

수치적 접근법을 이용한 북극해 태평양기원수의
변동성 진단 연구

A diagnostic study on the variability of the Pacific-origin
waters in the Arctic Ocean: Numerical approach



한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “수치적 접근법을 이용한 북극해 태평양기원수의 변동성 진단 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 12. 29

연구책임자 : 조 경 호



보고서 초록

과제관리번호	BSPE16420-144-6	해당단계 연구기간	2016.11.1 ~ 2017.10.31	단계 구분	(1단계)/(총1단계)
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명	기본연구사업(신진연구자)			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	수치적 접근법을 이용한 북극해 태평양기원수의 변동성 진단 연구			
연구책임자	조 경 호	해당단계 참여연구원수	총 : 1명 내부 : 1명 외부 : 0명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연 구소 극지해양과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					39
○ 연구개발의 목적 및 필요성					
1) 목적: 해양 수치모델을 활용하여 서북극해 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단					
2) 필요성					
- 수치적 접근법을 통해 관측하기 어려운 태평양기원수의 시공간적 변동성에 영향을 주는 요인을 파악하여, 향후 태평양기원수의 유동 및 순환을 이해하는데 필요함					
- 잘 검증된 북극해 해양 수치모델 결과는 해빙예측 모델시스템 개선 (해빙변동성 예측)을 위해 해양 기초자료 (해양표층 해류 및 수온)를 제공하는데 필요함					
○ 연구개발의 내용 및 범위					
1) 북극해 해양 수치 모델 수립					
- 북극해 수치 진단 모델 수립					
- 모델 외력 영향 요인별 시나리오 구성 및 모수화 수립					
2) 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단					
- 태평양기원수의 변동성 진단					
- 진단모델을 이용한 외력 요인들(지역바람, 베링해협 유입량)의 영향력 파악					
○ 연구개발결과					
1) 오픈소스 3차원 해양 수치모델 (FVCOM: unstructured-grid, Finite-Volume Community Ocean Model)을 이용한 북극해 태평양기원수 진단 모델 수립					
2) 모델 모수화를 통한 북극해 진단 모델 최적화 수립					
3) 지역바람의 영향은 즉각적으로 나타나며 태평양기원수 경로 해역에서의 수온의 변동성을 일으키는 중요한 요인임. 반면 베링해협 유입량의 변동성은 시간적 지연이 나타나며 영향력이 다소 미흡함					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	서북극해, 태평양기원수, 해양수치모델링, 연간변동성, 태평양여름수			
	영 어	Western Arctic Ocean, Pacific-origin waters, numerical ocean modeling, annual variation, Pacific Summer Water			

요 약 문

I. 제 목

- 수치적 접근법을 이용한 북극해 태평양기원수의 변동성 진단 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적

- 해양 수치 진단 모델을 활용하여 서북극해 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단

2. 필요성

- 수치적 접근법을 통해 관측하기 어려운 태평양기원수의 시·공간적 변동성을 파악하고 북극해 해수의 기초적 특성 및 순환을 이해하는데 유용하며 역학적인 해석이 가능함
- 북극해 해양 진단 모델은, 북극해 물류산업경제 육성 및 항로 개척에 영향을 줄 수 있는 해빙예측 모델 시스템 개선에 도움을 주는 기초자료를 제공 가능함
- 또한 북극해 대기-해빙 예측정보 시스템에 필요한 해양외력을 제공할 수 있기 때문에 해수의 변동성 연구는 향후 북극해 해빙면적 변화 및 기상 변화 예측에 필수적임
- 북극해 해수의 변동성 진단은 해양생태계 특성의 변동성과 관련하여 수산자원 개발 등 경제적 이용 가치가 크기 때문에, 해양물리 변수들의 역학적 해석 및 수치적 예측결과를 토대로 향후 북극해 경제적 가치를 판단할 근거 제시 가능

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극해 해양 수치 모델 수립
- 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단

IV. 연구개발결과

- 북극해 해양 수치 모델 수행을 위한 모델링 서버 구축
- 구축된 서버에 비구조 격자 해양 수치 모델을 선정하여 설치

- 수립된 모델 셋업과 모수화를 가지고 5년간 spinup을 통해 모델 안정화 수립
- 시나리오 구성을 통해 주요 요인별 영향력을 진단한 결과 지역 바람에 의한 변동성 영향이 가장 큰 것으로 나타남

V. 연구개발결과의 활용계획

- 국내 해빙-해양 실시간 예측시스템 구축 연구에 활용 가능함
- 북극해 해양환경 변화 관측 시 관측 정점 선정을 위한 기초자료 (해수 및 해류 특성 분포)로 활용
- 태평양기원수 변동성 예측에 활용하여 북극해 해빙 감소의 변동성과 북극 기후 변화에 미치는 영향 연구에 활용



S U M M A R Y

I . Subject

- A diagnostic study on the variability of the Pacific-origin waters in the Arctic Ocean: Numerical approach

II . Objectives and Necessities

1. Objectives

- To diagnose the primary factors influencing on the variability of the Pacific-origin waters in the western Arctic Ocean using a numerical ocean model

2. Necessities

- For identifying temporal and spatial variations of the Pacific-origin waters at the locations where it is difficult to be observed through a numerical approach and understanding fundamental property and circulation of sea waters in the western Arctic Ocean
- For providing effective information to help developing a real-time sea ice prediction system for Arctic route exploration
- For providing ocean forcing (e.g., sea surface temperature, surface current) to the Arctic atmosphere-sea ice prediction system in order to predict the changes in sea-ice reduction and Arctic climate
- For suggesting economic evaluation of fishery resource development due to the variability of marine environment and ecosystem in the Arctic Ocean

III . Contents and Scopes

- Establishment of a diagnostic numerical ocean model for the Arctic Ocean
- Diagnosis of the primary factors influencing on the variability of the Pacific-origin waters

IV . Results

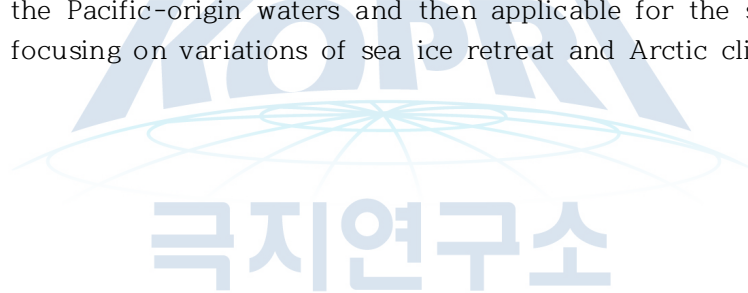
- Successful establishment of a modeling server in order to run a

numerical ocean model for the Arctic Ocean

- Successful installation of an unstructured-grid ocean model on the server established
- Model stabilization using 5-year spinup with suitable model setup and optimized parameterization
- It turns out that local wind is the primary factor to effect on the variability of the Pacific-origin waters.

V. Application Plans

- Will be applicable for the projects which develop the ice-ocean real-time prediction systems for the Arctic and Southern Oceans
- Will be useful for establishing the future plans to observe marine environmental variations in the Arctic Ocean by providing the fundamental information on the properties of water masses and circulation pattern
- Will be utilized for fully understanding and predicting the variability of the Pacific-origin waters and then applicable for the studies which are focusing on variations of sea ice retreat and Arctic climate changes



C O N T E N T S

Cover	I
Abstract	II
Summary(Korean)	III
Summary(English)	V
Contents(English)	VII
Contents(Korean)	IX
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Objectives	1
Section 2 Necessities	1
1. Technical	1
2. Economic/Industrial	1
3. Scientific	2
4. Social/Cultural	2
Section 3 Contents and Scope	2
Chapter 2 Domestic and Overseas Status of Technological Development	4
Section 1 Overseas Status	4
Section 2 Domestic Status	4
Chapter 3 Contents and Results	6
Section 1 Establishment of a numerical ocean model for the Arctic	6
1. Ocean model survey and selection	6
2. Establishment of a modeling server	9
3. Model installation	10
4. Generation of model input files	13
5. Model setup and parameterization	21
6. Model result comparison	23
Section 2 Diagnosis of the primary factors to affect the variability of the Pacific-origin waters	26
1. Variability of the Pacific-origin waters using observed data	26
2. Model scenarios	29

3. Diagnosis of the primary factors using model results.....	30
Chapter 4 Achievement of Goals and External Contributions.....	32
Section 1 Achievement of Goals.....	32
Section 2 External Contributions.....	33
Chapter 5 Plans for Utilization of Results.....	34
Chapter 6 References.....	36



목 차

제출문	I
보고서 초록	II
요약문	III
영문요약문	V
영문목차	VII
목차	IX
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발의 목적	1
제 2 절 연구개발의 필요성	1
1. 기술적 필요성	1
2. 경제·산업적 필요성	1
3. 과학적 필요성	2
4. 사회·문화적 필요성	2
제 3 절 연구의 내용 및 범위	3
제 2 장 국내외 연구개발 현황	4
제 1 절 국외수준	4
제 2 절 국내수준	4
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	6
제 1 절 북극해 해양 수치 모델 수립	6
1. 북극해 수치 모델에 대한 사전조사 및 선정	6
2. 모델링 서버 구축	9
3. 모델 설치	10
4. 모델 인풋 파일 생성	13
5. 모델 셋업 및 모수화	21
6. 모델 결과 비교	23
제 2 절 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단	26
1. 관측 자료를 토대로 한 태평양기원수의 변동성 파악	26
2. 변동성 진단을 위한 시나리오 구성	29
3. 모델 결과를 활용한 주요 영향 요인 진단	30

제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	32
제 1 절	목표달성도	32
제 2 절	관련분야에의 기여도	33
제 5 장	연구개발 결과 활용 계획	34
제 6 장	참고문헌	36



제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적

1. 북극해의 해수 분포 및 순환을 수치적으로 모의할 수 있는 해양 수치 모델을 수립함으로써 서북극해 해수 분포 및 순환에 영향을 미치는 모델 외력들을 파악함
2. 베링해협으로 유입되는 태평양기원수의 변동성을 진단하고 모델 외력들이 태평양기원수의 변동성에 미치는 영향력을 진단함

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 필요성

- 가. 기후변화와 밀접하게 연관된 북극해의 해빙 감소는 북극해 해양환경변화에 크게 영향을 주고 있음에도 불구하고 해빙으로 인한 계절적 접근성의 한계, 다수 공간에서의 연속 관측 어려움, 고비용의 연구선 사용료와 같은 문제로 인하여 넓은 공간에서의 장기간 연속 관측 자료 획득이 어렵기 때문에 상호보완적인 수치적 접근법이 필요함
- 나. 북극해의 해빙감소와 밀접한 관계가 있는 태평양기원수의 분포 및 경로 파악은 앞서 언급한 한계성이 있기 때문에, 수치 모델링을 통한 접근은 관측하기 어려운 태평양기원수의 시·공간적 변동성을 파악하고 북극해 해수 특성 및 순환을 이해하는데 매우 유용하며 물리적인 역학과정 해석이 가능함

2. 경제·산업적 필요성

- 가. 북극해에서의 해빙감소는 북극해를 통한 극동아시아 및 유럽·대서양 연안을 연결하는

최단거리 물류 산업 개발 가능성이 크기 때문에 북극해 해수 순환과 해빙분포 모니터링 및 예측이 시급함

- 나. 해빙면적이 감소할 경우 북극해는 해저자원 개발과 수산자원의 양과 어종 변화로 인한 수산자원 개발 등 경제적 이용 가치가 크기 때문에, 북극해 순환 등 역학적 해석 및 수치적 예측 결과를 토대로 향후 경제적 가치 창출을 위한 노력이 필요함

3. 과학적 필요성

- 가. 북극해에서 대기-해빙-해양 간의 상호작용으로 인한 북극 대기의 변화는 우리나라 한반도에도 주기적으로 이상 현상을 일으킨다고 보고된 바가 있기 때문에, 태평양기원수의 변동성을 지배하는 요인들의 파악은 향후 북극해 해빙면적 변화 및 기상 변화 예측에 필수적임

- 나. 서북극해의 척치보더랜드는 태평양기원수와 대서양기원수, 연안 대륙붕수가 서로 만나는 곳으로 수직적으로 여러 개의 수괴가 공존하는 해역임. 기후변화로 인한 대서양기원수의 열유입과 태평양기원수의 열유입이 증가하는 추세에 따른 해빙감소가 해양환경에 미칠 영향에 대한 관심이 중요해지고 이에 대한 예측이 필요함

4. 사회·문화적 필요성

- 가. 북극해 해수순환 및 수괴 특성 진단 기술 개발로 인해 국제적인 북극해 예측 연구 커뮤니티에 참여하여 극지 수치모델링의 응용에 대한 사회적 위상 향상에 필요함. 국제협력을 통한 해양물리 관측 및 예측 시스템 기술 및 연구원 교류 등 향후 극지과학의 교육 및 일자리 창출에 기여할 것으로 기대됨

제 3 절 연구의 내용 및 범위

1. 북극해 해양 수치 모델 수립

- 가. 북극해 수치 모델 및 모델링 서버 구축
- 나. 모델 인풋 파일 생성 및 초기·경계조건 생성을 위한 자료 수집
- 다. 모델 셋업, 모수화 및 모델 결과 비교

2. 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단

- 가. 관측 자료를 토대로 한 태평양기원수의 변동성 파악
- 나. 변동성 진단을 위한 시나리오 구성
- 다. 모델 결과를 활용한 주요 영향 요인 진단



제 2 장 국내외 연구개발 현황

제 1 절 국외수준

- 가. 태평양기원수의 변동성에 대한 연구는 2000년대 초반부터 척치해 및 보퍼트해에서 미국 University of Washington (UW), Woods Hole Oceanographic Institute (WHOI), 일본의 JAMSTEC을 중심으로 북극해 관측조사를 통해 수행되어오고 있으며, Yoshizawa et al. (2015)에서 수치적인 접근을 통해 변동성 진단을 제시하고 있음
- 나. Timmermans et al. (2014)는 진단 모델을 통해 태평양 여름수의 변동성의 특징을 언급하였음. 모델 수평 격자 크기를 25 km로 하고, 해빙효과 및 열교환 효과를 고려하지 않는 등의 여러 가지 한계성을 보여주고 있지만 캐나다 분지에서의 태평양여름수 isohaline의 깊이가 깊어지는 것이 보퍼트해 순환의 강도와 매우 밀접하다는 것을 제시하였음. 또한 바람에 의한 표층 에크만 수송이 태평양여름수 halocline의 ventilation을 유지한다는 것도 제시하였음.
- 다. 문헌조사에 의하면 북극해에 대한 수치모델 개발은 주로 해빙 모델을 중심으로 발전해 왔으며 대기-해빙 혹은 해빙-해양 잡합을 통해 장기간동안 평균한 해빙 및 해수 특성 분포를 연구해 오고 있음. 특히 Zhang et al. (2016a)에서는 비구조 격자 해양-해빙 모델을 이용하여 1978년부터 2014년까지의 인공위성 관측 자료 (해빙면적)와 모델결과를 비교를 시도하였음. 비록 모델 수행을 통해 해빙면적의 계절 및 연간 변동성을 잘 재현했지만 해빙면적의 변동성을 일으키는 요인에 대해서는 언급하지 않았음.
- 라. UW와 US Navy에서는 단기간 해빙예측을 통해 해빙농도와 해수 특성 분포 결과를 생산하고 있음

제 2 절 국내수준

- 가. 국내의 해양-해빙 접합 모델을 이용한 북극해 연구는 아직 시작단계라 할 수 있으며

한국해양대학교와 극지연구소에서 북극해 해빙-해양 접합 수치모델을 구축한 바가 있음

- 나. 국립기상과학원에서는 유럽으로부터 북극해 (준)실시간 예측예보 시스템을 도입하여 현재 비공식적으로 72시간 해양-해빙 예측결과를 생산하고 있음
- 다. 태평양기원수의 변동성에 대한 모델 연구는 아직 미흡한 단계임



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 북극해 해양 수치 모델 수립

1. 북극해 수치 모델에 대한 사전조사 및 선정

가. 북극해 수치 모델 사전 조사

전세계 북극해 모델관련 과학자들은 북극해 모델에서의 시스템적인 오류를 찾아내고 모델결과와 기후예측의 불확실성을 줄이기 위해 국제적인 북극해 모델 상호비교 프로젝트 (AOMIP: Arctic Ocean Model Intercomparison Project)에 참여하였다. 현재는 FAMOS (Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis)라는 포럼으로 변경되어 국제협력 강화의 목적으로 수행되고 있다. FAMOS에서의 언급과 문헌 (연구논문) 조사를 통해 북극해 해양 수치 모델에 대한 사전조사를 실시하였다.

(1) Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm)

MITgcm은 MIT에서 개발한 대기-해양 순환 모델이며 (Marshall et al., 1997a, b), 해양 모델의 경우 역학적/열역학적 해빙 모델이 접합되어 있다 (Menemenlis et al., 2005; Losch et al., 2010; Heimbach et al., 2010). 접합된 모델은 북극해에서 최적화하려는 연구들이 수행되었다 (Nguyen et al., 2011, 2012).

(2) Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO)

NEMO는 프랑스를 중심으로 한 유럽연합 국가들의 협력 연구로 개발되었다. 해양 역학/열역학을 다루는 엔진 OPA, 해빙 역학/열역학을 다루는 엔진 LIM (Louvain-la-Neuve Ice Model), 생지화학 모델 엔진 TOP, 그리고 sources/sinks를 다루는 PISCES로 구성되어 있다 (Madec and the NEMO team, 2008).

(3) Finite Element Sea Ice-Ocean Model (FESOM)

독일 AWI (Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research)에서 개발한 해빙-해양 접합 모델 (Wang et al., 2014)로서, 비구조격자 체계를 가진 Finite Element

Ocean Model (FEOM; Danilov et al., 2004)에 AWI의 Finite-Element Sea Ice Model (FESIM; Danilov et al., 2015)이 결합되어 있다. 해빙 뿐만 아니라 최근 빙붕-해양 접합 요소도 포함되어 있다 (Timmermann et al., 2012).

(4) Unstructured-grid, Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)

미국 메사추세츠 대학과 우즈홀 해양연구소에서 공동 개발한 모델 (Chen et al., 2003) 로서, 비구조격자 체계를 가지고 있으며 연안 역학 모델로 시작하여 전지구 모델, 해빙-해양 접합 모델 등으로 발전되어 왔다. 현재 버전 (version 4.0)에는 해빙(ice)-해양(ocean)-파랑(wave)-퇴적물(sediment)-생지화학(ecosystem) 모델이 완벽하게 접합되어 있다 (Chen et al., 2013). 최근 FVCOM을 북극해에 적용하여 AO-FVCOM을 구축한 연구들이 발표되었다 (Gao et al., 2011; Chen et al., 2016; Zhang et al., 2016a, 2016b).

나. 모델 선정

본 연구에서는 북극해 해양 수치 모델로 FVCOM을 선정하였다. 선정된 이유에 대하여 간략히 서술하면 아래와 같다.

- (1) 수평적으로 비구조격자로 되어 있어서 비교적 저해상도 격자로 북극해 연안의 복잡한 해안선을 잘 재현할 수 있다.
- (2) 수직적으로 terrain-following curvilinear sigma- 및 s-coordinate로 되어 있어서 복잡한 수심구조를 잘 재현할 수 있다.
- (3) 수평격자를 grid generation 소프트웨어를 이용하여 용이하게 생성할 수 있다.
- (4) Semi-implicit solver를 옵션으로 선택하여 비교적 큰 time-step (Δt)을 사용할 수 있다 (계산시간이 빨라짐).
- (5) 해빙-해양-파랑-퇴적물-에코시스템 모델이 완벽하게 접합되어 있어서 향후 응용 연구가 매우 용이하다.

Table 1. Ocean model candidates for the Arctic Ocean

Model Option	MITgcm	NEMO	FESOM	FVCOM
Spatial Discretization Method	Finite Volume (Arakawa C-grid)	Finite Difference (Arakawa C-grid)	Finite Element	Finite Volume
Horizontal Coordinate	<ul style="list-style-type: none"> • Spherical • Cartesian 	<ul style="list-style-type: none"> • Spherical 	<ul style="list-style-type: none"> • Spherical • Cartesian 	<ul style="list-style-type: none"> • Spherical • Cartesian
Horizontal grid	Structured (Curvilinear)	Structured (Orthogonal Curvilinear)	Unstructured	Unstructured
Vertical Coordinate	z coordinate	Curvilinear generalized (s, z* coordinate)	Sigma-z hybrid	Curvilinear generalized (sigma, s coordinate)
Sea Ice model	Viscous-plastic (VP) dynamic-thermodynamic (Zhang and Hibler, 1997)	LIM2, LIM3	FESIM	Unstructured-Grid (UG) CICE
Tracer Horizontal Advection Scheme (time)	<ul style="list-style-type: none"> • 2nd-, 4th-order centered • 3rd-order upwind • 3rd-order DST • 2nd-order Flux Limiters • 3rd-order DST Flux limiter 	<ul style="list-style-type: none"> • 2nd-order centered • TVD • Upstream-Biased • QUICKEST 	<ul style="list-style-type: none"> • Explicit flux-corrected-transport (FCT) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2nd-order upwind (horizontal) • FCT-MPDATA (vertical)

2. 모델링 서버 구축

북극해 해양 수치 모델을 수립하기 위해서 하드웨어인 모델링 서버를 구축하여야 한다. 본 연구에서 구축한 서버의 구성도는 그림 1과 같고 이에 대한 설명은 아래와 같다.

가. 구성

- (1) 프로세서: 본 서버는 Dell사의 R730 랙 서버로서 18 개의 노드 코어를 가진 Intel E5 2697 V4 (2.3 GHz) 프로세서 2 개가 탑재되어 있어 총 36개의 노드 코어를 가진다.
- (2) 메모리: RDIMM 2400 RAM 총 128 GB이며 8 GB 짜리 6 개로 구성되어 있다.

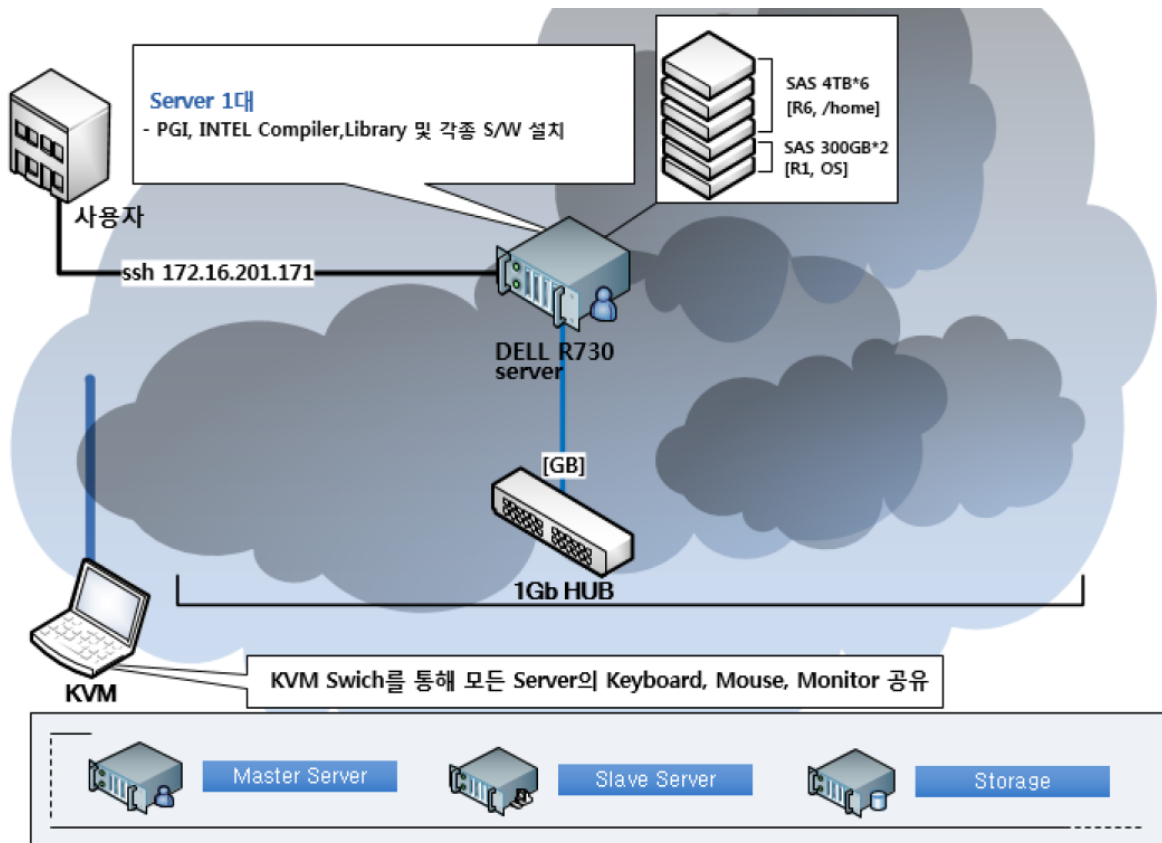


Figure 1. A schematic map of modeling server constructed

- (3) 하드 드라이브: 운용시스템용 SAS 300 GB 짜리 2개 (RAID1-OS)와 자료보관용 SAS 4 TB 짜리 6 개 (RAID6-home: 24 TB)로 구성되어 있다. 서버의 OS 볼륨은 RAID1으로 구성하여 디스크 1개의 장애를 극복할 수 있다. 서버의 내장 디스크는 RAID6로 구성하고 이를 /home에 마운트 되어 있고 이 공간은 서버의 기본 홈 디렉토리 생성 공간으로 사용된다.
- (4) 운용시스템 (OS: Operating System): 본 서버를 운용하는 시스템은 레드햇 계열의 CentOS 리눅스 release 6.8 버전이다. 'cat /etc/issue'를 통해 확인할 수 있다.
- (5) 프로그램들: 해양 수치 모델링을 수행하기 위한 FORTRAN, C (gfortran, 인텔 등) 컴파일러들이 설치되었고, 병렬처리를 위한 MPICH 와 openmpi 등이 설치되었다. 또한 병렬처리 수행을 위한 OpenPBS나 Torque와 같은 스케줄러가 설치되었다.

3. 모델 설치

가. FVCOM 코드 다운로드

FVCOM 모델은 메사추세츠 대학 모델 홈페이지 (<http://fvcom.smast.umassd.edu/>)에 접속하여 유저 가입 및 등록을 해야 다운로드가 가능하다. 유저 동의서를 제출하면 유저 ID와 패스워드를 부여받고 활성화된 FVCOM을 압축파일로 받을 수 있다. 압축된 파일은 tar 파일로 다음과 같이 압축을 풀 수 있다.

```
gunzip -c FVCOMxxx | tar xvf -
```

압축에서 풀어진 FVCOM의 기본적인 디렉토리 구조는 그림 2와 같다.

나. METIS 라이브러리 컴파일

METIS는 병렬화된 FVCOM 코드를 실행하기 위해 모델 영역을 나누는 그래프 분할 라이브러리 (graph partitioning library)이다. 이 라이브러리를 컴파일하기 위해서는 METIS 소스 디렉토리에 가서 makefile을 모델 서버 환경에 맞게 수정하고 'make'를 실행하면 된다. 컴파일이 성공적으로 이루어지면 'libmetis.a' 파일이 생성되고, 이 파일은 향후 FVCOM 컴파일시 연결된다. 이 파일은 다중 프로세서로 FVCOM을 수행할 때 꼭 필요한 파일이다.

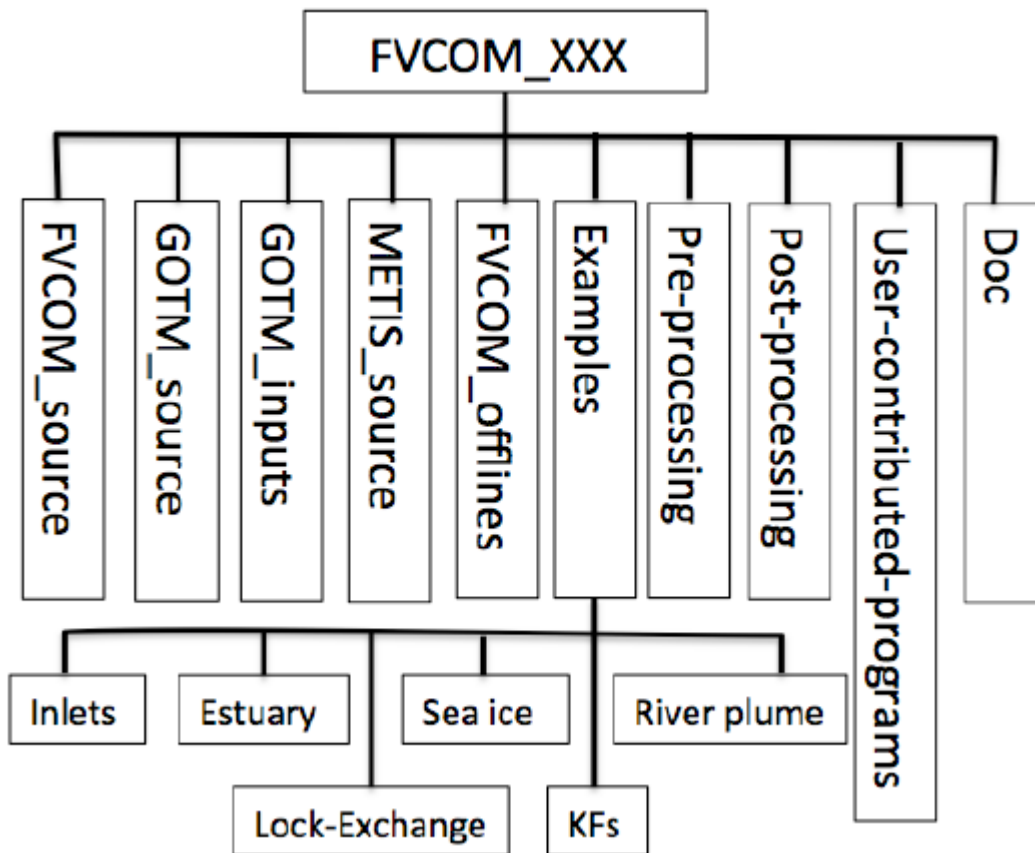


Figure 2. FVCOM directory structure (Chen et al., 2013)

다. FVCOM 컴파일

본 연구에서는 최신 버전 4.0을 가지고 모델링을 수행하였다. 버전 4.0은 current-wave interaction, ocean-ice interaction, current-wave-sediment interaction, nesting modules과 같은 새로운 모듈들을 포함하고 있다. FVCOM 컴파일은 기본적으로 2가지 옵션을 가진다: 1) 자동, 2) 수동. 자동적인 컴파일은 'configure.sh' 셸 스크립트를 실행하여 'make.inc'를 자동적으로 생성한다. 단일 프로세서를 이용한 경우 './configure.sh series'를, 다중 프로세서를 이용한 경우 './configure.sh parallel'를 타입하면 된다. 이 과정은 'make.inc' 파일 내에 "TOPDIR", "LIBDIR", "INCDIR" 등 컴파일에 필요한 FVCOM 디렉토리, 라이브러리 설치 디렉토리, include 설치 디렉토리를 자동적으로

로 설정해 준다. 수동 설치는 직접 'make.inc' 파일을 수정하여 위에 언급한 "TOPDIR", "LIBDIR", "INCDIR"을 설정한다. 또한 코드 모듈 (FLAG_1, FLAG_2, ..., 등) 활성화는 '#'을 삭제(활성)하거나 첨가(비활성)하는 형식으로 한다 (기본적인 설명은 FVCOM 유저 매뉴얼을 참고: Chen et al., 2013).

컴파일시 기존의 모든 object 파일과 실행 파일을 제거하려면 'make clean'을 실행해 준다. 컴파일은 'make'로 실행하며 성공적으로 수행되면 'fvcom'이라는 실행 파일이 생성된다.

라. 인풋(input) 파일 준비

FVCOM 버전 4.0에서는 2가지 타입의 인풋 파일 형식이 있다. 첫 번째가 ASCII 포맷으로 "CASENAME_grd.dat", "CASENAME_dep.dat", "CASENAME_cor.dat", "CASENAME_mc.dat", "CASENAME_bfw.dat" 등이 있으며 파일 내 첫줄 혹은 두 번째 줄에 헤더 정보가 필요하다. 예를 들면 "Node Number = xxxx", "Cell Number = xxxx" 등이다. 스폰지 경계조건 파일 "CASENAME_spg.dat"의 경우는 헤더에 "Sponge Node Number = xx" 같이 스폰지 노드 수 정보가 필요하다. 두 번째 파일 형식은 NetCDF 형식이다. 위에 언급한 '.dat' 이외의 인풋 파일은 '.nc' 파일로 이루어져야 하고 FVCOM 소스코드와 함께 제공되는 전처리(pre-processing) 패키지에 '.nc' 파일 생성 코드가 포함되어 있다. 최신 버전에는 MATLAB pre-processing programs가 같이 제공되고 있다. 자세한 내용은 chapter 4에서 다루기로 하겠다.

마. FVCOM 실행

단일 프로세서(serial)를 이용할 경우, 컴파일 후 생성된 'fvcom' 과 casename 옵션을 같이 사용한다. 실행 명령은 다음과 같다.

```
./fvcom --casename=YOUR CASENAME
```

예를 들어, Gulf of Maine (GOM) 모델 수행 시, 아래와 같이 'YOUR CASENAME'으로 'gom'을 선택하면 된다.

```
./fvcom --casename=gom
```

다중 프로세서(parallel)를 이용할 경우, MPI (Message Passing Interface) 혹은 openMPI 프로그램이 설치되어 있는 상태에서 mpiexec 명령을 다음과 같이 수행하면 된

다.

```
./mpirun -n CPU_number ./fvcom --casename=YOUR CASENAME
```

4. 모델 인풋 파일 생성

가. 모델 격자

모델 수평 격자를 생성하기 위해서는 연구 해역의 수심 자료와 연안선 자료가 필요하다. 수심 자료, 연안선 자료, 수평 격자 생성에 대하여 간략하게 설명하고자 한다.

(1) 수심자료

International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) 버전 3.0 수심 자료를 IBCAO 홈페이지(www.ibcao.org)에서 다운로드 받을 수 있다. 또한 4 가지 다른 Digital Bathymetric Models (DBM) 자료를 GMT netCDF 포맷 (<http://gmt.soest.hawaii.edu/>)과 ESRI ARC 그리드 포맷으로도 다운로드 받을 수 있다. 본 연구에서 사용한 DBM 자료는 'IBCAO_V3_500m_RR' 자료로, 멀티빔, 싱글빔, 육지 자료를 500m x 500m 해상도로 되어 있다 (Jakobsson et al., 2012). 자세한 정보는 다음과 같다.

- Resolution: 500 x 500 m grid cells
- Projection: Polar stereographic,
true scale: 75° N
scale factor: 0.982966757777337
latitude of origin: 90° N
longitude of origin: 0°
- Horizontal Datum: WGS84
- Vertical Datum: Mean Sea Level
- Extent (Polar stereographic coordinates): Easting -2904000 to 2904000;
Northing -2904000 to 2904000
- Grid dimension: 11,617 x 11,617

(2) 연안선 자료

연안선 자료는 Global Self-consistent Hierarchical High-resolution

Shorelines (GSHHS) 자료는 사용하였다. 웹사이트에서 shape 형식으로 다운로드 받거나, MATLAB의 M_MAP 패키지에서 'M_GSHHS_I' function을 쓰면 intermediate 해상도의 연안선을 저장할 수 있다.

(3) 수평 격자 생성

앞서 언급한 수심 자료와 연안선 자료가 준비가 되면 SMS (Surface-water Modeling System)를 이용하여 비구조 수평 격자를 생성할 수 있다. 다운로드한 연안선 shape 파일을 맵 모듈에서 불러온다. 이 연안선 자료는 위도, 경도 체계로 되어 있기 때문에 수심 자료 (polar stereographic 체계)를 불러오기 위해서는 'Display->Projection' 메뉴를 이용하여 polar stereographic 체계로 변환한다. 변환된 체계에서 'IBCAO_V3_500m_RR' ASCII 자료를 스캐터 모듈로 불러오면 된다. 맵 모듈의 옵션은 'Generic Model'로 설정하면 'Feature Objects' 메뉴에서 'Build Polygons'를 이용하여 폴리곤 선택이 가능하다. 선택한 폴리곤에서 마우스 왼쪽 버튼 더블 클릭을 통해 2D Mesh Polygon Properties를 조정할 수 있다. Mesh Type으로는 Paving, Bathymetry Type에서는 불러온 수심 스캐터를 선택하면 메쉬 노드에 자동적으로 수심이 'Map -> 2D Mesh'를 이용하여 메쉬 모듈에서 2차원 메쉬 그리드를 생성할 수 있다. SMS로 생성된 북극해 모델 수평 격자는 그림 3과 같다. 수평 격자 해상도는 10~25 km 이고, 총 노드 수는 24,246 개, 총 셀 수는 47,331 개로 구성되어 있다. 수평 격자 생성 시, 모델 수행 시간 단축을 위하여 캐나다 쪽에 위치한 Canadian Arctic Archipelago 지역을 무시하였고 최대 수심을 3,000 m 까지만 고려하였다. 즉, 3,000 m 보다 깊은 수심을 3,000 m로 수정하였다.

(4) 수직 격자 생성

수직 격자는 순수 sigma 그리드로 생성하였고, 해상도는 0.5~75 m로 총 41개의 레벨로 구성되어 있다 (그림 4). 수직 격자 정보는 'AO_run_sigma.dat' 파일에서 확인할 수 있으며, 아래와 같은 정보로 구성되어 있다.

NUMBER OF SIGMA LEVELS = 41

SIGMA COORDINATE TYPE = UNIFORM

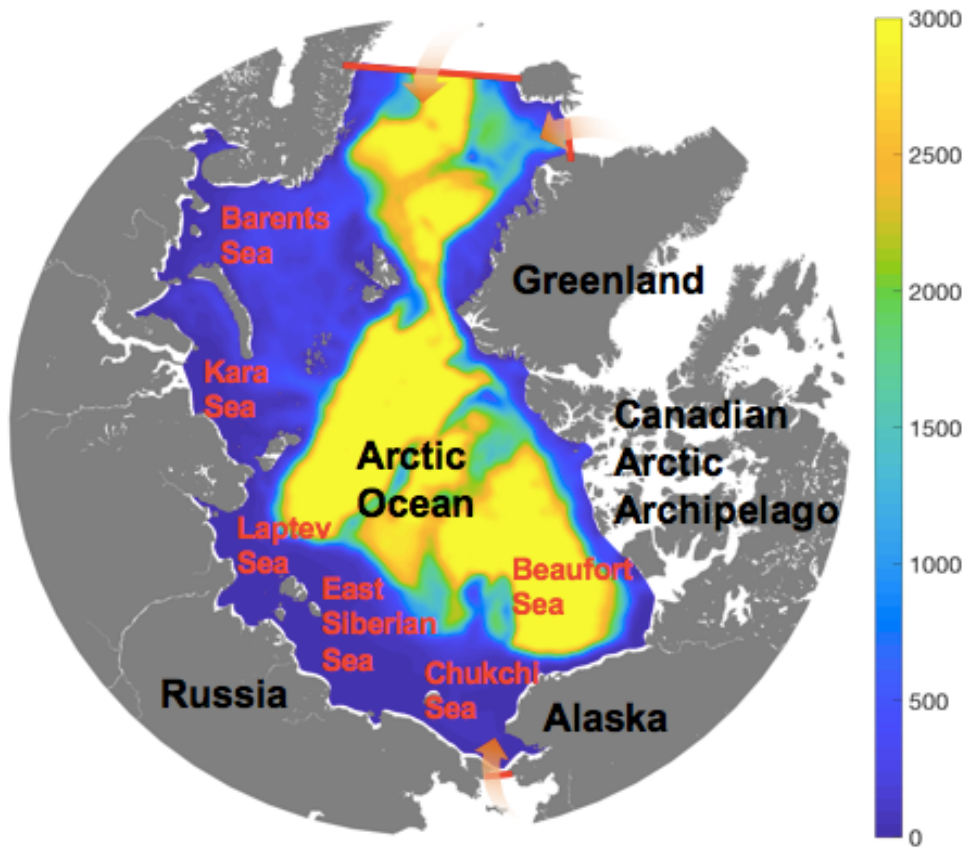


Figure 3. A horizontal model grid for the Arctic Ocean with the colored bathymetry.

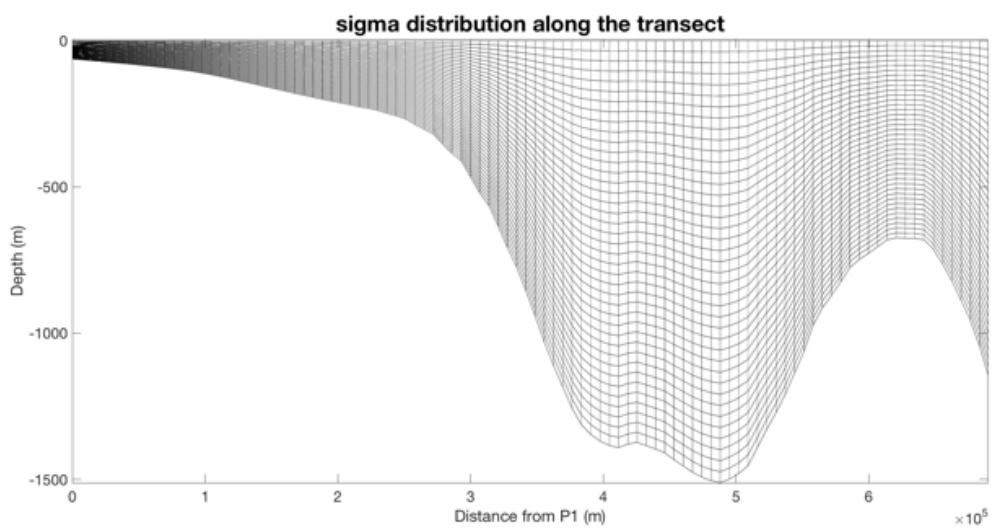


Figure 4. A vertical grid structure of sigma distribution along a transect.

나. 모델 초기조건

(1) 해면고도 (SSH: Sea Surface Height)

모델 영역에서 해면고도의 초기조건으로 사용된 자료는 AVISO gridded 자료이다 (<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/sea-surface-height-products/global/index.html>). NASA에서 직접 제공한 인공위성 관측 자료를 모델 사용에 맞게 재처리한 자료이다. 1992년 10월부터 2010년 12월까지의 월간 자료이며 해상도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 이다. 지구 전 해역에 걸쳐 SSH 자료를 제공한다. 그림 5는 월간 SSH 분포의 예를 보여주고 있다. 초기조건은 1992년 10월부터 2010년 12월까지의 SSH 월간 자료를 평균하여 사용하였다.

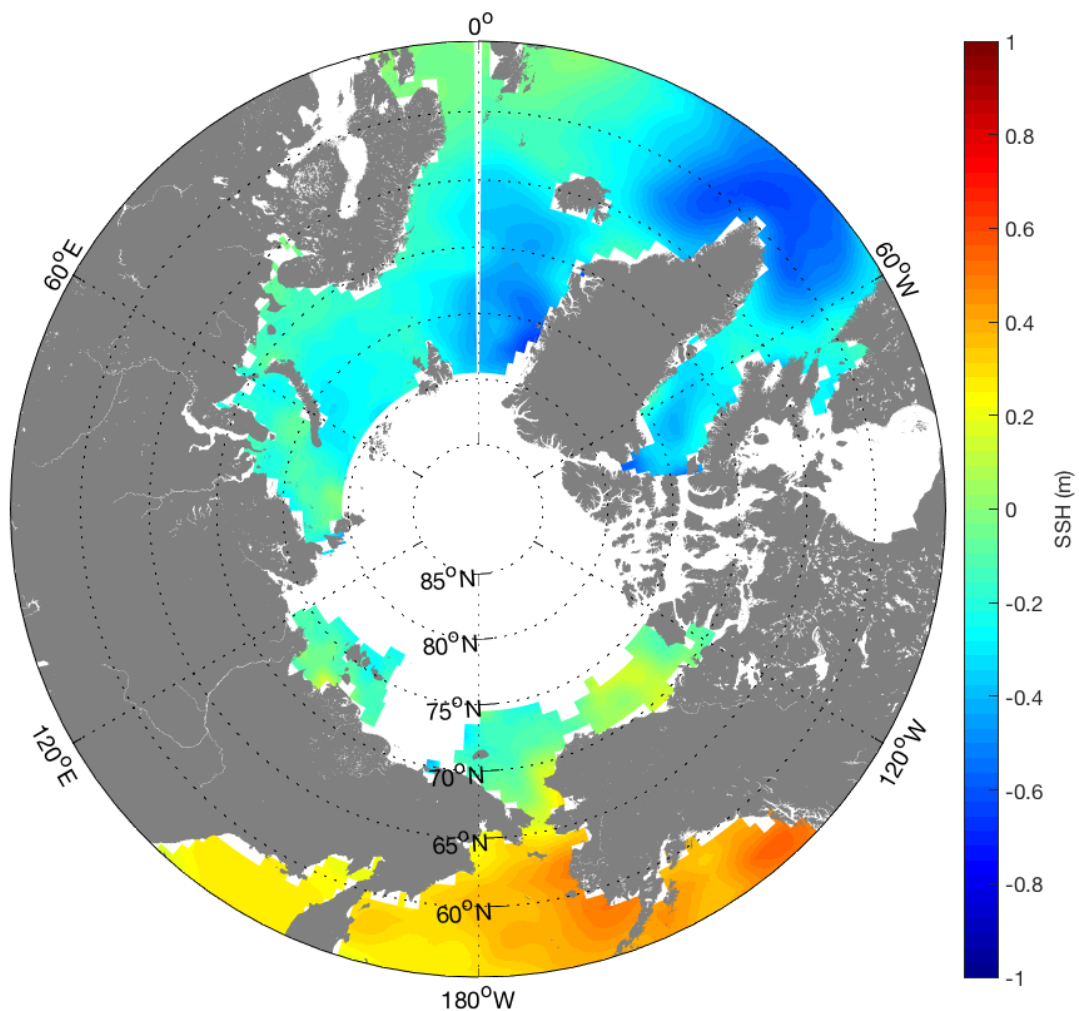


Figure 5. A plot of monthly AVISO SSH for March 1993.

(2) 수온 및 염분

수온과 염분의 초기조건 (IC: initial condition)으로 Met Office Hadley Centre에서 제공하는 EN4 (<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>) 자료를 사용하였다. EN4 자료는 주로 WOD09 (World Ocean Dataset 09)의 수온 및 염분 자료를 이용하여 objective analysis (OA)를 통해 재처리한 것이다 (Good et al., 2013). 그림 6은 EN4 자료의 quality control (QC) 처리 과정을 보여주고 있다. WOD09 자료 뿐만 아니라 Argo, ASBO (Arctic Synoptic Basin wide Oceanography), GTSP (Global Temperature and Salinity Profile Program) 자료들도 사용되었다. QC된 수온과 염분 수직 구조 자료는 OA를 통해 재처리되는데 그 과정에서 Analysis Correction (AC) 스킴이 사용되었다. 여기서 AC 스킴은 최적내삽 (OI: Optimal Interpolation) 등식을 반복적으로 푸는 방법이다. EN4는 EN 자료셋의 버전 4로서, 자료의 불확실성 (uncertainty) 어림값을 처음으로 제공하고 있다. 이렇게 제공되는 월간 수온 및 염분 자료를 가지고 1981년부터 2016년까지 평균하였고 그림 7은 수심 5 m와 100 m 에서 평균 수온과 염분의 수평 분포를 그린 것이다. 이 자료 값이 북극해 spinup 모델 시뮬레이션의 수온과 염분의 초기조건으로 사용된다.

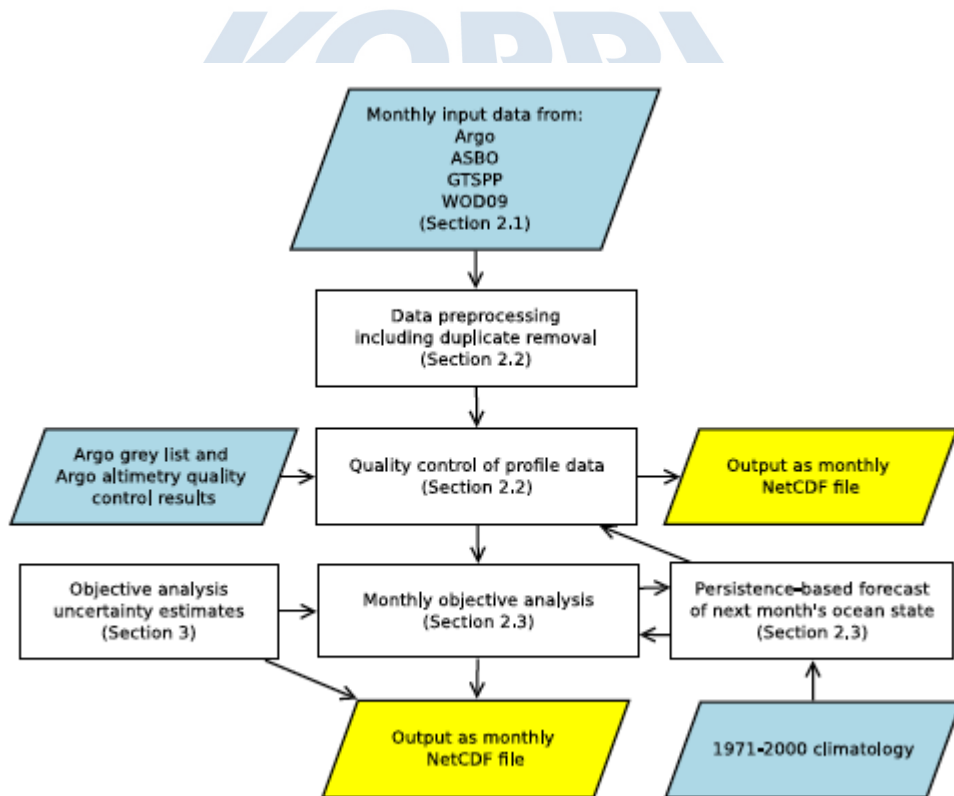


Figure 6. A flow chart for processing performed on the EN4 data (Good et al., 2013).

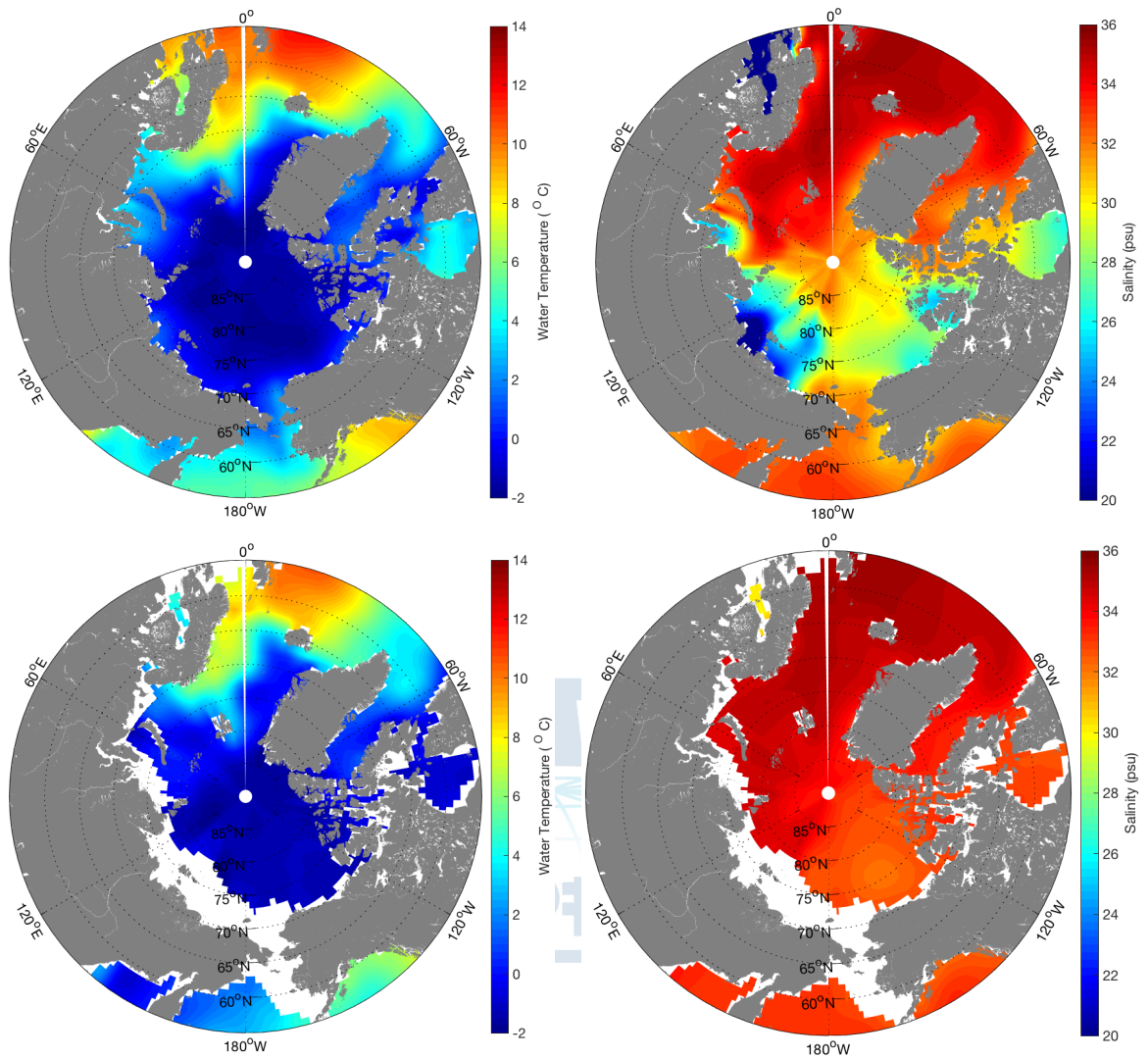


Figure 7. Plots of 1981-2016 mean ocean temperature (left) and salinity (right) at 5 m (upper) and 100 m (lower) depths.

다. 모델 경계조건

경계조건 (BC: boundary condition)은 크게 표면경계조건 (SBC: surface boundary condition), 개방경계조건 (OBC: open boundary condition), 그리고 하천경계조건 (RBC: river boundary condition)으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 하천을 고려하지 않기 때문에 앞 2 가지 경계조건에 대해서만 서술하기로 하겠다.

(1) 표면경계조건

표면경계조건은 주로 해표면에서 입력되는 대기 외력 조건을 의미한다. 기본적으로 대기압, 바람, 기온, 태양복사열 등으로 이루어진다. 대기 외력을 위한 자료는 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 재분석 자료와 Wood Hole Oceanographic Institute (WHOI)에서 제공하는 OAFlux (Objectively Analyzed Air-sea Heat Fluxes) 자료는 사용하였다 (<http://oaflux.whoi.edu/>). 대기압과 바람, 상대습도, 기온 등은 NCEP에서, 해표면에서의 열수지 (net heat flux: Q_{net})에 관련된 longwave/shortwave solar radiation, latent heat, sensible heat 등과 같은 변수는 OAFlux 자료에서 얻어진다. OAFlux에서는 COARE (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) bulk flux 알고리즘 3.0 (Yu et al., 2008) 식을 이용하여 열수지 변수를 계산한다. 그림 8은 1981년부터 2010년까지 평균한 월별 기후학적 대기 외력장 (해표면 기압, Q_{net} , 10 m에서의 풍속 성분)의 예를 나타낸 것이다.

(2) 개방경계조건

북극해 모델 수평 격자(그림 3)에서 볼 수 있듯이, 해양 개방경계는 3 곳으로 구성되었다. 그린란드와 아이슬란드 사이 데이비드해협, 아이슬란드와 유라시아대륙 사이 대서양과 노르웨이해가 만나는 경계, 그리고 태평양과 서북극해가 만나는 베링해협이다. 세 개방경계에서의 조석 (조위), 수온, 염분에 대한 경계조건을 서술하겠다.

- ① 조석 개방경계조건: 일본 National Astronomical Observatory (NAO)에서 개발한 전지구 해양 조석모델 (Global ocean tide model: NAO.99b; Matsumoto et al., 2000)은 0.5° 간격으로 주요 16 개 조석 (조위) 분조에 대한 amplitude와 phase 값을 제공한다. 16개의 주요 분조는 M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1, M1, J1, OO1, 2N2, Mu2, Nu2, L2, T2 이다. 본 연구에서는 M2 분조에 대해서만 모델 수행을 하였기 때문에 개방경계 격자 노드에서 M2에 대한 amplitude와 phase 값을 선형내삽법을 사용하여 모델 격자에 부여하였다.
- ② 수온-염분 개방경계조건: 미국 해군에서 운용 중인 HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) 예측 시스템 자료 중 북극해에 해당되는 ARCC0.08 Experiment 11.0 ($1/12^\circ$ Arctic Cap HYCOM/CICE/NCODA) 자료를 사용하

였다 (<ftp://ftp.hycom.org/datasets/ARCC0.08/expt-11.0/data/>). 현재 1993년부터 2015년까지 일별 수온, 염분의 수직분포를 0.08° 간격으로 제공하고 있다. 그림 9는 ARC HYCOM 홈페이지에서 제공하는 표층수온과 표층염분의 분포 예이다 (<http://www7320.nrlssc.navy.mil/hycomARC/arctic.html>).

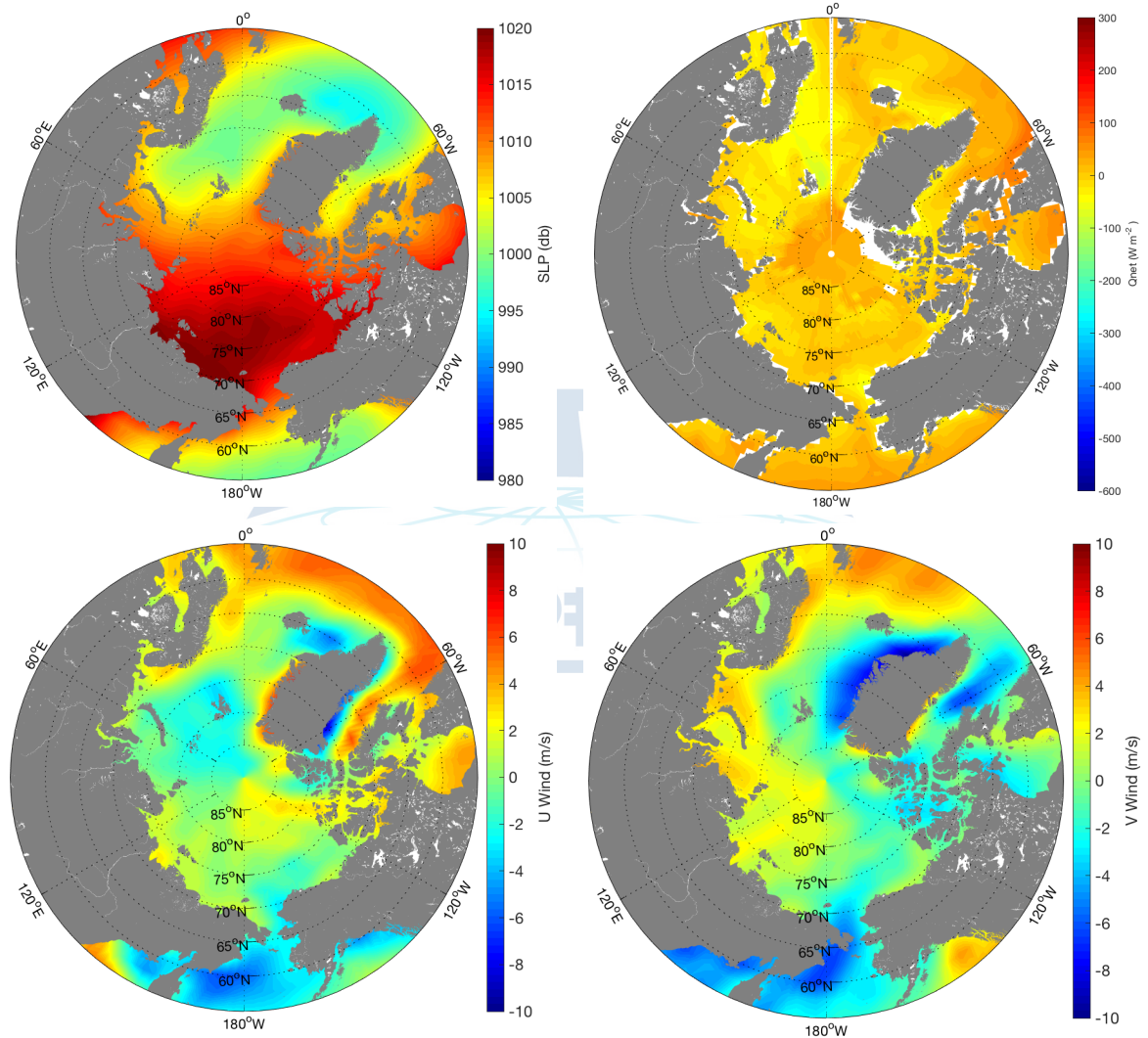


Figure 8. Climatological atmospheric forcing fields as surface boundary conditions: sea level pressure (SLP) for January (upper left), net heat flux (Qnet) for September (upper right), U wind (U10) for January (lower left), and V wind (V10) for January (lower right).

ARCc0.08-04.6 Sea surface temperature (C): 20170830

ARCc0.08-04.6 Sea surface salinity (psu): 20170830

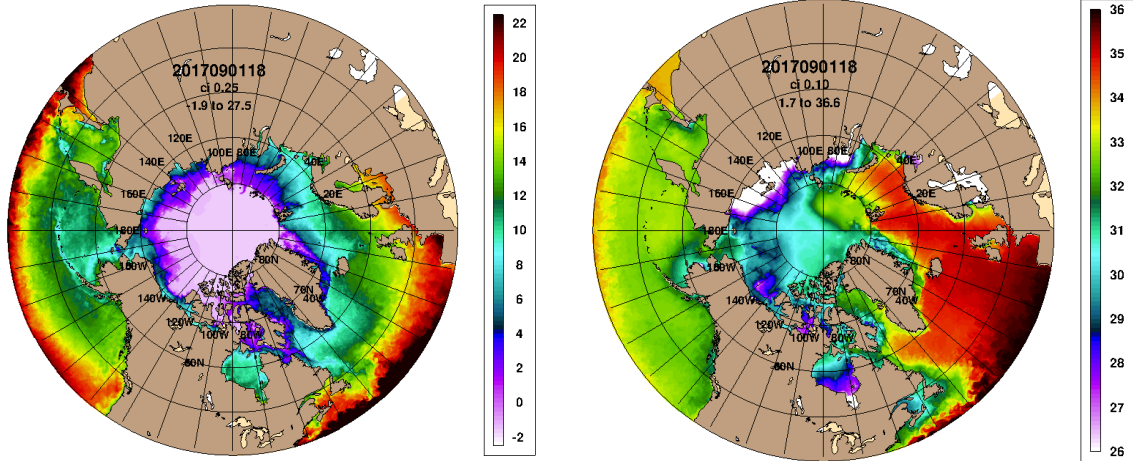


Figure 9. Snap shots of sea surface temperature (left) and sea surface salinity (right) from ARCC0.08 HYCOM simulation for 18h September 01, 2017.

5. 모델 셋업 (setup) 및 모수화 (parameterization)

가. 모델 안정화를 위한 spinup 시뮬레이션

앞서 기술한 초기조건과 경계조건을 가지고 안정화를 위하여 5년간의 spinup 시뮬레이션을 수행하였다. 해빙 (sea-ice) 옵션이 포함되면 안정화 기간이 적어도 40년은 필요하고 본 연구의 목적은 태평양기원수의 변동성 진단이기 때문에 해빙 모듈은 제외하고 모델을 수행하였다. 모델 셋업 및 모수화에 대한 요약은 아래와 같다.

- Spinup 시간: 360 x 5 (일)
- Time step
 - external: 50 초
 - internal: 150 초 (nsplit=3)
- 수평 격자: 노드 24,246 개, 셀 47,331 개
- 수직 격자: 41 레벨 (최대 수심: 3,000 m)
- 혼합스킴
 - 수평 혼합: 수평 혼합 계수는 Smagorinsky 스킴으로 모수화 된다 (Smagorinsky, 1963).
 - 수직 혼합: Mellor and Yamada (1982) level-2.5 (MY25) turbulent closure 스킴에서 수직 혼합 계수가 모수화 된다.

- 마찰계수

- 바닥: 바닥 응력 (bottom stress)은 x, y 방향으로 아래와 같은 식에서 계산된다.

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \sqrt{u^2 + v^2} (u, v), \quad (1)$$

$$C_d = \max\left(k^2 / \ln\left(\frac{z_{ab}}{z_0}\right)^2, 0.0025\right), \quad (2)$$

여기서 C_d 는 바닥 마찰 계수, k 는 von Karman 상수 (=0.4), Z_{ab} 는 모델 수직격자에서 바닥부터의 높이, Z_0 는 bottom roughness (= 1 cm)이다. 바닥 마찰 계수 값이 0.0025 보다 작을 경우 0.0025 값으로 사용하였다.

- 표면: 해표면에서의 응력은 아래와 같이 x, y방향의 internal Reynolds stress와 균형을 이룬다는 가정으로 계산되었다.

$$K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o} (\tau_{ix}, \tau_{iy}), \quad (3)$$

여기서 K_m 은 vertical eddy viscosity 계수이고 $K_m = lqS_m$ 와 같이 MY25 turbulent closure 스킴에서 모수화 된다. 그리고 S_m 은 안정화 함수 (stability function)으로 아래와 같이 정의된다.

$$S_m = \frac{0.4275 - 3.354G_h}{(1 - 34.676G_h)(1 - 6.127G_h)}, \quad (4)$$

여기서 $G_h = (l^2 g / q^2 \rho_o) \rho_z$ 이다. 불안정한 상태일 때 G_h 의 상한 값은 0.023이고 안정한 상태일 때 하한 값 -0.28을 가진다 (Chen et al., 2003).

- 초기조건

- 수온, 염분: Met Office EN4 기후학적 자료 (1981년~2016년 평균)
 - SSH: AVISO 기후학적 자료 (1992년~2010년 평균)

- 경계조건

- 표층경계: 고려사항 - 기압, 바람 (NCEP, OAFflux); 비고려사항 - 열교환, 증발/강우, 해빙
 - 개방경계: 조석 - NAO99b (global NAO), 수온 및 염분 - HYCOM reanalysis
 - 하천경계: 고려하지 않음

- 나머지 모델 셋업과 변수들에 대한 모수화는 FVCOM 사용자 매뉴얼 (Chen et al., 2013)에서 권유하는 방법으로 수행되었다.

6. 모델 결과 비교

가. 조석 (조위)

본 연구에서는 조석 성분은 M2만 고려하였기 때문에 M2에 대한 검증을 수행하였다. 실제로 북극해는 해빙으로 덮여있기 때문에 연안 조위 관측소 이외에는 검증이 불가능하기 때문에 조위 관측소 자료를 사용하여 만들어진 조석 모델 결과와 검증을 수행하는 것이 합당하다고 판단된다. Earth and Space Research (ESR: <http://www.esr.org/>)에서 개발한 Arctic Ocean Tide Inverse Model (AOTIM)은 공간적으로 5-km 해상도의 Arctic assimilation model를 가지고 있다. 이 모델은 북극해 주변 연안의 300 여개의 조위 관측소의 관측 자료와 ERS, TOPEX/Poseidon 인공위성 레이더 altimetry 자료를 동화하였다 (Padman and Erofeeva, 2004).

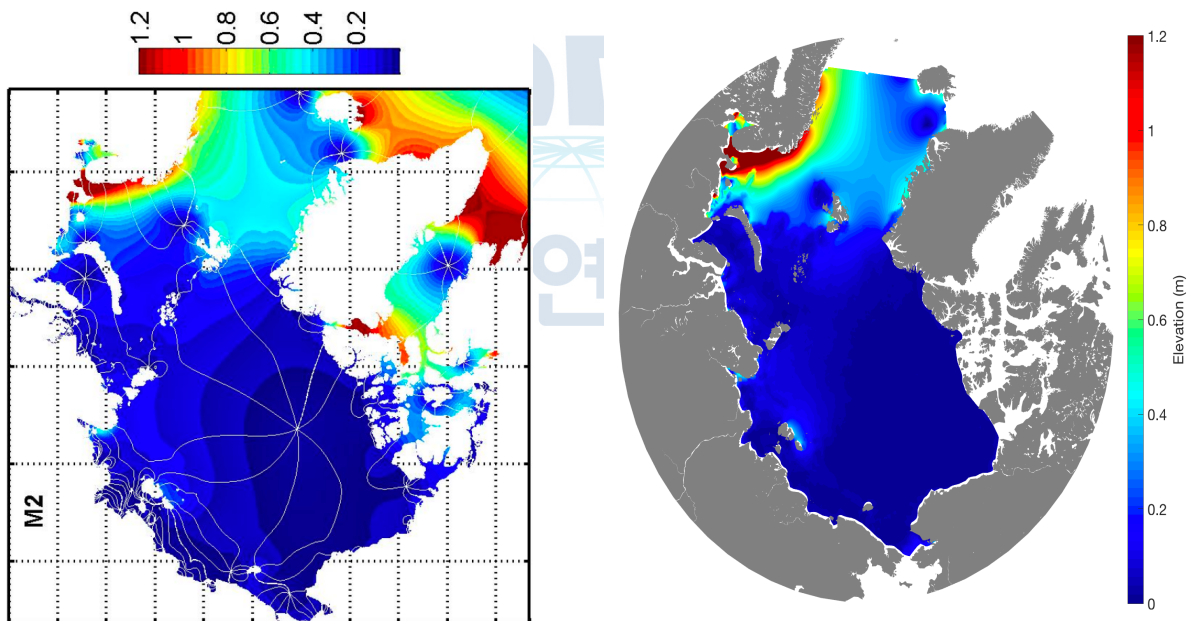


Figure 10. Co-tidal amplitude chart of M2 tidal constituent: ESR-AOTIM (left) and FVCOM (right).

그림 10은 조석 조화 분해 성분 M2에 대한 AOTIM 수행한 결과와 FVCOM의 결과를 비교한 것이다. 색으로 그려진 M2의 co-tidal amplitude를 보면, 먼저 대서양 노르웨이해 개방경계에서 동쪽 노르웨이연안 쪽은 진폭 (amplitude)가 크고 반대로 서쪽인 아이슬란드 섬 쪽은 진폭이 작다. 그리고 아이슬란드와 그린란드 사이 해협에서도 진폭이 작게 나타난다. 유라시아 대륙의 서쪽에 위치한 바렌트해와 카라해에서는 진폭이 최대이

다. 이러한 AOTIM의 co-tidal amplitude의 특성을 FVCOM이 잘 재현하고 있음을 볼 수 있다. 대서양쪽 2 곳 개방경계 근처와 스발바도 군도 근처, 서북극해 보퍼트해 북부에서 무조점 (co-tidal phase가 0이거나 co-tidal amplitude가 최저인 곳)이 나타나는데, FVCOM이 이곳들 또한 잘 재현하고 있다.

나. 수온 및 염분

수온과 염분에 대해서는 EN4 자료를 1981년부터 2016년까지 평균하여 초기조건으로 사용하고 해표면 열교환, 해빙 모듈, 하천개방경계를 고려하지 않은 ideal한 경우로 모델 spinup을 수행하였기 때문에 비교할 만한 관측자료 혹은 모델자료가 존재하지 않는다. 따라서 시뮬레이션 1년 후 수온, 염분 공간 분포와 초기조건으로 사용한 EN4 기후학적 자료 결과를 비교해 보았다 (그림 11). 하천유입을 고려하지 않았기 때문에 러시아 대륙과 캐나다 대륙 연안쪽에서의 비교적 낮은 염분은 연안류에 의해 많이 사라진 분포를 보인다. 그린란드 동쪽 연안을 따라 저온저염의 해수가 대서양쪽으로 빠져나가는 것이 보이고 고온고염의 대서양수가 유입되고 있음을 알 수 있다. 태평양쪽 베링해협에서는 EN4 분포만큼은 아니더라도 1-2°C 정도의 태평양기원수가 유입되고 있음을 볼 수 있다.

본 보고서에서는 나타내지 않았지만 5년 spinup 후에는 열교환, 해빙, 하천 효과를 고려하지 않은 이유로 대서양의 고온고염의 해수가 서북극해쪽으로 많이 확산되어 나타나고 있고 초기의 수직적 성층이 비교적 많이 혼합되어 나타나고 있음을 알 수 있었다. 향후 열교환, 해빙, 하천 효과를 모두 고려한 시뮬레이션을 수행할 경우 최소 40년의 spinup을 할 계획이며 EN4 수온 및 염분, 수직 혼합 및 성층 등 북극해 해수의 물리적 특성을 잘 재현할 수 있으리라 사료된다. 따라서 본 연구에서는 5년 spinup이 본 연구 목적에 부합하게 충분히 모델 수온과 염분을 안정화하였다는 가정 하에 주요 영향 요인에 따른 시나리오를 구성하여 연구를 진행하기로 하였다.

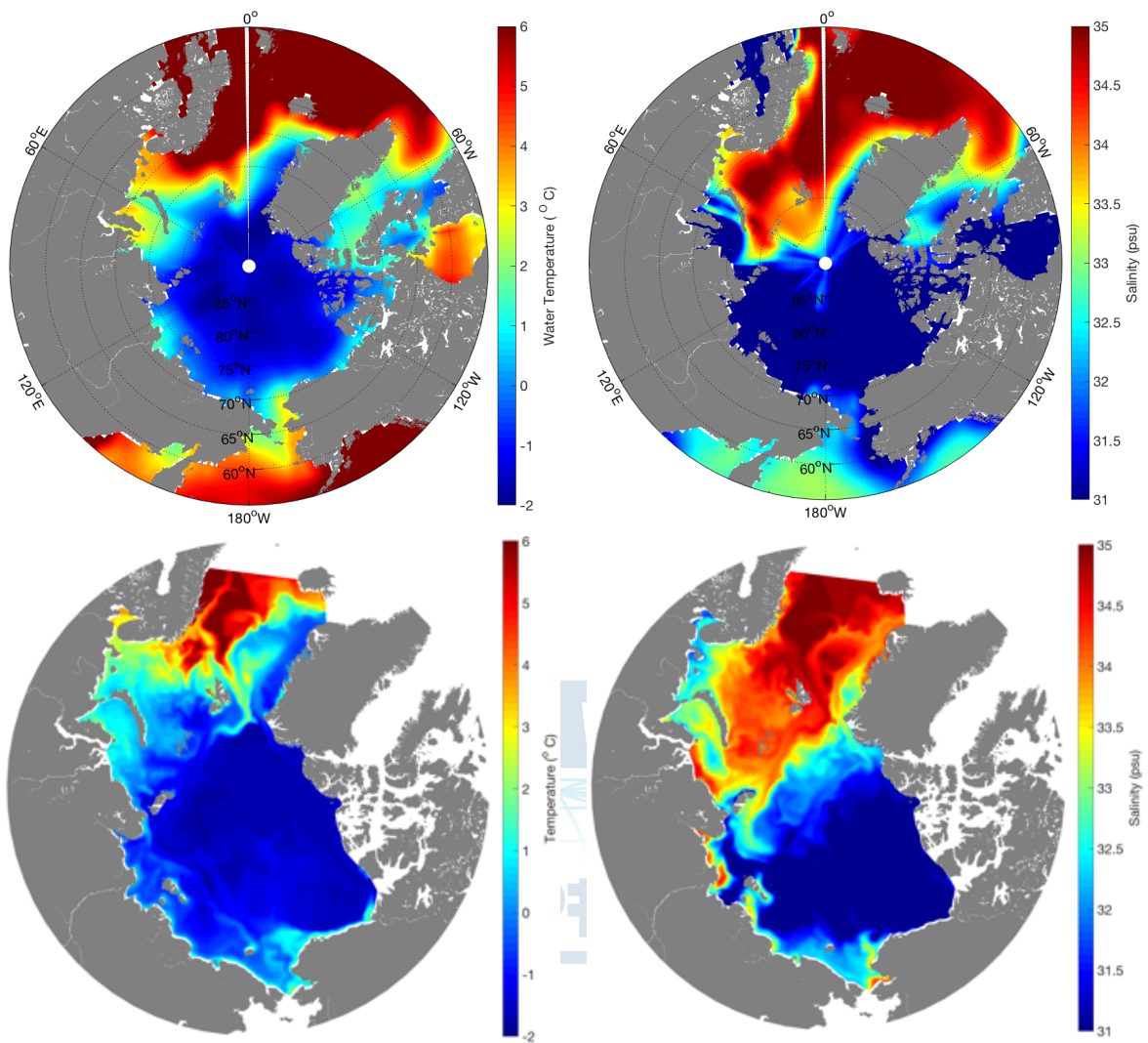


Figure 11. Comparisons of water temperature (left) and salinity (right) at 5 m between EN4 climatology as ICs (upper) and FVCOM (lower) after 1 year simulation.

제 2 절 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단

1. 관측 자료를 토대로 한 태평양기원수의 변동성 진단

가. 관측 자료 수집

진단 모델 수행에 앞서 관측 자료를 토대로 하여 서북극해 연구 해역에서의 태평양기원수의 변동성을 파악해 보려고 한다. 연구소의 ‘북극해 환경변화 통합관측 및 활용연구’ 과제에서 수행된 아라온 북극해 하계 탐사 동안, 척치보더랜드 해역에서 CTD를 이용하여 해수 특성을 관측하였다. 그림 12는 2010년부터 2017년까지 하계 기간 동안 수행된 CTD 관측 정점들을 나타낸 그림이다. 최근 이 해역에서의 연간 해빙면적 변동성이 두드러지게 관측되었기 때문에 그 변동성의 원인을 파악하려는 연구가 수행되고 있다.

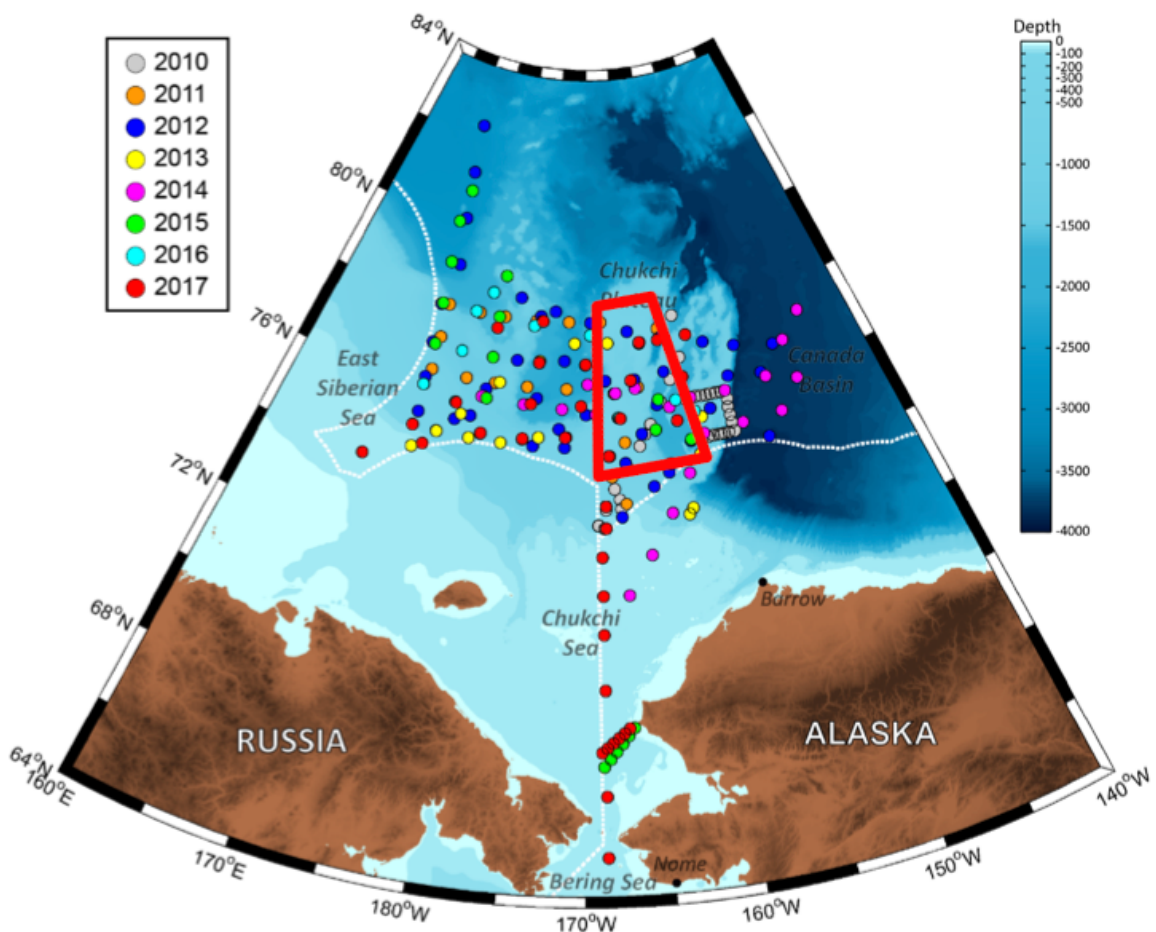


Figure 12. A map of CTD stations around the Chukchi Borderland from 2010 to 2017.

나. 관측 자료 분석

수집된 CTD 자료를 가지고 연구 해역에서의 해수 수괴를 구분하고자 수온-염분 다이어그램을 그려보았다 (그림 13). 표층혼합층을 제외하면 크게 3가지 수괴로 구분되어 있는데 비교적 고온저염의 태평양여름수 (Pacific Summer Water: PSW), 저온의 태평양겨울수 (Pacific Winter Water: PWW), 그리고 비교적 고온고염의 대서양수 (Atlantic Water: AW)이다. 매년 여름철 수괴들의 변동성과 중앙 북극해를 포함한 척치해에서의 해빙면적의 연간 변동성을 비교해 보았다. 아노말리 분석 결과, 해빙면적 변동성과 의미적인 상관성을 갖는 변수는 태평양여름수의 수온과 표층혼합층 용빙수의 염분이 각각 음의 상관관계와 양의 상관관계를 보였다 (그림 14). 태평양여름수의 수온과는 상당히 높은 상관계수($R^2=0.91$)를 보였다.

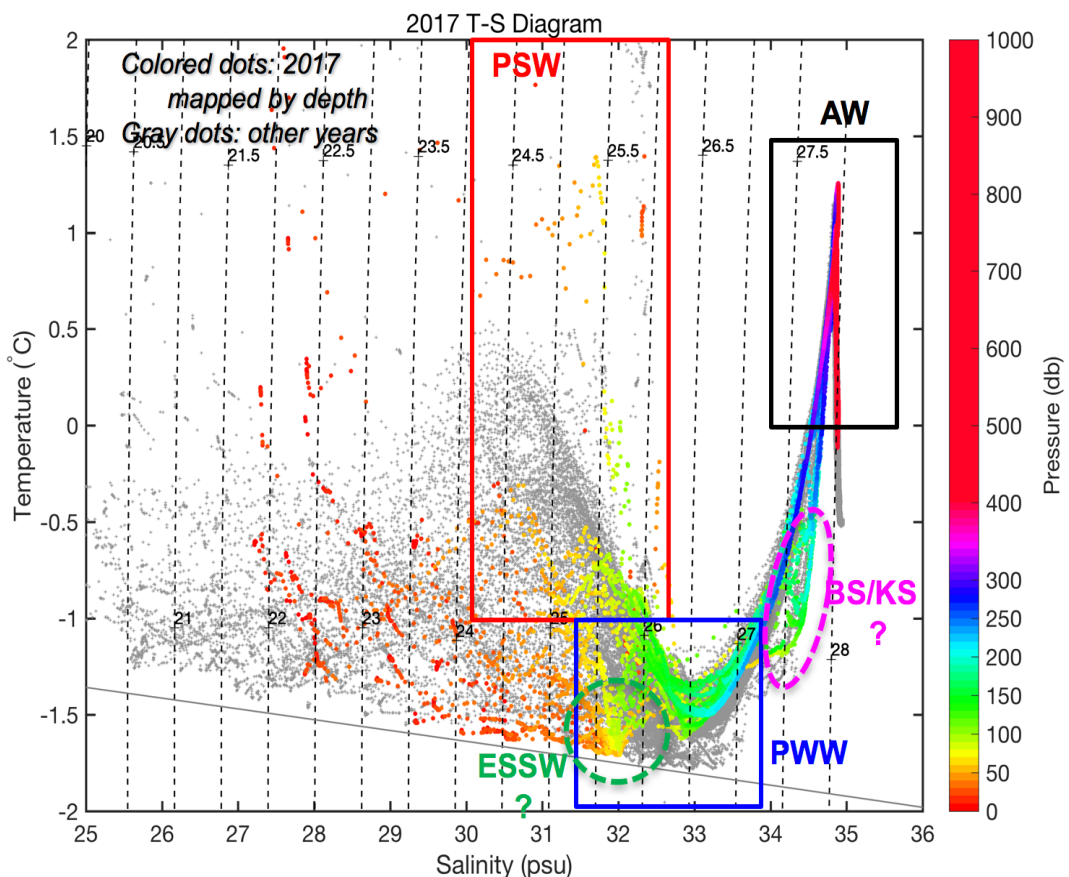


Figure 13. A diagram of potential temperature (θ) - salinity (S) from CTD data (PSW-Pacific Summer Water; PWW-Pacific Winter Water; AW-Atlantic Water; ESSW-East Siberian Shelf Water; BS/KS-Barents Sea/Kara Sea).

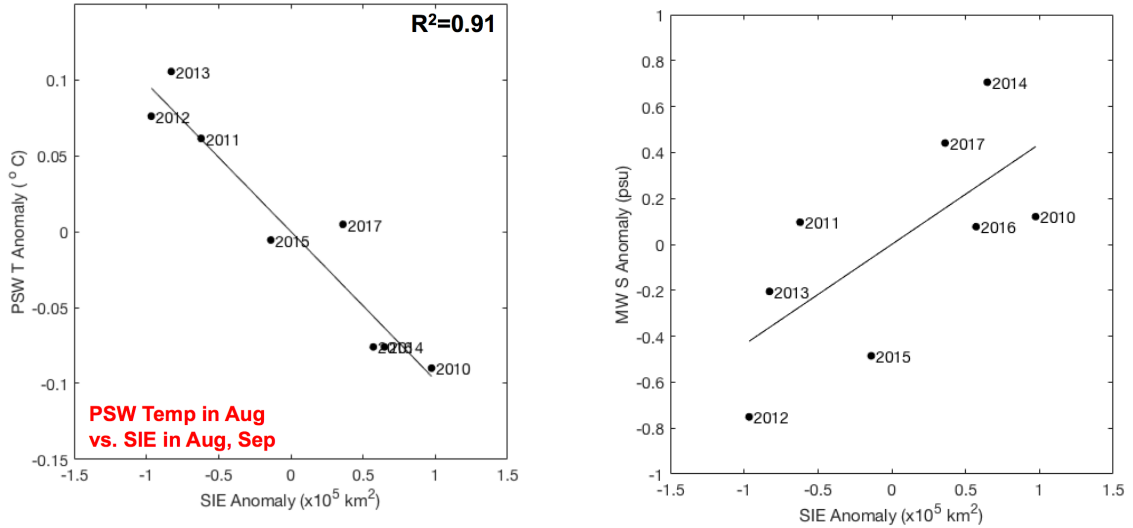


Figure 14. Anomaly correlation between individual variables from 2010 to 2017: sea ice extent vs. PSW temperature (left), sea ice extent vs. MW salinity (right).

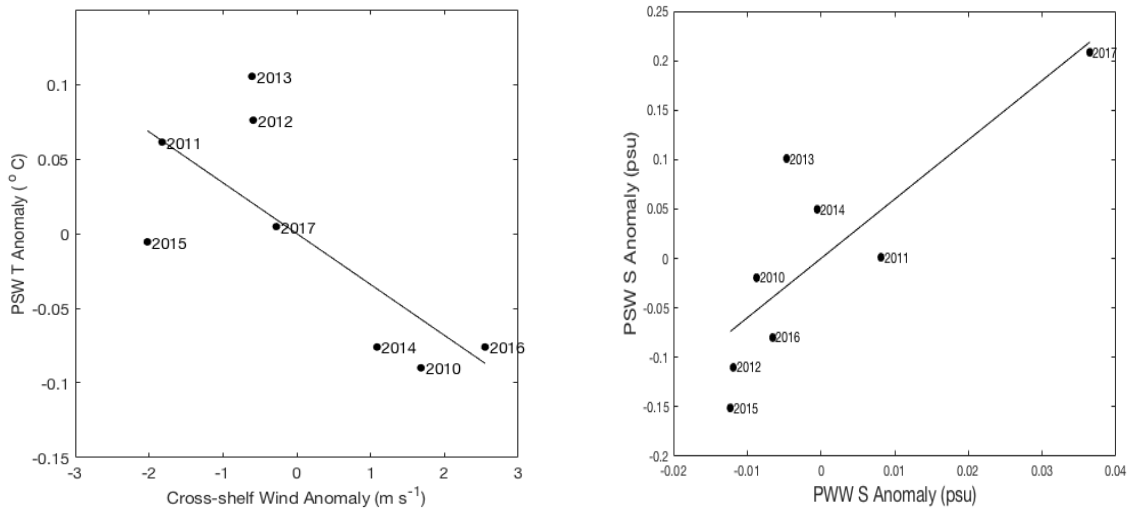


Figure 15. Same as Figure 14 but for cross-shelf wind vs. PSW temperature (left), and PWW salinity vs. PSW salinity (right).

물리적으로 수온 증가는 열을 나타내므로 해빙 용빙의 원인으로 작용하지만 염분 감소는 해빙 용빙의 결과로 나타나기 때문에, 해빙면적 변동성의 원인은 표층혼합층의 염분보다는 태평양여름수의 수온 변동성과 연관성이 높다. 본 연구에서는 태평양여름수의 변동성이 해빙면적 변동성을 일으키는 주요 요인이라는 가정 하에 태평양기원수의 변동성에 영향을 주는 변수들을 분석해 보았다. 관측 자료 분석 결과, 태평양여름수의 수온 변동성은 동시베리아해 대륙붕과 척치해 대륙붕을 가로지르는 바람의 변동성과 밀접한 관계가 있음을 파악하였고 태평양여름수의 염분 변동성은 바로 아래 존재하는 태평양겨울수의 염분 변동성과 양의 상관관계가 있음을 파악하였다 (그림 15).

2. 변동성 진단을 위한 시나리오 구성

앞서 분석된 결과를 토대로 이상적인 진단 모델 시나리오를 수립하였다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 두 가지 영향 요인을 선택하여 크게 3 가지 모델 시뮬레이션 경우를 고려하였다. 첫 번째 경우가 control run (C0)으로 아무 외력을 주지 않은 것이고, Case1 (C1)은 베링해협 개방경계에서 수온과 염분, 해수면 변동에 의한 평균흐름 변동을 45일 주기로 동일하게 주었고 (염분 33~35 psu, 수온 6~10 °C, 해수면 진폭 0~0.6 m), Case2 (C2)는 해표면에서의 바람 외력을 동경 120도~서경 170도, 북위 70도~80도 해역에서 부여하였다. 풍향은 남서풍에서 북동풍으로 30일 주기로 바뀌고 최소 풍속은 0, 최대 풍속은 10 m/s이다. 부여된 외력의 시간적 변동성은 그림 16에 나타내었다.

시나리오 시뮬레이션은 5년간의 spinup 후에 북극해의 수온, 염분 분포를 초기조건으로 하고, spinup 시뮬레이션에서 사용하였던 것과 동일한 모델 셋업과 모수들을 사용하여 각 경우에 대하여 1년간 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 2. Idealized model scenario runs

Scenario case	Initial S, T	Local wind	Bering Strait meanflow
Control run (C0)	climatological run	no	no
Case1 (C1)	climatological run	no	fluctuating
Case2 (C2)	climatological run	fluctuating	no

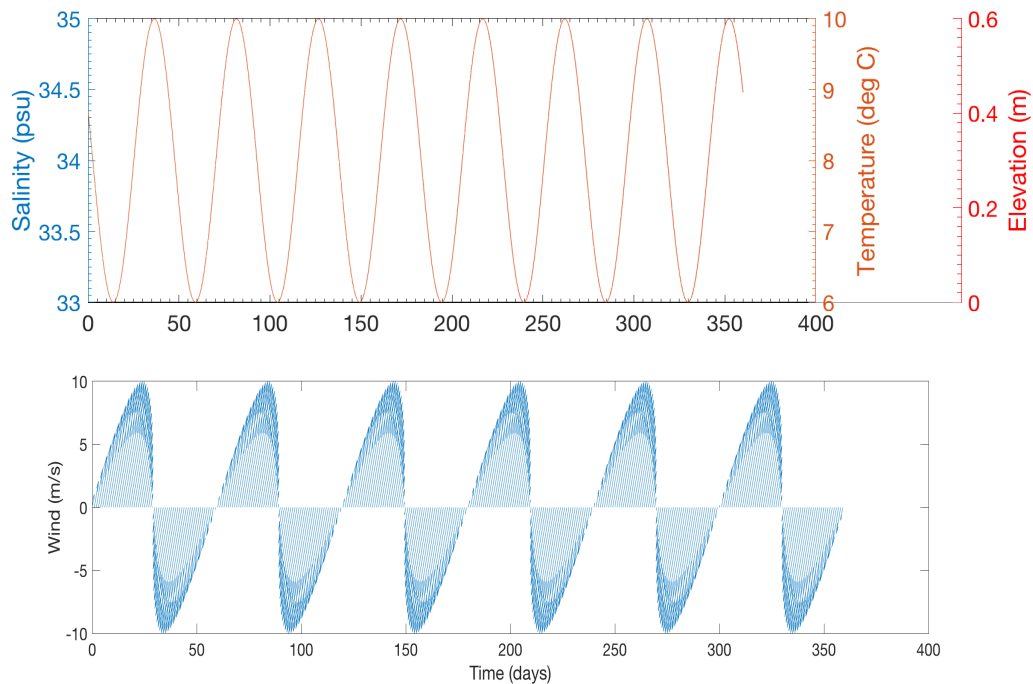


Figure 16. Time series of salinity, water temperature, and water elevation enforced on the open boundary of the Bering Strait (upper) and local wind enforced on the area of 120° E~170° W and 70°~80° N (lower).

3. 모델 주요 영향 요인 진단

표 2에서 기술한 3 가지 경우들의 1년간의 모델 결과를 가지고 시나리오별 태평양 기원수 (특히 태평양여름수)의 경로 해역 (서경 170도~서경 160도, 북위 70도~80도)에서 수심 30~100 m 까지의 수온과 염분을 일평균을 취하였다. 선택 해역에서 일평균한 수온과 염분의 시계열을 가지고 스펙트럼을 분석하였다. 수온의 경우 외력에 대한 반응이 뚜렷하게 나타났다 (그림17). 외력이 없었던 C0의 경우 유의한 주기가 나타나지 않았고, 지역바람 외력을 준 C2 경우에만 연 12회, 즉 30일 주기가 유의 수준 이상으로 뚜렷하게 나타났다. 45일 주기의 변동성 (연 8회)을 부여한 C1의 경우, 연 8회 대신 연 3회 혹은 4회 정도 (90~120일 주기)에서 유의 수준 하의 스펙트럼 밀도를 보였다. 염분에 대해서도 C2의 경우, 30일 주기의 변동성을 보임을 알 수 있었다.

결론적으로, 척치 보더랜드 부근 태평양여름수 경로 해역에서의 태평양기원수의 변동성은 지역 바람 외력은 즉각적으로 수온 및 염분 변동성에 영향을 미치며 수온의 경우 염분의 변동성보다 바람에 대한 반응이 뚜렷하게 나타났다. 반면, 베링해협에서 유입되는 태평양수의 변동성은 척치 보더랜드 해역으로 이동하는 과정에 그 변동성의 특성이 변화

하거나 어떤 다른 요인에 의해서 길어지는 경향을 보임을 알 수 있었다. 관측 자료에서 분석한 베링해협에서의 유입되는 태평양수의 변동은 계절적 변동성을 보이거나 현 모델에서 부여한 변동은 실제와 달리 더 짧다. 또한 베링해협부터 척치 보더랜드 해역까지 해수가 이동하는데 걸리는 시간이 2-3 개월은 되기 때문에 1년간의 시뮬레이션으로 변동성을 진단하기에는 한계가 있어 보인다. 또한 염분 변동성에 영향을 줄 수 있는 유라시아 및 알래스카 대륙으로부터의 강 유입량, 보퍼트해 해양 순환, 바람에 의한 해빙 움직임 등 잘 알려지지 않은 요인들에 대한 태평양기원수의 변동성 영향력 진단이 필요하며 향후 모델링 서버 증축을 통해 이상적인 모델 수행이 아닌 실질적인 모델 수행이 필요하다. 자세한 모델링 개선점에 대해서 제5장에서 서술하도록 하겠다.

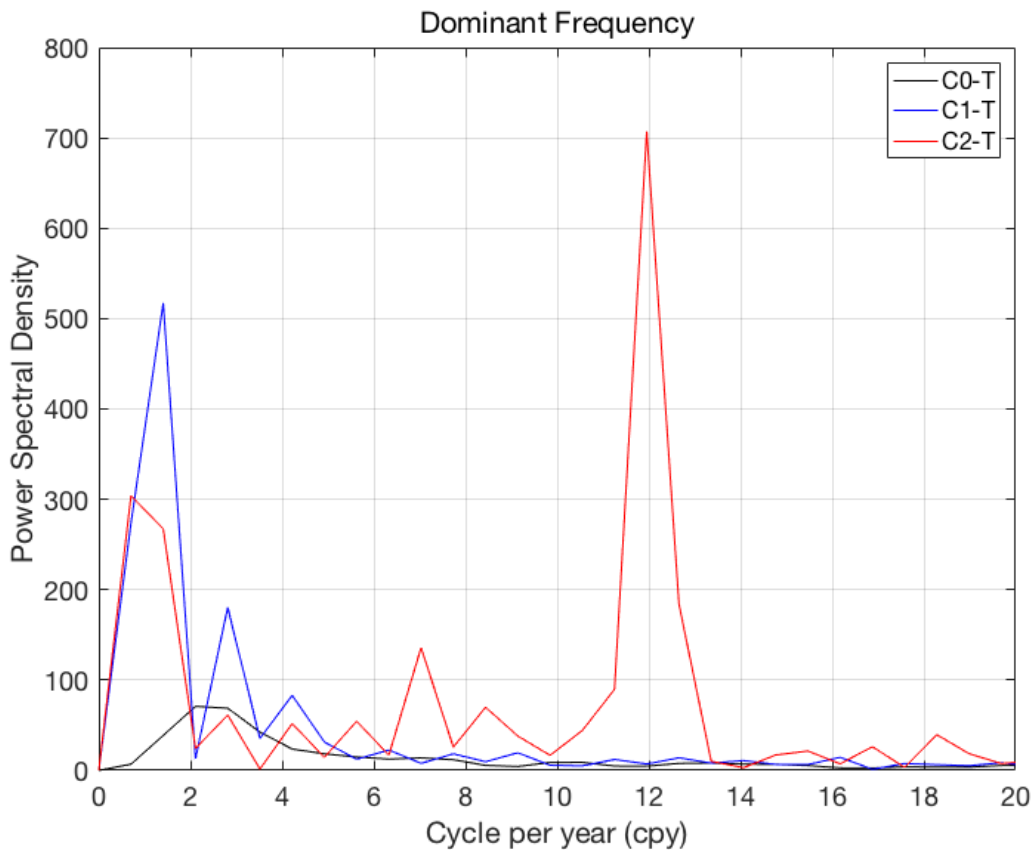


Figure 17. Power spectral density plot of water temperature time series for individual scenario runs.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표달성도

○ 연구 개발 목표로 제시한 북극해에 대한 해양 수치 모델링 시스템 구축을 수립하였다. 수치 모델링 시스템 구축은 크게 하드웨어와 소프트웨어로 나누어지는데, 하드웨어의 경우 연구 장비 예산 한도 내에서 18 개 코어의 2개 프로세서 (총 36 개 코어)를 가진 리눅스 서버로 구성하였다. 소프트웨어로는 상업적인 모델 코드가 아닌 오픈 소스 코드의 사용자 그룹이 비교적 많고 연구 논문이 많은 모델인 FVCOM을 선정하였다. 선정 과정에서 다른 유수의 모델들도 사전 조사 대상이었지만 모델 수행 속도, 응용의 용이성, 모델의 편의성 등을 고려하여 비구조 격자를 가진 유한 체적 (finite volume) 기반의 모델을 선택하였다. 모델 다운로드, 설치 및 컴파일까지 구축된 모델링 서버 환경에 맞게 연구 책임자가 직접 설정하여 수행하였다. 모델 설치와 컴파일은 서버 환경에 맞는 최적의 옵션을 찾아야 하므로 비교적 시간이 소모되는 과정이었다. 모델 실행에 앞서 실행에 필요한 모델 인풋 자료를 만들기 위해서 여러 종류의 관측 혹은 모델 재분석 자료를 수집하였다. 생성된 모델 초기조건 및 경계조건들은 가지고 모델 변수들을 최적화 시키는 모수화 과정을 수행하고 모델 최적화를 수립하였다. 이 모든 일련의 과정들이 북극해 해양 수치 모델 수립이라는 목표를 달성하는데 크게 기여하였다. 비록 연구 목적에 집중하기 위해서 해표면에서의 열교환, 해빙 역학/열역학 (해양-해빙 상호작용), 하천 유입 등 극해역에서 중요한 물리적 과정을 고려하지 않았지만, 실질적으로 해빙 면적의 예측 연구, 대기-해빙-해양 상호작용 연구, 해양환경 변화를 예측하는 에코시스템 모델링 구축 연구를 목표로 한다면 앞서 언급한 고려하지 않았던 모든 과정을 고려해야 할 것이다.

○ 두 번째 제시한 태평양기원수의 변동성에 영향을 주는 주요 요인 진단에 대한 연구 개발 목표도 달성되었다. 연구 해역에서의 8년간 하계 관측 자료를 수집하여 태평양기원수의 변동성이 해빙면적의 변동성과 밀접한 상관관계를 가짐을 파악하였다. 관측 자료 분석에 의하면 대륙붕을 가로지르는 바람 성분이 태평양기원수의 변동과 밀접한 관계가 있음을 파악하고 해양 수치 진단 모델을 통하여 바람 외력의 변동성이 태평양기원수의 변동

을 즉각적으로 일으킬 수 있다는 것을 진단하였다.

제 2 절 관련분야에의 기여도

- 본 과제에서는 북극해에 대한 해양 수치 모델 구축을 위탁 연구나 용역이 아닌 극지 연구소 내에서 직접 수립하여 향후 기여하였다.
- 해빙면적의 변동성과 밀접한 연관이 있는 태평양기원수의 변동성을 유발하는 요인 중, 기존 관측 자료 분석에서 제시되었던 지역 바람에 의한 영향이 가장 뚜렷하게 나타남을 증명하는데 기여하였다.



제 5 장 연구개발 결과 활용 계획 및 개선점

제 1 절 연구개발 결과 활용 계획

- 국내 해빙-해양 실시간 예측 시스템 구축 연구에 활용할 예정임. 국외에서 진행되고 있는 북극해 모델 상호비교 프로젝트 (FAMOS)에 참여하여 국내 북극해 모델링 수준을 한 단계 높일 계획임
- 북극해 해양환경 변화를 관측하기 위한 아라온 북극해 탐사 시 관측 정점 선정을 위한 기초자료(해수 및 해수 특성 분포)를 제공하여 활용할 계획임
- 태평양기원수 변동성 예측에 활용하여 북극해 해빙 감소의 변동성과 북극 기후 변화에 미치는 영향 연구에 활용할 계획임

제 2 절 개선점

본 연구를 통해 구축한 북극해 해양 수치 진단 모델 수행 결과, 향후 활용도를 높이기 위해서 몇 가지 개선되어야 할 사항들을 기술하고자 함

- 현재 진단 모델의 경우, 해빙 모듈을 가지고 있지만 연구 목적에 의해 고려하지 않았음. 해빙 시뮬레이션의 경우 최소 40년 정도의 spinup 기간이 필요하기 때문에 모델 속도를 향상시킬 수 있는 모델링 서버 증설이 꼭 필요함. 현재 모델 속도는 36 개의 코어를 다 사용할 경우, 1년 시뮬레이션이 2-3일 정도 소요됨. 향후 서버 증설을 통해 1년 시뮬레이션 소요 시간을 12시간 내외로 개선할 필요가 있음.
- 현재 진단 모델의 수평 격자 해상도는 10~25 km로 되어 있으나 중규모 에디와 같은 물리적 현상들을 재현하기 위해서는 격자 해상도가 10 km 이하로 줄일 필요가 있음. 격

자 해상도가 줄어들에 따라 time step도 줄어들어야 하므로 상기 기술한 서버 증설이 되면 이 문제도 개선될 것으로 기대함

○ 현 진단 모델에서는 하천 개방경계조건을 쓰고 있지 않아 하천으로 들어오는 담수의 효과를 고려하지 않고 있음. 적어도 유라시아 대륙과 알래스카 대륙에서 유입되는 큰 하천의 효과를 고려해야 염분의 변동성을 정확히 진단할 수 있을 것으로 기대함

○ 현 진단 모델은 초기조건과 경계조건들이 모두 기후학적인 평균값을 쓰고 있어서 모델 검증을 위해서는 실제적인 외력을 고려하여야 함. 연구 해역에서의 수온 및 염분, 해류의 관측 자료는 이미 아라온 북극해 하계 탐사를 통하여 8년간 축적되어 있기 때문에 향후 모델 검증 자료로 유용하게 사용될 것으로 사료됨.

○ 현재 여러 나라 국가들의 연구진들이 북극해 모델 결과와 기후 예측의 불확실성을 줄이기 위하여 FAMOS (Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis)에 참여하고 있음. 극지연구소도 국제협력 강화와 북극해 해양 수치 모델링 기술 수준 향상을 위하여 참여가 시급하다고 사료됨.

제 6 장 참고문헌

- Chen, C., H. Liu, and R.C. Beardsley, 2003. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *J. Atm. Oceanic Tech.*, 20, 159-186.
- Chen, C., R.C. Beardsley, G. Cowles, J. Qi, Z. Lai, G. Gao, D. Stuebe, H. Liu, Q. Xu, P. Xue, J. Ge, S. Hu, R. Ji, R. Tian, H. Huang, L. Wu, H. Lin, Y. Sun, and L. Zhao, 2013. An unstructured grid, finite-volume community ocean model FVCOM User Manual. 4th Ed., SMAST/UMASSD-13-0701, 404p.
- Chen, C., G. Gao, Y. Zhang, R.C. Beardsley, Z. Lai, J. Qi, and H. Lin, 2016. Circulation in the Arctic Ocean: Results from a high-resolution coupled ice-sea nested Global-FVCOM and Arctic-FVCOM system. *Progr. Oceanogr.*, 141, 60-80.
- Danilov, S., G. Kivman, and J. Schroter, 2004. A finite-element ocean model: principles and evaluation. *Ocean Modell.*, 6, 125-150.
- Gao, G., C. Chen, J. Qi, and R.C. Beardsley, 2011. An unstructured-grid, finite-volume sea ice model: development, validation, and application. *J. Geophys. Res.*, 116, C00D04, <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006688>.
- Good, S.A., M.J. Martin, and N.A. Rayner, 2013. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6704-6716, doi:10.1002/2013JC009067.
- Heimbach, P., D. Menemenlis, M. Losch, J.-M. Campin, and C. Hill, 2010. On the formulation of sea-ice models. Part 2: Lessons from multi-year adjoint sea ice export sensitivities through the Canadian Arctic Archipelago. *Ocean Modell.*, 33, 145-158.

- Losch, M., D. Menemenlis, P. Heimbach, J.-M. Campin, and C. Hill, 2010. On the formulation of sea-ice models. Part 1: Effects of different solver implementations and parameterizations. *Ocean Modell.*, 33, 129-144.
- Madec, G., and the NEMO team, 2008. NEMO ocean engine. Note du Pole de modelisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27, ISSN No 1288-1619.
- Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey, 1997a. A finite-volume, incompressible Navier-Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *J. Geophys. Res.*, 102(C3), 5753-5766.
- Marshall, J., C. Hill, L. Perelman, and A. Adcroft, 1997b. Hydrostatic, quasi-hydrostatic and non-hydrostatic ocean modeling. *J. Geophys. Res.*, 102(C3), 5733-5752.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. *J. Oceanogr.*, 56, 567-581.
- Mellor, G.L. and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875.
- Menemenlis, D., I. Fukumori, and T. Lee, 2005. Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 1224-1240.
- Nguyen, A.T., D. Menemenlis, and R. Kwok, 2011. Arctic ice-ocean simulation with optimized model parameters: Approach and assessment. *J. Geophys. Res.*, 116, C04025, doi:10.1029/2010JC006573.
- Nguyen, A.T., R. Kwok, and D. Menemenlis, 2012. Source and pathway of the western Arctic upper halocline in a data-constrained coupled ocean and sea ice model. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 802-823.
- Padman, L. and S. Erofeeva, 2004. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L02303,

doi:10.1029/2003GL019003.

- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 99-164.
- Timmermann, R., Q. Wang, and H. Hellmer, 2012. Ice-shelf basal melting in a global finite-element sea-ice/ice-shelf/ocean model. *Ann. Glaciol.*, 53, 303-314.
- Timmermans, M.-L., A. Proshutinsky, E. Golubeva, J.M Jackson, R. Krishfield, M. McCall, G. Platov, J. Toole, W. Williams, T. Kikuchi, and S. Nishino, 2014. Mechanisms of Pacific Summer Water variability in the Arctic's Central Canada Basin. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 7523-7548, doi:10.1002/2014JC010273.
- Wang, Q., S. Danilov, D. Sidorenko, R. Timmermann, C. Wekerle, X. Wang, T. Jung, and J. Schroter, 2014. The Finite Element Sea ice-Ocean Model (FESOM) v.1.4: formulation of an ocean general circulation model. *Geosci. Model Dev.*, 7, 663-693, doi:10.5195/gmd-7-663-2014.
- Yoshizawa, E., K. Shimada, H.K. Ha, T.W. Kim, S.H. Kang, K.H. Chung, 2015. Delayed responses of the oceanic Beaufort Gyre to winds and sea ice motions: influences on variations of sea ice cover in the Pacific sector of the Arctic Ocean. *J. Oceanogr.*, 71, 187-197, doi:10.1007/s10872-015-0276-6.
- Yu, L., X. Jin, and R.A. Weller, 2008. Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. *WHOI OAFlux Project Technical Report (OA-2008-01)*, 64p.
- Zhang, Y., C. Chen, R.C. Beardsley, G. Gao, Z. Lai, B. Curry, C.M. Lee, H. Lin, J. Qi, and Q. Xu, 2016a. Studies of the Canadian Arctic Archipelago water transport and its relationship to basin-local forcings: Results from AO-FVCOM. *J. Geophys. Res. Oceans*, 121,

doi:10.1002/2016JC011634.

Zhang, Y., C. Chen, R.C. Beardsley, G. Gao, J. Qi, and H. Lin, 2016b. Seasonal and interannual variability of the Arctic sea ice: A comparison between AO-FVCOM and observations. *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 8320–8350, doi:10.1002/2016JC011841.



최종 결과보고서에 평가의견 반영사항

창의연구사업 구분	(신진연구지원과제, Seed형선행과제, 연구정책·지원과제)		
과제명	수치적 접근법을 이용한 북극해 태평양기원수의 변동성 진단 연구 (계정번호: PE16420)	연구기간	2016.11.01 ~ 2017.10.31
연구책임자	조 경 호	연구비(직접비)	30,000 천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 해양 수치 진단 모델을 활용하여 서북극해 태평양기원수의 변동성 및 주요 영향 요인 진단 <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 북극해 해양 수치 진단 모델 수립 ◦ 태평양기원수의 변동성에 영향을 미치는 주요 요인으로서 지역 바람을 제시함 <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 국내 해빙-해양 실시간 예측시스템 구축 연구에 활용될 것으로 기대함 ◦ 북극해 해양환경 변화 관측 시 관측 정점 선정을 위한 기초자료(해수, 해류 특성 분포)로 활용 ◦ 태평양기원수 변동성 예측에 활용하여 북극해 해빙 감소의 변동성 및 북극 기후 변화에 미치는 영향 연구에 활용될 것으로 기대함 <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견	반영사항	비고	
◦ 외국기관과 비교하여 기술 수준을 진단하고 개선 방향에 대해 기술할 필요가 있음	◦ 국외 연구개발 현황과 북극해 수치 모델 사전 조사 섹션에서 국외 기술수준에 대한 진단을 기술하였음	연구보고서 p.4, 5~7 참조	
	◦ 연구개발 결과 활용 계획 섹션에서 본 연구에 사용된 모델의 개선 방향을 기술하였음	연구보고서 p.34~35 참조	

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.