관측에 비교하여 성층 효과가 강하게 나타남 (그림 7)

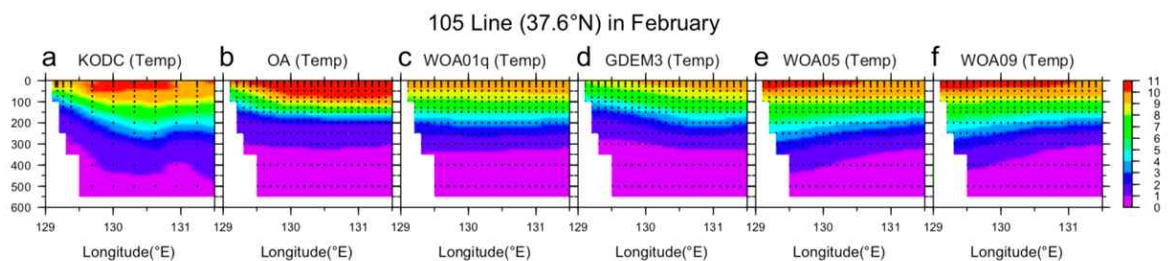


그림 7. 동해 105 라인에서 (a)관측된 평균 수온과 (b-f) 다양한 기후장의 수온 단면 (from Chang and Shin 2012)

나. 데이터 베이스 구축

• 자료 수집 도메인을 경도 110°~150°E, 위도 15°~ 55°N (그림 8)으로 선정하

였음

- 총 과거 수직 프로파일: 1,166,748 (WOD01: 1,156,298, ONG: 323, CREAMS: 614, KIOST: 916, NFRDI: 9,211)
- JODC 자료의 경우 WOD01에 중복되어 포함되어 있음
- ARGO 자료의 경우 계속적인 염분 및 수온 drift error가 존재하여 본 계산에서는 사용하지 않았음
- KODC의 경우, 1996년 까지의 자료는 WOD01에 이미 포함되어 있음
- 서해 중국 연안 및 보해(Bohai Sea)에서 자료가 부족. 향후 중국 연구진과 교류를 통해 자료 확보 필요

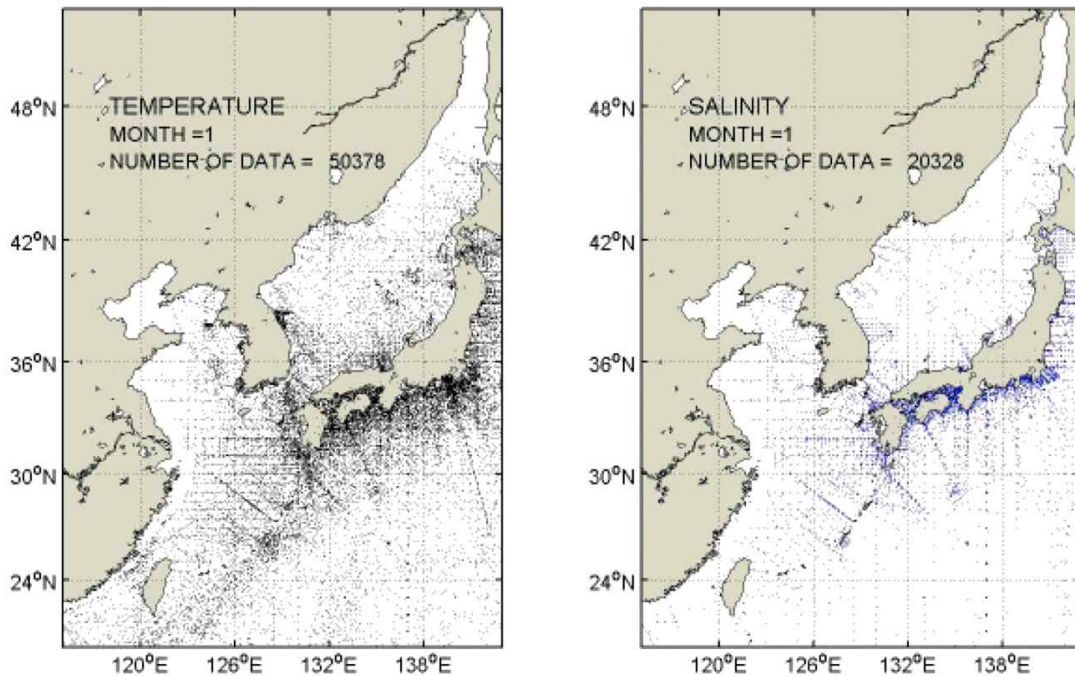


그림 8. 연구 영역과 수집한 자료의 1월 수평분포의 예제 수온(왼쪽)과 염분(오른쪽)

#### 다. 품질검사 기법 개발

##### ① 품질검사 체계 구축

- 자동 품질검사
  - NODC의 제안한 자료 중복(duplication), 수심 역전(inversion), 범위(range), 수직 경사(vertical gradient) 검사를 순차적으로 수행
  - 자료범위의 경우 수심별로 자료범위를 설정하였으며 동해, 서해, 북서태평양에 따라 다

르게 설정하였음

- 수직 경사 검사의 경우 수심 300m 까지는 수온의 경우  $dT/dZ < -1.5^{\circ}\text{C}$  or  $dT/dZ > 0.3^{\circ}\text{C}$ , 염분의 경우는  $dS/dZ < -0.1$  or  $dS/dZ > 0.2$ 이면 오류로 분류하였음
- 300m 이하의 심층의 경우는 위에서 제시한 기준보다 한 order 낮게 그 기준을 잡아 사용하였음
- Reigniger-Ross Scheme을 활용하여 표준수심 자료를 추출함
- 표준수심에서 2단계의 추가 품질검사를 수행함: 밀도 역전 검사, 표준편차 검사 수행
- 표준편차 검사는  $1^{\circ}$  by  $1^{\circ}$  격자에서 시간 window를 따라  $2.5 \sigma$  이상의 이상 값을 오류로 설정. 이 기법 관련하여 한국저작권위원회에 **지적재산권 SW로 등록**하였음 (접수번호: 2019-033532: 해양-대기 관측 시계열자료 표준편차 품질검사 기법)

- Human-in-Loop 품질검사

- 표준 수심에서 관측자료를 contouring 하여 bull's eye check함
- Bull's eye check를 통해서 수온의 경우 2996, 염분은 1631개의 자료를 bad 자료로 분류하였음

#### 라. 기후장 계산 기법 개발

- 본 연구에서는 단순 크리깅(Simple Kriging; SK)을 활용하여 기후장을 시범 구축하였음
- 크리깅은 관심 있는 지점에서 내삽 값을 계산하기 위해 주위의 값들의 가중 선형조합하여 예측함(식 3)

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad \text{식 (3)}$$

- 식 (3)에서  $z^*$ 는 위치가 알려진 지점에서 크리깅을 이용한 예측치가 되며,  $z_i$ 는 관측 위치와 값을 알고 있는 주위의 점,  $\lambda_i$ 는 사용된 주위의 각 자료의 가중치이며  $n$ 은 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총 개수임. 가중치는 거리에 따른 함수이고 예측값과 참값 사이의 오차분산(식 4)이 최소가 되도록 결정함. 이러한 방식으로 예측하는 것을 단순 크리깅이라고 함. 일반 크리깅(Ordinary Kriging)



은 추정값이 편향되지 않아야 한다는 조건을 추가로 사용하여 가중치를 결정함

$$\sigma_{SK}^2 = E[(z_0 - z_0^*)^2] \quad \text{식 (4)}$$

- 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있음

$$\sigma_{SK}^2 = \sigma^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \sigma_{ij}^2 \quad \text{식 (5)}$$

- 식 (5)에서  $\sigma^2 = \text{Var}(z_0)$ ,  $\sigma_{0i}^2 = \text{Cov}(z_0, z_i)$ ,  $\sigma_{ij}^2 = \text{Cov}(z_i, z_j)$ 임
- 오차분산은 가중치의 함수이며, 편미분하여 0이 되는 극값을 구하고, 두 번의 편미분을 수행하여 그 값이 0보다 크면 오차분산을 최소화 하는 가중치를 구하면 됨

$$\frac{\partial \sigma_{SK}^2}{\partial \lambda_l} = 0 - 2\sigma_{0l}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{li}^2 = 0 \quad \text{식 (6)}$$

- 따라서 식 (6)는 아래와 같이 쓸 수 있음:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{li}^2 = \sigma_{0l}^2, \quad l = 1, 2, \dots, n$$

$$i.e., \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}(z_l, z_i) = \text{Cov}(z_0, z_l) \quad \text{식 (7)}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{1n}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nn}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{01} \\ \sigma_{02} \\ \dots \\ \sigma_{0n} \end{pmatrix} \quad \text{식 (8)}$$

- 크리깅에 사용되는 가중치 계산을 위해 일반 Exponential-Bessel 함수를 사용하여 비방향성 자기공분산(autocorvariance;  $Cov$ )를 계산함. 자기공분산은 임의의 거리만큼 떨어져 있는 자료 사이에 얼마나 관계가 있는지를 나타내는 표시하는 정도임. 일반적으로 분리 거리가 가까우면 가까울수록 자기공분산은 크게 나타나며, 일정거리 이상에는 아무런 상관관계를 나타내지 않음 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있음

$$Cov(z_i, z_{i+k}) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} z_i z_{i+k} - \bar{z}^2 \quad \text{식}$$

(9)

- Variogram( $\gamma$ )은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도이며, 일정거리( $d$ ) 떨어진 두 자료들 간의 차이를 제곱한 것의 기대 값( $E$ )으로 공간적 상호관계와 연속성을 파악할 수 있음

$$2\gamma(d) = E[z(x) - z(x+d)]^2 \quad \text{식}$$

(10)

- 공간적으로 서로 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지를 알고자 할 때 사용되며, 거리가 가까울수록 그 값들이 비슷하므로 거리가 멀어질수록 그 값이 크게 나타나는 것이 일반적인 경향임. 결과적으로, 객체 속성간의 공간적인 종속성을 탐색하는데 유용한 방법으로 사용됨(O'Sullivan and Unwin, 2002)

- 식 (10)의 우변을 전개하면,

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= E[(z(x) - z(x+h))^2] && \text{식} \\ &= E[(z(x))^2 + (z(x+h))^2 - 2z(x)z(x+h)] \\ &= E[(z(x))^2] + E[(z(x+h))^2] - 2(Cov[z(x), z(x+h)] + E[z(x)]E[z(x+h)])] \\ &= 2Var(z(x)) - 2Cov[z(x), z(x+h)] \end{aligned}$$

(11)

$$\begin{aligned} \therefore \gamma(h) &= \text{Var}[z(x)] - \text{Cov}[z(x), z(x+h)] && \text{식 (12)} \\ &= \sigma^2 - \text{cov}(h) \end{aligned}$$

- 식 (12)에서,  $\text{Var}$ ,  $\sigma^2$ 는 분산값을 의미함
- 식 (12)을 계산할 때 필요한 주요인자는 다음과 같음(그림 9)
  - 문턱값(sill,  $C_1$ ): 분리거리가 증가하여 일정한 거리가 되면 자료값들은 아무런 관계를 나타내지 않게 되어 반베리오그램이 일정해지는 값으로 문턱값이 크면 그 만큼 자료의 불확실성을 나타내는 분산값이 커지게 되므로 오차분산은 커짐
  - 상관거리(range): 상관관계를 보이는 최대 분리거리 구간
  - 너깃(nugget,  $C_0$ ): 분리거리 0에서도 베리오그램이 0이 아닌 상수값을 나타낼 때의 값으로 자료의 불확실성 의미함
  - 베리오그램을 계산하기 위한 모델로 최소자승기법(Least Square Method)을 사용함

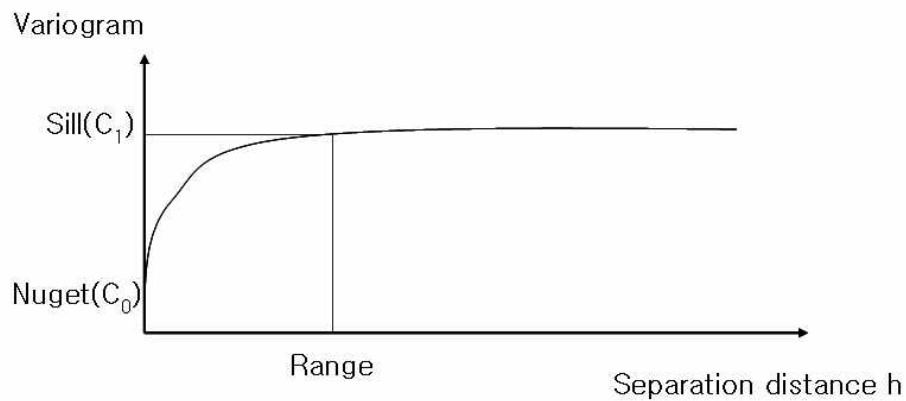


그림 9. 비방향성 반베리오그램을 계산하기 위한 주요 인자들

- 크리깅의 특징 및 한계를 정리하면 다음과 같음
  - 크리깅 행렬 방정식은 확실한 수학적 배경을 가지고 있음
  - 주어진 자료를 재생하는 정확성이 있음
  - 크리깅 예측값은 조건이 동일하면 언제나 같은 결과를 재생산함
  - 자료의 특성값이 완만하게 변화되면서 산술평균을 적용하기에 타당한 물성 변수에 대하여 매우 뛰어난 예측 능력을 가짐

- 동일한 평균을 갖더라도 분산이 큰 자료들에 대해서는 크리깅으로 재생된 값들의 분산이 급격히 감소하는 경향을 보임
- 새로운 지점에서 값을 예측할 때 마다 가중치를 새롭게 계산해야 함. 결과적으로 많은 양의 전산자원을 필요로 함
- 본 연구에서는 기후장을 시범구축하기 위한 크리깅을 위해 자료 탐색 반경을 75 Km, 최대 자료 개수를 400, 최소를 20으로 설정하여 계산하였음. 20개 미만의 자료가 최초 정한 탐색 반경 안에 없는 경우 탐색반경을 확장하여 최소 20개의 자료를 확보하여 계산함
- 크리깅 수행 후 NODC와 동일하게 3차례의 Filtering을 사용하여 짧은 주기의 noise를 제거하였음
- 위의 과정을 그림 10과 같은 흐름도(flowchart)에 정리하였음

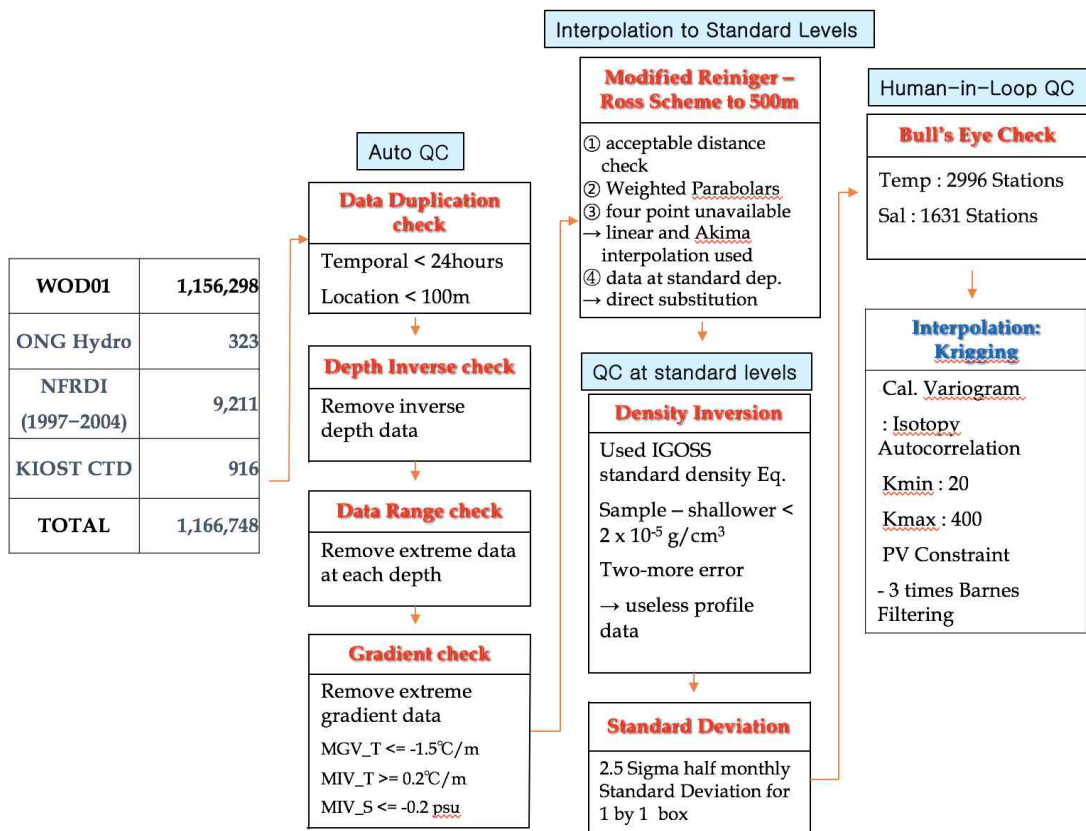


그림 10. 기후장 계산과 위한 자료 처리 흐름도

#### 마. 기후장 시범 구축 및 성능 평가

- 본 연구의 목표가 기후장 구축을 위한 기술개발임으로 전산자원과 연구기간을 고려하여 수평 해상도는 1/4°, 수심은 표준수심에서 500m까지 시범적으로 수온과 염분에 대하여 기후장을 계산하였음
- 1/4° 자료의 성능을 평가하기 위하여 동일한 수평 해상도를 가지는 WOA01q (Locarnini et al. 2013; Zweng et al. 2013)와 비교하였음
- 입력자료의 차이를 줄이기 위하여 기본적으로 동일자료인 WOD01을 품질검증 처리하여 사용하였음
- 그림 11은 수심 150m에서 수온의 수평분포를 나타냄. 수심 150m는 동해에서 염분최소층으로 알려진 동해중층수가 남하하는 수심으로 알려져 있음
  - 그림 11에서 보는 것과 같이, 새롭게 계산한 기후장은 기존의 WOA01q와 연구 영역 평균 입장에서 차이는 0.05°C로 미약함. 그러나, 쿠로시오, 동안난류, 일본연안류 등 난류의 미세구조가 더욱 명확히 나타나는 것을 확인할 수 있음. 동해 연안이 WOA01q에 비교하여 약 2.5°C 이상 차가운 해수가 존재함. 이는 새로운 기후장에서 동해중층수가 잘 구현되어 있음을 시사함 (Kim et al. 2004)
  - 동해 중부해역에서 아북극전선의 사행이 새로운 기후장에 더 명확함. 이와 더불어 울릉 분지내에 난류성 소용돌이가 더욱 분명하게 나타남
  - 쿠로시오와 일본 연안 사이에서 두 기후장 사이에서 수온이 낮은 아노말리가 존재함. 이는 북극에서 기원하는 한류인 오야시오 해류가 연안을 따라서 남하하고 있는 양상을 나타낸 것일 수 있음

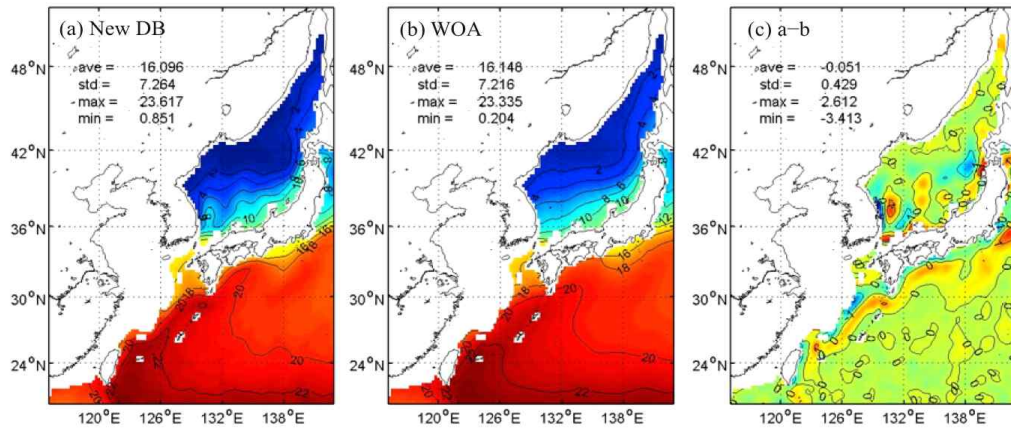


그림 11. 150m 수심에서 연평균 수온의 수평 분포: (a)새로운 기후장, (b)NOAA의 WOA01q. 두 기후장의 차이를 (c)에 나타내었음

- 그림 12는 수심 500m에서 염분의 수평분포를 나타냄. 수심 500m는 동해의 중층 자오 순환(meridional circulation)을 파악하는데 중요한 수심임
  - 염분의 경우도 연구영역을 평균하였을 때, 기존의 기후장과 거의 없음 (0.002)
  - 가장 눈에 띄는 차이는 쿠로시오 해역과 블라디보스톡 앞에서 나타남
  - 위도 31°N, 경도 135°E를 중심으로 쿠로시오 해역에서 새롭게 계산한 기후장의 염분이 WOA01q보다 0.05이상으로 높게 나타나고 있으며, 이는 쿠로시오의 두께가 새로운 기후장에 더욱 깊이 나타나고 있음을 의미함
  - 블라디보스톡 앞 해역에서 새롭게 구축한 기후장의 염분이 0.02 이상으로 높게 나타남
  - 결과적으로는 블라디보스톡 앞 해역에서 혼합층 깊이가 겨울철 최대인 2월에 500 m 이상인 해역이 Dipole의 형태로 나타남 (그림 13)
  - WOA01q에서 최대 혼합층 깊이가 나타난 해역은 러시아 연안해역임 (그림 13)
  - 이는 새로운 기후장으로 모형을 구동하였을 때, 동해 자오순환이 더욱 명확하게 나타날 것임을 시사함

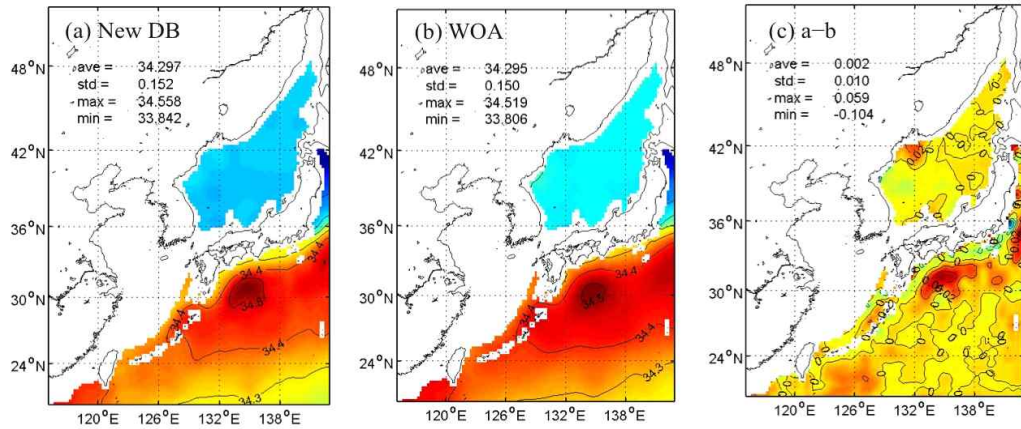


그림 12. 500m 수심 연평균 염분: (a)새로운 기후장, (b)NOAA의 WOA1q, (c) a-b

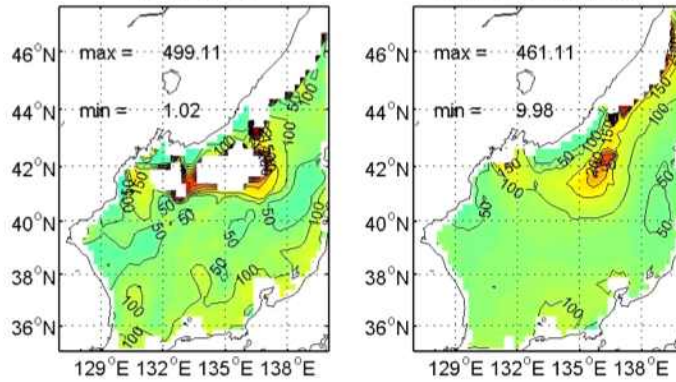


그림 13. 동해 2월 혼합층 깊이. 새로운 기후장(왼쪽)과 WOA1q(오른쪽)

- 흥미롭게도 2월 혼합층 깊이의 측면에서 일본연안에서 큰 차이가 존재함. WOA1q의 경우 혼합층의 깊이가 100m 이하로 낮게 나타나는 반면 새로운 기후장에서는 100m 이상으로 그 깊이 차이가 대략 50m 정도임. 이는 새로운 기후장에서 일본연안류 (Nearshore Branch)를 약 50m 정도 깊게 모사하고 있음을 의미함
- 105라인 수온 비교 (그림 14)
  - 새로운 기후장의 경우 동해연안을 따라 차가운 해수가 존재. 염분의 경우 34.05 이하의 염분최소층이 동해연안에서 수심 100m에서 275m 사이에 나타남. 이 수온이 낮은 염분최소층은 동해연안을 따라 남하하는 동해중층수입(Kim et al. 2004)
  - 이 염분최소층은 WOA1q나 다른 기후장에서는 나타나지 않음 (Chang and Shin 2012)

- 130.5°E를 중심으로 아래로 볼록한 수온 구조가 WOA01q보다 명확함
- 그림 7(a)의 정선관측 자료와 비교하여도 새롭게 계산한 기후장이 동해의 수온 수층 구조를 더 잘 묘사함을 의미함. 이는 동안난류 혹은 울릉난수성 소용돌이의 존재가 새로운 기후장에 더 잘 나타남을 의미함

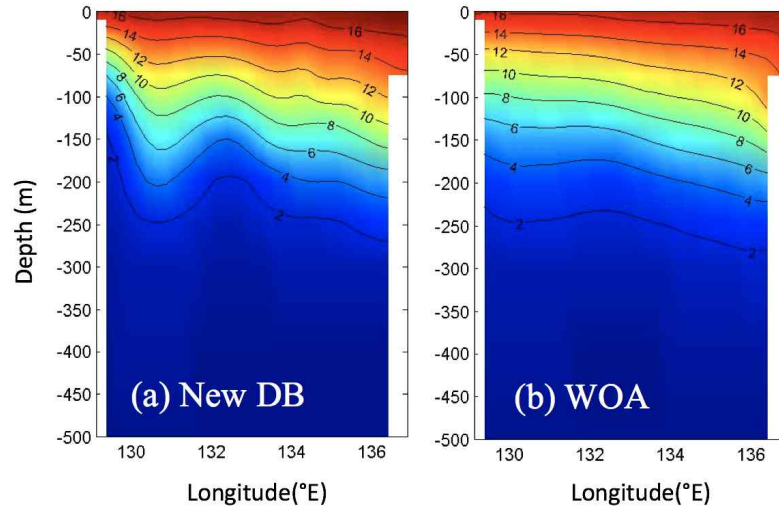


그림 13. 동해 105 라인에서 수온 단면도: (a)새로운 기후장 (b)WOA01q

- 황해 염분 수평분포(그림 15)
  - 황해의 경우 제주 서쪽에서 황해 중앙부를 가로지르는 황해골을 따라 쿠로시오 기원의 황해난류가 간헐적으로 유입된다고 알려져 있음 (Lie et al. 2001; Kim et al. 2018). 들 어간 난류는 중국연안을 따라 한류의 형태로 남하하여 동중국해 중앙부에서 수온/염분 전선이 발생함
  - 특히, 여름철 양자강 담수가 황해로 유입되어 강한 염분전선이 형성됨
  - 새로운 기후장을 WOA01q와 비교할 때, 염분전선을 비롯하여 순환 양상이 잘 표현됨



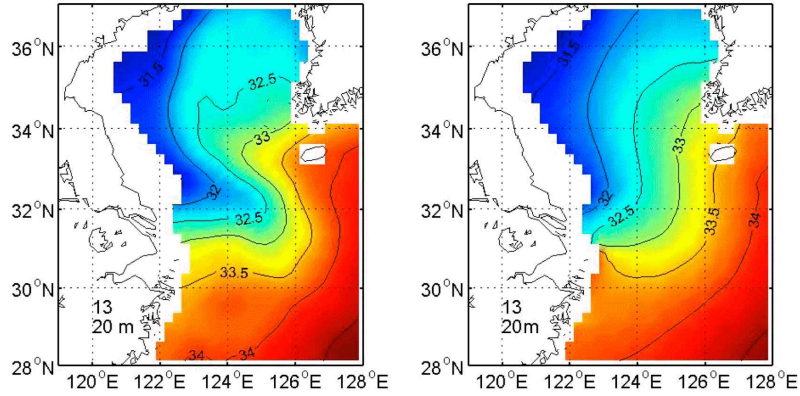


그림 15. 20m 수심에서 황해의 연평균 염분 분포: 새로운 기후장(왼쪽)과 WOA01q(오른쪽)

### (3) 연구 요약 및 향후연구 방향

- 기존 기후장의 문제점 파악
  - NOAA의 기후장인 EAS-RC는 지금까지의 기후장 중 가장 고해상도 기후장이면서, 가장 최근에 개발된 기후장임에도 불구하고 지형류, 수온분포에 있어서 문제점이 있음을 확인함
  - 동해 중부해역에서 약 1° 위도 간격으로 비정상적으로 강한 동서방향 해류 존재
  - 동안난류, 북한한류, 일본연안류 등 남북방향의 동해 해류 구조를 구현하지 못함
  - 아북극전선 이북의 반시계 방향 대순환의 세기가 미약함
  - 이는 동해 수온의 수평분포가 비정상적이기 때문임
  - NOAA의 기후장 구축에 있어서 필수적인 First Guess Field에 문제가 있는 것으로 사료됨
  - 기존 기후장의 한계로 인하여 본 연구를 촉발시킴
  
- 기후장 계산을 위한 품질검사 및 내삽기법 개발
  - 기후장 계산을 위한 고도화된 품질검사 기법 제시하고 소프트웨어를 개발함
  - 기술 자문 및 토의를 통해 과거 기후장의 핵심 기술을 확보하고, 장단점을 파악함
  - 기후장 계산 최초로 크리깅을 활용한 기후장 계산으로 해수 물성 및 해류장을 현실적으로 반영함
  - 이 기후장을 수치모형의 초기, 경계 조건으로 활용할 때 예측 기술 성능 향상에 기여할 것으로 예상됨

- 한국해 해수물성 기후장 시범 구축
  - **115만개 이상의 해수물성 프로파일 자료**를 수집하여 데이터베이스 구축
  - 기존 기후장은 NOAA의 World Ocean Database 만을 이용하여 기후장을 계산한 반면, 새롭게 시범적으로 구축한 기후장은 CREAMS, KIOST, 동해 ARGO 자료 등 지금까지 대중에게 공개되지 않은 자료를 추가적으로 사용하였음
  - 관측 자료를 활용하기 위하여 한국해에 최적화된 품질검사 기법을 시범 개발하였음
  - 시범 구축된 기후장은 1/4° 수평격자에서 수심 500 m까지의 표준수심에서 수온과 염분에 대하여 구축함
  - **새로운 기후장은 황해난류, 동한난류, 일본연안류, 쿠로시오, 아북극 전선 등 해류 구조, 한국 주변해의 해수 물성 모사에 있어 기존 기후장 WOA01q와 비교하여 우수함**
  - 심층수가 형성된다고 알려진 동해북서해역에서 염분이 기존 기후장에 비하여 높게 나타나며, 이 해역에서 혼합층 깊이 또한 겨울철에 기존 기후장에 비교하여 수백m 깊게 나타남. 이 기후장을 수치모형에 활용할 때 동해 자오순환 (meridional overturning circulation)이 좀 더 사실적으로 나타날 수 있음
  
- 향후연구 방향
  - 동해 북서해역 (블라디보스톡 앞 해역) 에서 밀도역전이 나타나는 해역이 존재함. Baker and Mcdougall(2017) 기법 혹은 Carnes(2009)가 제시한 수직경도 보정을 적용하여 밀도역전 문제를 해결할 예정임
  - 기본관측자료를 WOD01을 사용하였음. 최근 대중에 공개된 WOD18은 170만개 이상의 자료가 포함되어 있음. 이 자료는 특히 비중이 많은 XBT 자료의 관측값 보정이 구현되어 있어서 정확한 기후장 구축에 있어서 필수적이라 판단됨. 향후 WOD18을 이용하여 DB 구축과 기후장 계산 연구가 반드시 수행될 필요가 있음
  - **중국연안의 관측 자료가 필요** (예를 들면, YSLME 보고서내의 관측자료)
  - 본 연구는 기후장 구축 후 이를 수치예보 및 기후 연구, 해수면 변동 연구 등에 직접적으로 활용을 통해 문제점을 파악하거나 개선하는 부분이 제외되어 있음. 향후 추가적인 연구 수행이 필요하다고 판단됨

#### (4) 연구의 정량 실적

- 학술 발표

번호	논문명	저자명	발표일	학술대회명	구분	국내/외	저자구분
1	한국 주변해역에서의 해수 물성 기후평균장 구축	김용선, 김성대	2019.10.31	한국해양학 회	초록(Abs)	국내	제1저자 교신저자
2	한국해 해수 물성 기후평균장 시범 구축	김용선	2019.10.10	연안방재학 회	초록(Abs)	국내	제1저자 교신저자
3	A Yellow Sea monitoring platform and its scientific application	김용선	2019.10.18	OceanOBS19	Paper	국제	제1저자

- 산업재산권

번호	특허명(SW명)	등록국가	출원번호	출원일	등록번호	등록일
1	해양-대기 관측 시계열자료 표준편차 품질검사	한국		2019.10.24	C-2019-03 2575	2019.11.07

## 접수증

신청인 : 한국해양과학기술원 님이 신청한 접수내역입니다.

접수일자 : 2019 년 11 월 05 일

접수번호	신청내용	신청제호
2019-033532	프로그램 등록	해양-대기 관측 시계열자료 표준편차 품질검사 기법

2019 년 11 월 05 일

한국저작권위원회 위원장



등록의 처리기한은 접수 후 4일이며, 이 기간 중 별도의 통보가 없다면 정상적으로 등록이 수리될 것입니다.  
만약 제출서류에 누락이 있거나 기재내용에 하자가 있을 경우 등록 담당자가 연락을 드려 보완을 요청할 것입니다.  
등록증은 신청시 선택한 수령방법에 따라 교부될 예정이며, 우편수령을 선택하신 경우에는 등록증을 수령하기까지  
우편기간을 포함하여 접수일로부터 약 7일 정도 소요될 수 있습니다.

## 제 3장 연구개발결과의 활용계획

### (1) 연구 결과물의 활용성

- GUI 기반 데이터베이스 구축
  - 170만개 이상의 관측자료를 Graphic User Interface (GUI) 기반하여 구축하여 사용자가 손쉽게 사용할 수 있도록 패키지를 작성, 자료와 함께 배포 예정
- 고해상도 기후장 계산
  - EAS-RC 보다 고해상도의 기후장을 구축할 예정
  - 기계학습을 통해 과거 관측자료의 품질검사를 수행
- 복합적인 성능 평가
  - 현재는 물성을 중심으로 단순하게 기후장의 성능을 평가함
  - 수치 모형, P-Vector 계산, 혼합층, 수증기량, 해수면 고도 등 다양한 측면에서 새롭게 구축한 기후장과 과거 기후장, 혹은 재분석자료와 비교분석이 필요함. 이를 통해 기후장의 우수성 혹은 문제점을 파악할 수 있을 것으로 생각함
  - 연구재단의 기초연구사업으로 확장하여 수행할 예정임
- 연구성과 확대 (그림 16)
  - 기후모형 적분 결과를 통한 미래 예측에 있어서 초기장이 예측 성능 결정에 중요한 영향을 미칠 수 있음. 새로운 기후장을 통해 모형 성능 파악 및 모형 예측 skill을 평가할 수 있음
  - 빅데이터와 기후장을 통해서 해수물성 및 순환의 장기 변동을 기후역학적 관점에서 분석 가능하며, 이를 통해 지구 온난화에 따른 해양 심층의 변동 기작을 파악할 수 있을 것으로 사료됨
  - 이를 바탕으로 한국 주변해 물리 현상의 평균장 및 장기변동을 이해하기 위한 초석을 마련할 수 있을 것임
  - 해수 물성과 혼합층, 순환의 변동은 해양 생태계 환경 변화에 있어서 핵심 요소임. 새롭게 구축한 기후장을 사용할 때 해양 생태계 미래 변화를 예측하는데에

도 활용될 수 있음

## (2) 연구 기술적, 경제적, 사회적 파급 효과

- 대규모 해양물성 자료처리 관한 국제적인 수준의 첨단 추적기술 확보
- 해수면, 열용량, 혼합층, 해류 장기 변동 및 지역기후모형 개발과 같은 응용 연구와 해양생태계 및 생지화학 변동 이해와 같은 대규모 융합연구 수행의 기초 자료로 활용 가능

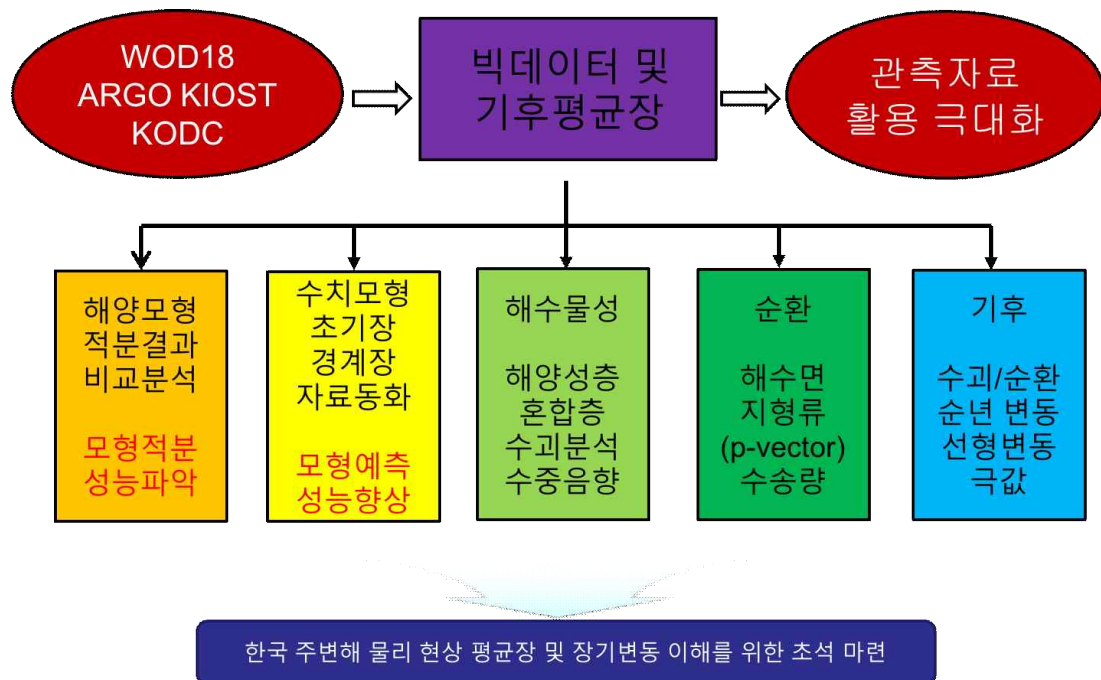


그림 16. 연구성과 활용 분야 및 최종 목표

## 제 4장 참고문헌

- Baker, P.M. and T. J. McDougall (2017) Stabilizing hydrographic profiles with minimal change to the water masses, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1935–1945, doi:10.1175/JTECH-D-16-0111.1
- Carnes, M.R. (2009), Description and evaluation of GDEM-v3.0. NRL Memorandum ReportNRL/MR/7330-09-9165. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS USA.
- Chang, Y.-S., and H.-R. Shin (2014) Vertical gradient correction for the oceanographic Atlas of the East Asian Seas, *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 119, 5546-5554, doi:10.1002/2014JC009845.
- Chang, Y.-S., and H.-R. Shin (2012) Objective analysis of monthly temperature and salinity around the southwestern East Sea (Japan Sea) on a 0.1° grid, *Continental Shelf Research*, 45, 54-64.
- Chu, P. C., C.R. Fraclick Jr., S.D. Haeger, and M.J. Carron, M.J (1997) A parametric model for the Yellow Sea thermal variability. *Journal of Geophysical Research*, 102(C5), 10499-10507.
- Chu, P. C., J. Lan, and C. Fan (2001a) Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part I: Climatology, *Journal of Physical Oceanography*, 31, 244-271.
- Chu, P. C., J. Lan, and C. Fan (2001b) Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part II: A variational P-vector method, *Journal of Physical Oceanography*, 31, 2886-2902.
- IPCC (2013) *Climate change 2013: the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 881.
- Johnson, D.R., and T.P. Boyer (2015) *Regional Climatology of the East Asian Seas: An Introduction*. NOAA Atlas NESDIS 79, Silver Spring, MD, 37 pp. doi:10.7289/V5D21VM9.
- Kim, K, K-R. Kim, Y.-G. Kim, Y.-K. Cho, D.-J. Kang, M. Takematsu, and Y. Volkov (2004) Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan), *Progress in Oceanography* 61(2), doi: 10.1016/j.pocean.2004.06.003.
- Kim, Y.S., C.J. Jang, and S.-W. Yeh (2018) Recent surface cooling in the Yellow and

East China Seas and the associated North Pacific climate regime shift,  
Continental Shelf Research 156, 43-54, doi: 10.1016/j.csr.2018.01.009 .

Lie, H. -J, C. -H. Cho, J. -H. Lee, and S. Lee (2001) Does the Yellow Sea Warm Current really exist as a persistent mean flow?, journal of Geophysical Research, 106 (C10), 22199-22210.

Locarnini, R.A., A.V. Mishonov, J.I. Antonov, T.P. Boyer, H.E. Garcia, O.K. Baranova, M.M. Zweng, C.R. Paver, J.R. Reagan, D.R. Johnson, M. Hamilton, D. Seidov (2013) World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. ; A. Mishonov, Technical Ed. ; NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp. publication doi:10.7289/V55X26VD.

Zweng, M.M, J.R. Reagan, J.I. Antonov, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, T.P. Boyer, H.E. Garcia, O.K. Baranova, D.R. Johnson, D. Seidov, M.M. Biddle (2013) World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. ; A. Mishonov, Technical Ed. ; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.

Teague, W.J, M.J. Carron, and P. J. Hogan (1990) A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies, Journal of Geophysical Research, 95, 7167-7183, 1990.

정희석, 장찬주, 김용선, 강수경, 한국 주변해 중기 해양환경 예측모형 구축: 시범 예측, 연안방재학회, 5(1), 17-23.