

서북극해 N₂O 농도 측정 및 발생량 추정

서북극해 N₂O 농도 측정 및 발생량 추정

Investigation of N₂O concentration and production in the western Arctic Ocean

주 의

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

2021.05.07

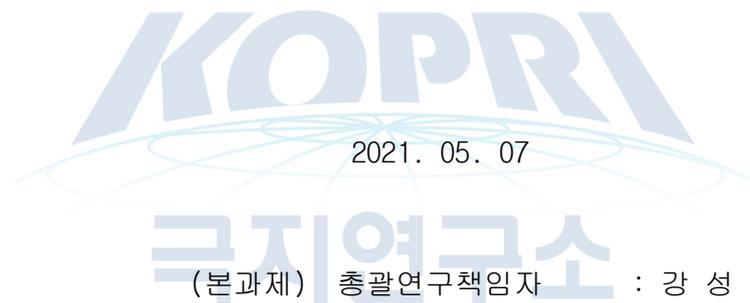
인천대학교
산학협력단

인천대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 환경변화 통합관측 및 활용연구” 과제의 위탁연구 “서북극해 N₂O 농도 측정 및 발생량 추정” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2021. 05. 07

극지연구소

(본과제) 총괄연구책임자 : 강 성 호

위탁연구기관명 : 인천대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김 일 남

위탁참여연구원 : 김 성 수

“ : 김 소 연

“ : 김 속 경

“ : 김 효 련

“ : 엄 상 민

“ : 윤 주 은

“ : 이 지 영

보고서 초록

위탁연구과제명	서북극해 N ₂ O 농도 측정 및 발생량 추정				
위탁연구책임자	김 일 남	해당단계 참여연구원수	8 명	해당단계 연구비	190,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	인천대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	65
<ul style="list-style-type: none"> ○ 서북극해 수층 N₂O 농도 및 특성 조사 ○ 서북극해 현장시료 분석을 통한 N₂O 농도 측정 및 자료 축적 ○ 서북극해 N₂O 농도의 시·공간 분포 분석 ○ 환경요인 분석을 통한 서북극해 N₂O 발생기작 파악 ○ 서북극해 해양환경의 해양-대기 N₂O 플럭스 추정 ○ 해양-대기 N₂O 플럭스 계산 및 자료 축적 ○ 해양-대기 N₂O 플럭스 시·공간 분포 분석 및 조절요인 파악 ○ 해양-대기 N₂O 플럭스 추정을 통한 서북극해 수층의 대기 N₂O에 대한 역할 파악 ○ 서북극해에서 용존 N₂O 농도 및 해양-대기 간 플럭스의 연간 변동성 파악 ○ N₂O 농도 및 해양-대기 플럭스 자료 생산 ○ 극지방에서의 N₂O 연구에 기초자료로 활용 가능 ○ 향후 기후변화에 따른 서북극해 환경변화의 지시자로서 활용 가능 ○ 서북극해 N₂O 발생량 변화와 지구온난화의 인과관계를 규명할 기초자료로 활용 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	서북극해, 온실기체, N ₂ O (아산화질소), 해양-대기 기체 교환, 환경변화			
	영 어	Western Arctic Ocean, Greenhouse gas, N ₂ O (nitrous oxide), Air-Sea gas exchange, Environmental change			

요 약 문

제목	○ 서북극해 N ₂ O 농도 측정 및 발생량 추정				
연구개발 목적 및 필요성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지방은 전 지구적 기후변화에 특히 민감한 지역으로 알려져 있음 ○ 전 지구적 기후변화에 의한 극지방의 급격한 환경변화는 N₂O 생성·소멸 메커니즘에 영향을 미침 ○ 극지방의 환경변화에 따른 N₂O의 농도 및 발생량에 관한 자료가 반드시 필요 ○ 따라서 이번 연구를 통하여 서북극해의 N₂O 농도 및 발생량을 정량화하고 대기 온실기체에 대한 서북극해 수층의 역할을 파악하고자 함 				
연구개발 내용 및 범위	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서북극해의 수층 N₂O 농도 특성 조사 ○ 서북극해 해양환경의 해양-대기 N₂O 플럭스 추정 ○ 서북극해의 환경변화에 따른 연간 용존 N₂O 변동성 파악 				
연구개발결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서북극해에서 현장시료 분석을 통한 N₂O 농도 측정 및 자료 축적 ○ 서북극해 N₂O 농도 공간분포 분석 ○ 환경요인 분석을 통한 서북극해 N₂O 농도의 조절요인 파악 ○ 서북극해에서 해양-대기 N₂O 플럭스 계산 및 자료 축적 ○ 서북극해에서 해양-대기 N₂O 플럭스 공간분포 분석 및 조절요인 파악 ○ 해양-대기 N₂O 플럭스 추정을 통해 서북극해 수층의 대기 N₂O에 대한 source (sea → air) 또는 sink (air → sea) 역할 파악 ○ 서북극해에서 용존 N₂O 농도 및 해양-대기 간 플럭스의 연간 변동성 파악 				
연구개발결과의 활용계획	<ul style="list-style-type: none"> ○ N₂O 농도 및 해양-대기 플럭스 자료를 생산하여 극지방에서의 N₂O 연구에 기초자료로 활용 ○ 향후 기후변화에 따른 서북극해 환경변화의 지시자료로 활용 가능 ○ 서북극해의 N₂O 발생량 변화와 지구 온난화와의 인과관계를 규명할 수 있는 기초자료로 활용 				
핵심어	서북극해	온실기체	아산화질소 (N ₂ O)	해양-대기 기체 교환	환경변화

S U M M A R Y

Title	○ Investigation of N ₂ O concentration and production in the western Arctic Ocean				
Purpose and Necessity of R&D	<ul style="list-style-type: none"> ○ Polar regions are known to be particularly sensitive to global climate change ○ Rapid environmental changes in the polar regions caused by global climate change affect the mechanisms of N₂O production and extinction ○ Data of N₂O concentration and production in the Arctic Ocean are required ○ N₂O concentration and production in the WAO are to be quantified and the relationships between atmospheric N₂O and WAO are to be determined 				
Contents and Extent of R&D	<ul style="list-style-type: none"> ○ Investigation on the N₂O concentration of water column in the WAO ○ Estimation of Air-Sea N₂O flux in the WAO ○ Determination of the variability on the dissolved N₂O due to environmental changes in the WAO 				
R&D Results	<ul style="list-style-type: none"> ○ Measurement of N₂O concentration and accumulation of data in the WAO ○ Analysis of N₂O distribution in the WAO ○ Analysis of environmental parameters to understand the controlling factors of N₂O concentration in the WAO ○ Air-Sea N₂O flux calculation and accumulation of data ○ Analysis of environmental parameters to understand the controlling factors of N₂O flux in the WAO ○ Determination of the role on atmospheric N₂O in the WAO ○ Determination of the dissolved N₂O and annual variability 				
Application Plans of R&D Results	<ul style="list-style-type: none"> ○ Utilization as a basic data for N₂O research in arctic regions ○ Utilization as an indicator of environmental changes in the WAO due to climate change in the future ○ Utilization as a basic data to identify the causal relationship between the N₂O productions and global warming 				
Keywords	Western Arctic Ocean	Greenhouse gas	Nitrous Oxide	Air-sea gas exchange	Environmental change

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	9
Section 1. Objectives of research	9
Section 2. Necessities of research	11
1. Background	11
2. Necessities	16
Chapter 2. Current status of domestic and foreign technology development	17
Section 1. Current status of foreign technology development	17
1. Research area	17
2. Current status of technology development	17
Section 2. Current status of domestic technology development	22
1. Research area	22
2. Current status of technology development	22
Chapter 3. Research contents and results	23
Section 1. Distribution and Flux of N ₂ O in Western Arctic Ocean	23
1. Investigation in Western Arctic Ocean during 2017	23
2. Investigation in Western Arctic Ocean during 2018	34
3. Investigation in Western Arctic Ocean during 2019	44
Section 2. Overall results of N ₂ O in Western Arctic Ocean	55
1. Distribution and production mechanism of N ₂ O in Western Arctic Ocean	55
2. Flux and controlling factor of N ₂ O in Western Arctic Ocean	58
Chapter 4. Achievement of goals and contributions	60
1. Achievement of goal	60
2. Expected effect	61
Chapter 5. Application planning of research achievements	62
1. Application plan for research results	62
2. Expected performance	62
Chapter 6. Foreign scientific and technology information collected in research development	63
1. ARP	63
2. CCHDO	63
3. MEMENTO	63
4. HIPPO	63
Chapter 7. References	64

Figure List

Fig. 1.1.1.1 Road map of research development strategy	10
Fig. 1.2.1.1 Average sea ice extent per February in the Arctic Ocean	12
Fig. 1.2.1.2 Concentration of the GHGs in the atmosphere since the industrial revolution	13
Fig. 1.2.1.3 Schematic diagram of N ₂ O produced by nitrification and denitrification ..	15
Fig. 2.1.1.1 Vertical profile of PML and halocline	18
Fig. 2.1.2.1 Global atmospheric monitoring stations in GAW	20
Fig. 2.1.2.2 GHGs monitoring stations of NOAA ESRL	21
Fig. 3.1.1.1 Sampling locations and surface Chl - a concentrations in 2017	25
Fig. 3.1.1.2 Vertical environmental profile of WAO in 2017	26
Fig. 3.1.1.3 T - S diagram of WAO in 2017	27
Fig. 3.1.1.4 Vertical N ₂ O profile of WAO in 2017	29
Fig. 3.1.1.5 Correlations between ΔN_2O - DIN, N*, and AOU in 2017	30
Fig. 3.1.1.6 N ₂ O flux of WAO in 2017	32
Fig. 3.1.1.7 Correlations between N ₂ O flux and environmental parameters in 2017 ...	33
Fig. 3.1.2.1 Sampling locations and surface Chl - a concentrations in 2018	35
Fig. 3.1.2.2 Vertical environmental profile of WAO in 2018	36
Fig. 3.1.2.3 T - S diagram of WAO in 2018	37
Fig. 3.1.2.4 Vertical N ₂ O profile of WAO in 2018	39
Fig. 3.1.2.5 Correlations between ΔN_2O - AOU and N* in 2018	40
Fig. 3.1.2.6 N ₂ O flux of WAO in 2018	42
Fig. 3.1.2.7 Correlations between N ₂ O flux and environmental parameters in 2018 ...	43
Fig. 3.1.3.1 Sampling locations and surface Chl - a concentrations in 2019	46
Fig. 3.1.3.2 Vertical environmental profile of WAO in 2019	47
Fig. 3.1.3.3 T - S diagram of WAO in 2019	48
Fig. 3.1.3.4 Vertical N ₂ O profile of WAO in 2019	50
Fig. 3.1.3.5 Correlations between ΔN_2O - DIN, N*, and AOU in 2019	51
Fig. 3.1.3.6 N ₂ O flux of WAO in 2019	53
Fig. 3.1.3.7 Correlations between N ₂ O flux and environmental parameters in 2019 ...	54
Fig. 3.2.1.1 Vertical N ₂ O profile of WAO from 2017 to 2019	56
Fig. 3.2.1.2 Correlations between ΔN_2O - DIN, N*, and AOU from 2017 to 2019	57
Fig. 3.2.2.1 Correlations between N ₂ O flux and environmental parameters from 2017 to 2019	59

목 차

제 1장 서론	9
제 1절 연구개발 목적	9
제 2절 연구개발의 필요성	11
1. 연구개발의 배경	11
2. 연구개발의 중요성	16
제 2장 국내외 기술개발 현황	17
제 1절 국외 동향	17
1. 연구해역	17
2. 기술개발 현황	17
제 2절 국내 동향	22
1. 연구해역	22
2. 기술개발 현황	22
제 3장 연구개발수행 내용 및 결과	23
제 1절 서북극해의 수층 N ₂ O 농도 특성 및 플럭스 분석	23
1. 2017년 서북극해 관측 조사	23
2. 2018년 서북극해 관측 조사	34
3. 2019년 서북극해 관측 조사	44
제 2절 서북극해 N ₂ O 조사 종합 결과 (2017-2019년)	55
1. 서북극해 N ₂ O 농도 분포 및 발생 기작	55
2. 서북극해 해양-대기 N ₂ O 플럭스 추정 및 조절 인자	58
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	60
1. 목표 달성도	60
2. 기대 효과	61
제 5장 연구개발결과의 활용계획	62
1. 연구개발 성과의 활용방안	62
2. 기대성과	62
제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	63
1. ARP	63
2. CCHDO	63
3. MEMENTO	63
4. HIPPO	63
제 7장 참고문헌	64

그 립 목 차

그림 1.1.1.1 연구개발 로드맵	10
그림 1.2.1.1 북극해 연간 2월 평균 해빙 면적	12
그림 1.2.1.2 산업혁명 이후 대기 중 3대 온실기체의 농도 변화	13
그림 1.2.1.3 질산화 (Nitrification)와 탈질산화 (Denitrification) 과정에 의한 N ₂ O 생성 모 식도	15
그림 2.1.1.1 PML과 염분약층 (0-100m)에 대한 수직 단면도	18
그림 2.1.2.1 GAW 프로그램에 참여 중인 전 세계 대기 감시소	20
그림 2.1.2.2 NOAA ESRL의 온실가스 측정소	21
그림 3.1.1.1 2017년 서북극해 조사 정점도와 표층 엽록소 a 농도	25
그림 3.1.1.2 2017년 서북극해 단면 프로파일	26
그림 3.1.1.3 2017년 서북극해 수온-염분 도표	27
그림 3.1.1.4 2017년 서북극해 N ₂ O 수직 프로파일	29
그림 3.1.1.5 2017년 ΔN ₂ O와 DIN, N*, AOU의 상관관계	30
그림 3.1.1.6 2017년 서북극해의 N ₂ O 플럭스	32
그림 3.1.1.7 2017년 서북극해 N ₂ O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계	33
그림 3.1.2.1 2018년 서북극해 조사 정점도와 표층 엽록소 a 농도	35
그림 3.1.2.2 2018년 서북극해 단면 프로파일	36
그림 3.1.2.3 2018년 서북극해 수온-염분 도표	37
그림 3.1.2.4 2018년 서북극해 N ₂ O 수직 프로파일	39
그림 3.1.2.5 2018년 ΔN ₂ O와 AOU, N*의 상관관계	40
그림 3.1.2.6 2018년 서북극해의 N ₂ O 플럭스	42
그림 3.1.2.7 2018년 서북극해 N ₂ O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계	43
그림 3.1.3.1 2019년 서북극해 조사 정점도와 표층 엽록소 a 농도	46
그림 3.1.3.2 2019년 서북극해 단면 프로파일	47
그림 3.1.3.3 2019년 서북극해 수온-염분 도표	48
그림 3.1.3.4 2019년 서북극해 N ₂ O 수직 프로파일	50
그림 3.1.3.5 2019년 ΔN ₂ O와 DIN, N*, AOU의 상관관계	51
그림 3.1.3.6 2019년 서북극해의 N ₂ O 플럭스	53
그림 3.1.3.7 2019년 서북극해 N ₂ O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계	54
그림 3.2.1.1 2017-2019년 서북극해 N ₂ O 수직 프로파일	56
그림 3.2.1.2 2017-2019년 ΔN ₂ O와 DIN, N*, AOU의 상관관계	57
그림 3.2.2.1 2017-2019년 서북극해 N ₂ O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계	59

제 1장 서론

제 1절 연구개발 목적

극지방은 인간 활동에 의한 결과인 기후변화로 인해 급격한 변화를 겪고 있다. 서북극해에서 강력한 기후변화 기체로 알려져 있는 아산화질소(N_2O)의 발생량을 정확하게 추정하고, 이전 국내에서는 시도되지 않은 실험과 실험 전후의 환경변화를 이해하여 서북극해 N_2O 농도 및 플럭스의 시·공간 변동성을 파악하는 것을 본 연구의 최종 목적으로 한다.

본 연구의 세부연구개발의 내용은 다음과 같다.

○ 서북극해의 수층 N_2O 농도 특성 조사

일반 대양에 비해 기상조건 등의 많은 변수로 접근성의 제한이 있지만 서북극해에서 현장시료 분석을 통한 수층 N_2O 농도를 측정하고 자료를 축적한다. 또한 서북극해 N_2O 농도의 공간적 분포 분석과 함께 환경요인들을 분석하여 서북극해 N_2O 농도의 조절요인을 파악한다.

○ 서북극해 해양환경의 해양-대기 N_2O 플럭스 추정

서북극해에서 해양-대기 기체 교환 모델을 이용하여 N_2O 플럭스를 계산 및 자료를 축적하고, 이를 통해 서북극해 N_2O 플럭스의 공간 분포를 분석하고 조절요인을 파악한다. 해당 분석 결과를 바탕으로 대기 N_2O 에 대한 서북극해 수층의 source (sea → air) 또는 sink (air → sea) 역할을 추정한다.

○ 서북극해의 환경변화에 따른 연간 용존 N_2O 변동성 파악

서북극해에서 용존 N_2O 농도 및 해양-대기 간 플럭스와 환경변화와의 관계를 이해하며 연간 변동성을 분석한다.

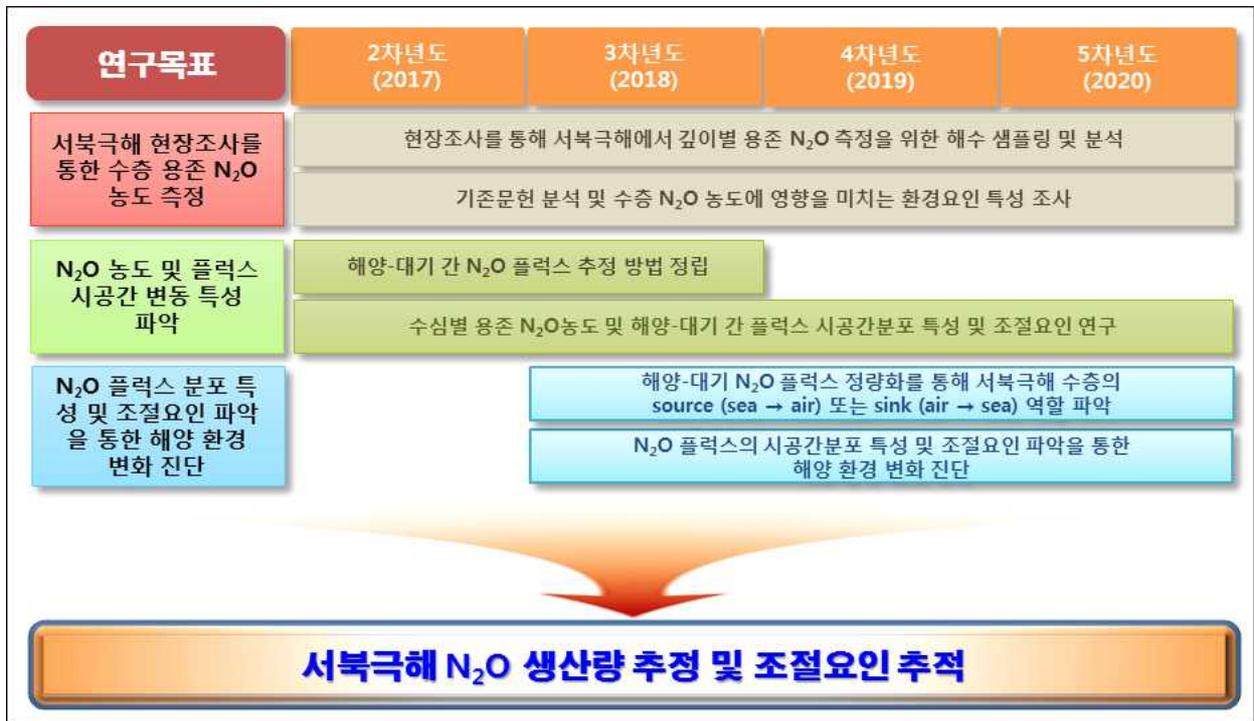


그림 1.1.1.1 연구개발 로드맵

제 2절 연구개발의 필요성

1. 연구개발의 배경

산업혁명 이후 급격하게 증가한 인간 활동에 의한 결과로 대기 중으로 온실기체가 대량으로 방출되어왔고, 대기 중 농도 또한 관측 이래 꾸준히 증가하고 있다 (IPCC, 2014). 이렇게 증가한 온실기체들은 기후변화를 일으키며 최근 지구온난화 같은 다양한 전 지구적 이상 현상들의 원인이 되고 있다.

이러한 기후변화는 극지방에서도 발견할 수 있다. 지구온난화 가속화에 따라 북극해의 해빙은 1970년대 이후 지속적으로 면적이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 지난 2018년도에는 가장 큰 면적 감소를 기록하기도 하였다 (그림 1.2.1.1).

지구온난화 및 기후변화에 밀접한 관계를 가지는 온실기체 중 N_2O (아산화질소, Nitrous oxide)는 이산화탄소 (CO_2), 메탄 (CH_4)과 함께 기후변화를 유발하는 강력한 온실기체로 알려져 있다. N_2O 의 온실기체 효과는 CO_2 의 약 300배에 달하는 것으로 알려져 있으며 (Briegleb et al., 2000, Ramaswamy et al., 2001), 이로 인해 지구온난화 가속화에 6% 가량 기여하는 것으로 보고되었다 (Rapson and Dacres, 2014). 또한 대류권(troposphere)에서는 온실기체로 작용을 하고 성층권 (stratosphere)에서는 오존 (ozone)을 파괴하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Crutzen, 1970).

온실 기체 중 CO_2 는 전 세계적으로 연구가 활발하게 수행되고, 해양 환경에서 농도 분포 및 발생량에 대하여 비교적 많이 알려져 있다 (Doney et al., 2009; Meinshausen et al., 2011; Takahashi et al., 2009; Caldeira and Michael, 2005). 하지만 그에 비하면 N_2O 는 몇몇 지역을 제외하고는 해양 환경에서의 거동이나 발생 기작 등에 대한 정보가 부족하다.

산업혁명 이후 인간 활동으로 인해서 대기 중 N_2O 농도는 산업혁명 이전 270 ppb에서 현재 320 ppb 수준으로 약 20% 증가하였다 (그림 1.2.1.2). 이는 인간활동에 따른 비료사용과 산업화의 결과로 추정된다 (Machida et al., 1995). 또한 인간 활동에 의한 직접적인 방출 외에도 N_2O 는 해양에서 상당량이 대기중으로 방출되고 있는데, N_2O 는 지구의 총 방출량의 약 34%가 해양에서 방출되고 있다고 알려져 있다 (IPCC, 2014). 하지만 이 또한 충분하지 못한 정보를 기반으로 한 추정치이고 해양 환경에서 해당 온실 기체의 발생량에 대한 정보는 굉장히 제한적이기 때문에, 이러한 수치는 앞으로 달라질 수 있다 (Yang et al., 2020).

Average Monthly Arctic Sea Ice Extent
February 1979 - 2021

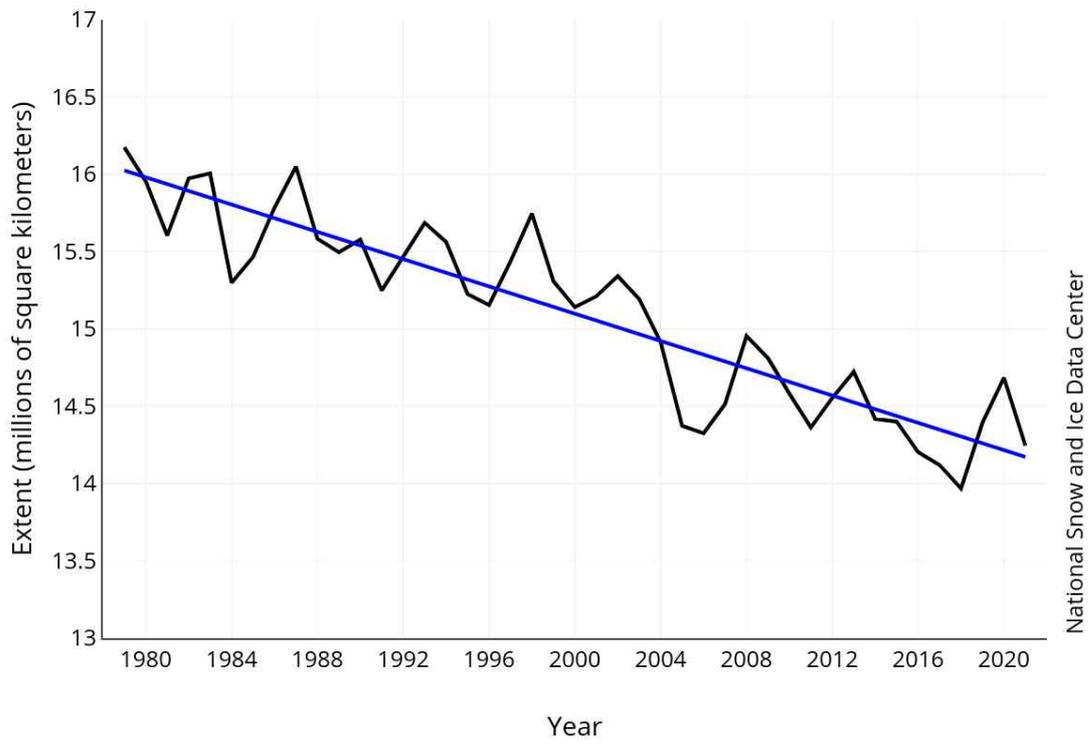


그림 1.2.1.1 북극해 연간 2월 평균 해빙 면적 (NSIDC, 2021)

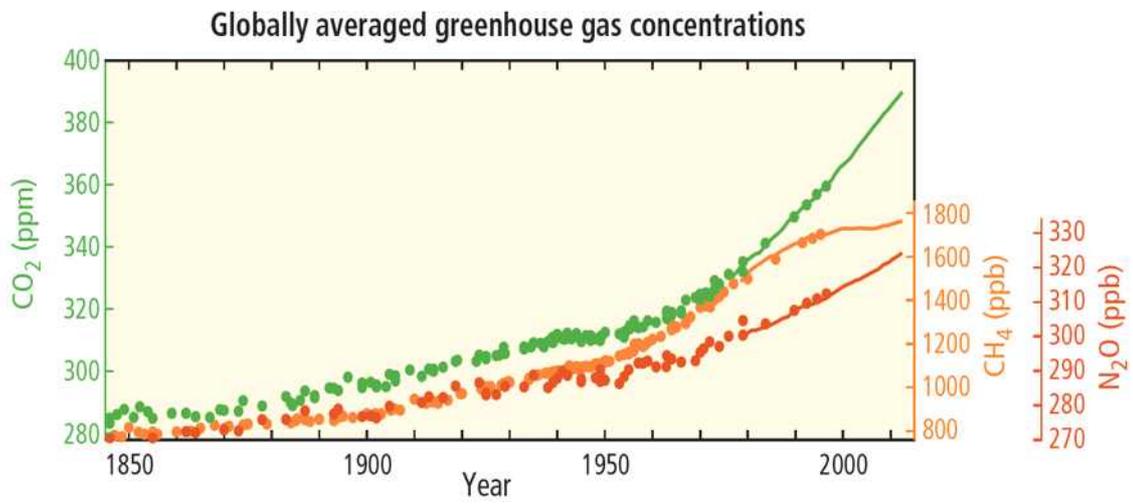


그림 1.2.1.2 산업혁명 이후 대기 중 3대 온실기체의 농도 변화 (IPCC, 2014)

해양환경에서 N_2O 는 주로 미생물 활동에 의한 질산화 (Nitrification)와 탈질산화 (Denitrification) 두 과정에 의해 생성된다 (Capone et al., 2008) (그림 1.2.1.3). 질산화 과정은 NH_4^+ 가 NO_3^- 로 산화되는 과정으로 이 과정에서 부산물로 N_2O 가 생성된다. 탈질산화 과정은 산소 농도가 낮은 환경에서 발생하는데, NO_3^- 가 N_2 로 환원되는 과정에서 부산물로 N_2O 가 생성된다.

해양의 N_2O 기존 연구는 주로 발트해 (Baltic Sea), 흑해 (Black Sea), 멕시코만 (Gulf of Mexico), 동중국해 (East China Sea) 등과 같이 빈산소 출현 발생 비율이 높은 연안지역에서의 N_2O 발생에 초점을 두어 진행 되어 왔으나 최근 들어 대양 (태평양, 대서양, 인도양 및 남북극해)의 장기조사 프로젝트 (NOAA-ESRL, CCHDO, MEMENTO 등)를 통해 N_2O 발생량을 측정하고 이에 따른 환경 변화를 이해하려는 노력이 진행되고 있다. 하지만 연안 및 대양에서의 N_2O 발생량에 관한 활발한 연구와는 달리 극지역은 접근성의 제한으로 인해 N_2O 발생량에 대한 전 지구적인 기여도 연구가 매우 부족한 실정이다.



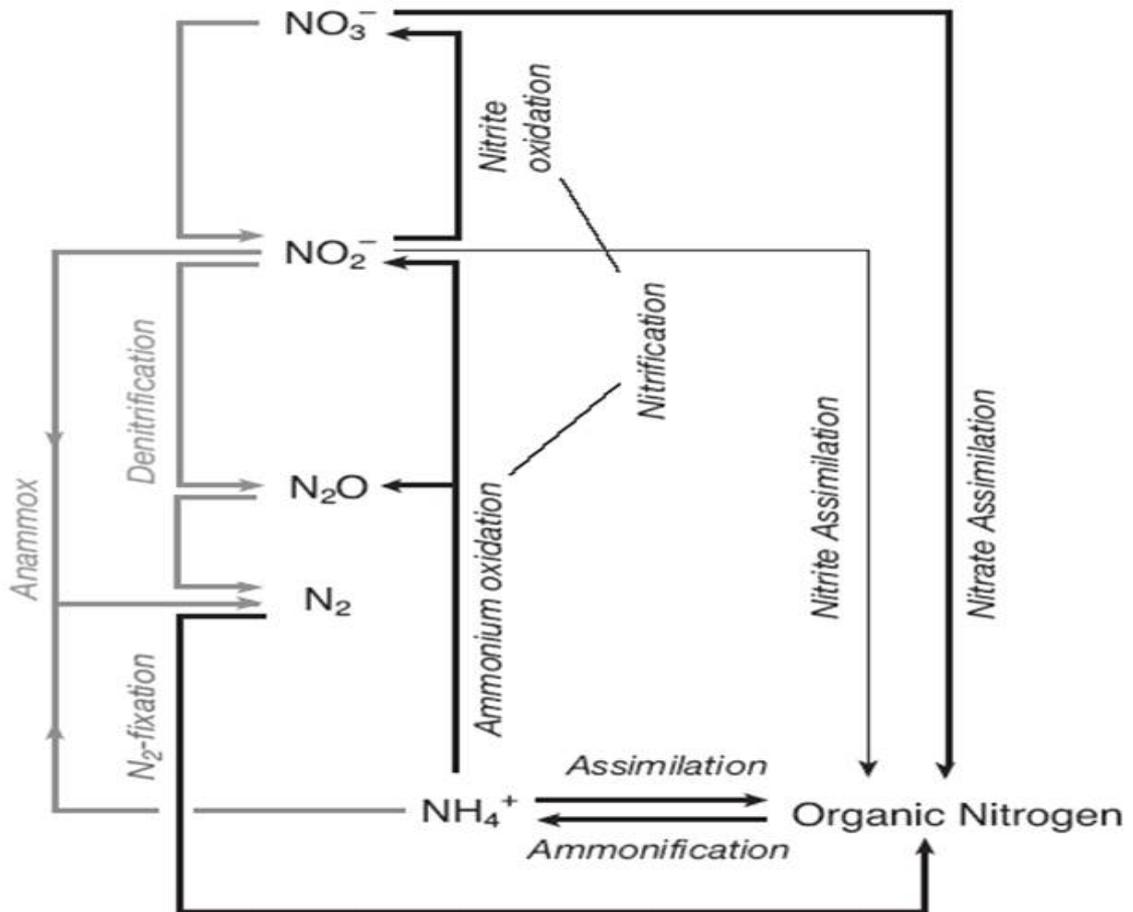


그림 1.2.1.3 질산화 (Nitrification)와 탈질산화 (Denitrification) 과정에 의한 N_2O 생성 모식도 (Sarmiento and Gruber, 2006)

2. 연구개발의 중요성

가. 해양환경에서 온실 기체인 N₂O 연구의 중요성

강력한 온실기체인 N₂O는 CO₂보다 온실효과가 약 300배 더 크고 성층권에서는 오존층을 파괴하는 기체로 알려져 있다. N₂O가 해양에서 생성되는 과정은 질산화 (nitrification; NH₄⁺ → NO₂⁻ → NO₃⁻) 과정과 탈질산화 (denitrification; NO₃⁻ → NO₂⁻ → N₂O/N₂) 과정이 있으며 두 과정 모두 미생물에 의해 진행이 된다. 이러한 과정을 통해 해양에서 생성된 N₂O는 대기 중 농도를 증가시키는 주요 공급원 중 하나이다 (4~7 Tg N yr⁻¹).

산업혁명 이후 인간 활동이 급속하게 증가하면서, 그에 따라 탄소와 질소의 사용도 함께 증가하였고 그 결과로 N₂O 발생량이 증가하는 것이 보고되었다. 이러한 결과는 기후변화를 가속화 할 수 있으며, 발생량의 상당 부분을 차지하는 해양에서 N₂O의 정밀한 연구를 통해 향후 기후 변화 모델의 기초 자료 제공이 반드시 필요하다.

나. 극지방의 환경과 N₂O 연구의 연관성

극지방은 전 지구적 기후변화에 특히 민감한 지역으로 알려져 있다. 또한 극지방의 급격한 기후변화는 대기 중으로의 N₂O 발생량에 중요한 영향을 미칠 수 있을것으로 추정된다. 예를 들어 표층수의 수온 상승으로 인한 성층 강화는 저층수의 산소 농도를 감소시켜 N₂O 생성에 호의적인 환경을 형성할 수 있다.

전 지구적 기후변화에 의한 극지방의 급격한 환경변화는 N₂O 생성·소멸 메커니즘에 큰 영향을 미칠 수 있다. 나아가 이에 따른 N₂O 발생량 변동은 극지방뿐만 아니라 전 지구적인 기후변화에도 중요한 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 극지방의 해수 중 N₂O 생성과 소멸에 관한 연구가 필요하다.

다. 서북극해 N₂O 자료 개발의 중요성

극지방의 환경변화에 따른 N₂O의 거동을 면밀히 파악하기 위해서는 기본적으로 해수의 N₂O 농도 및 계면 발생량에 관한 자료가 필요하다. 그러나 현재 국내는 물론 국외에서도 이에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 현장관측을 통한 해양환경에서 N₂O 현존량 및 발생량의 모니터링과 이들의 분포에 영향을 미치는 요인에 관한 연구가 가장 우선적으로 이루어져야 한다. 따라서 이번 연구를 통하여 서북극해의 N₂O 농도 및 계면 발생량을 정량화하고, 이를 통하여 서북극해 수층의 역할 (source (sea → air) 또는 sink (air → sea)을 파악하는 것이 중요하다.

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국외 동향

1. 연구해역

북극해의 북대서양과 보퍼트해 인근에서 측정된 N_2O 결과에 따르면, N_2O 포화도의 범위는 82 - 181%로 관측되었다 (Kitidis et al., 2010). Kitidis et al. (2010)는 해수 중 N_2O 농도의 실측 결과와 개념 모델 결과를 종합하여, 해빙의 후퇴와 증가는 북극 표층수의 N_2O 체류시간을 감소시킴으로써 이들 온실기체들의 해양-대기 플럭스가 증가할 것이라고 제안하였다. Verdugo et al. (2016)은 북극해 난젠 분지에서 아문젠 분지에 이르는 지역의 N_2O 와 CH_4 발생량에 대한 조사를 수행하였다. 연구 결과에 따르면 N_2O 와 CH_4 의 포화도는 각각 42-111%와 27-649%로 상당한 공간적 변동성을 나타내었다 (그림 2.1.1.1). 특히 CH_4 은 난젠 분지에서 높게 나타난 반면에 N_2O 는 아문젠 분지에서 높은 공간 분포 패턴을 나타내었다.

서북극해에서 처음으로 N_2O 농도를 관측한 연구 결과에 따르면, 표층수의 N_2O 농도는 11.4-16.9 nmol/L, 포화도는 92-118%를 나타내었다. 또한 남쪽 해역으로 갈수록 농도 및 포화도가 증가하는 경향을 나타내었다 (Zhang et al. 2015). 이때 수층 N_2O 의 주요 source (공급원)으로 퇴적층에서의 질산화와 탈질산화에 의한 N_2O 생성을 제시하였다.

2. 기술개발 현황

가. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

IPCC는 기후변화와 관련하여 정책 입안자들에게 그와 관련한 과학적 기초 및 정기적인 평가를 제공하기 위하여 설립된 국제기구로서, CO_2 , CH_4 와 더불어 N_2O 를 3대 온실기체로 지정하여 대기 중 농도를 주기적으로 모니터링하며 온실 기체들을 관리하고 있다.

IPCC 보고서에 따르면 N_2O 는 CO_2 보다 약 300배 강력한 온실기체라고 알려져 있다. 또한 인간 활동의 급속한 증가와 대기 중 N_2O 의 농도 증가가 밀접한 상관관계가 있는 것으로 보고되었다.

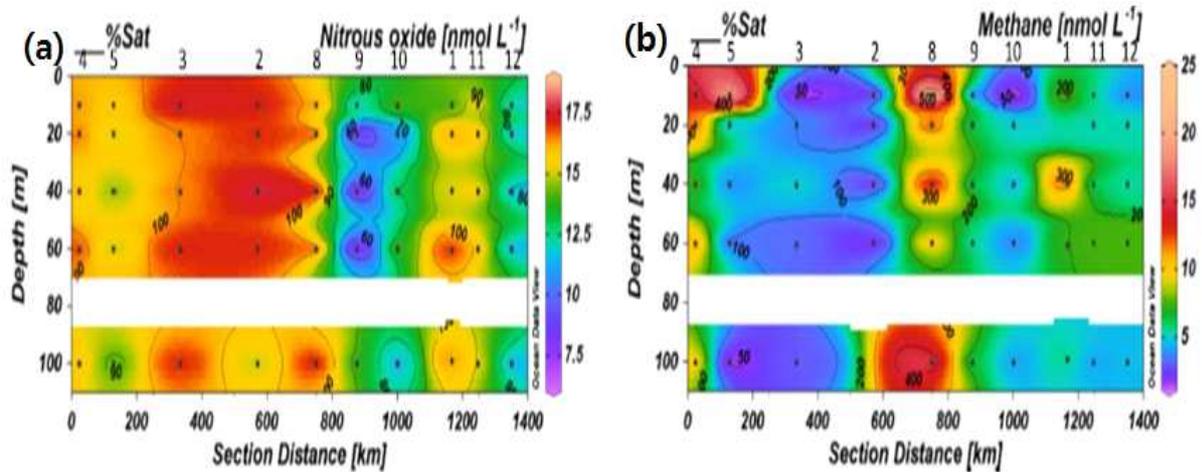


그림 2.1.1.1 PML과 염분약층(0-100m)에 대한 수직 단면도; (a) N₂O(nmol L⁻¹, %포화도); (b) CH₄(nmol L⁻¹, %포화도). 검은 샘플링한 위치를 나타냄 (Verdugo et al., 2016)

나. GAW (Global Atmosphere Watch)

GAW는 국제연합 (UN)의 특별기구인 세계기상기구 (WMO)의 과학기술 프로그램 중 하나로, 지구 온난화와 같은 환경 문제에 대처하기 위하여 1989년 시작되었다. 프로그램 활동으로 대기 중 온실기체 분포에 대한 세계자료센터 (WDCGG)를 운영하고 있으며, 세계기상기구의 모든 회원국이 참여하여 전 세계에 약 500여개 이상의 대기 감시소를 운영하고 있다 (그림 2.1.2.1).

다. NOAA ESRL Global Monitoring Division

미국 NOAA 소속 ESRL (Earth System Research Laboratory)에서는 전 지구적 N_2O 및 CH_4 연구를 주도하고 있다. 알래스카, 하와이, 남극 등 위도에 따라 4개의 관측소에서 대기 중 N_2O 와 CH_4 농도를 실시간으로 관측, 분석하여 기후 변화에 대한 대기 중 온실기체의 농도 변화를 연구하고 있다 (그림 2.1.2.2). 또 전 세계 대기 관측소와 협업하여 N_2O 와 CH_4 자료를 종합하여 전 세계 연구자들에게 제공하여 온실기체 연구에 큰 역할을 담당하고 있다.

라. US Ocean Carbon and Biogeochemistry (OCB) 지원 Oceanic CH_4 and N_2O Workshop

해양에서 N_2O 와 CH_4 에 대한 정량적인 정보가 절대적으로 부족함을 인지하고, 이에 대한 정보를 공유하기 위한 국제적인 네트워크를 설립하기 위하여 2018년 10월 28일부터 31일까지 미국에서 워크숍이 개최되었다. 관련 연구내용은 웹사이트를 통해 공개하고 있다 (<https://web.whoi.edu/methane-workshop/>).

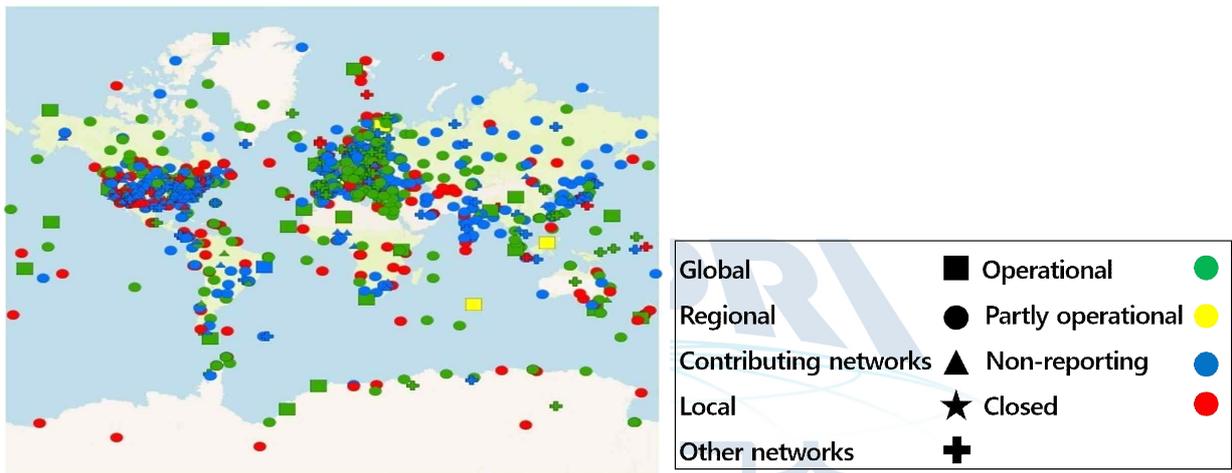


그림 2.1.2.1 GAW 프로그램에 참여 중인 전 세계 대기 감시소 (GAW)

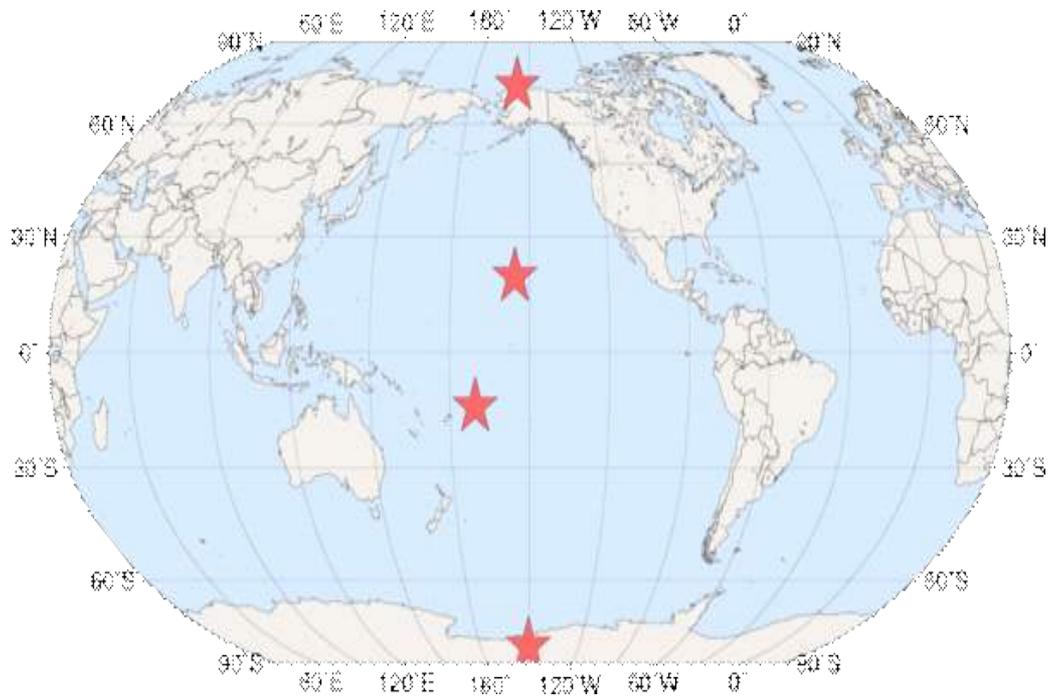


그림 2.1.2.2 NOAA ESRL의 온실가스 측정소 (NOAA ESRL)

제 2절 국내 동향

1. 연구해역

국내 연구기관 중 인천대학교 김일남 교수 연구팀은 극지연구소 연구과제 수행을 통하여 국내에서는 처음으로 북극해 연안지역의 N_2O 농도 및 발생량에 관한 조사를 수행한 바 있다. 조사결과에 따르면, 북극 스발바르 지역 Kongsfjorden에서 측정된 수층 N_2O 농도와 포화도의 범위는 각각 7.7-10.9 nmol/L, 61-86%로 나타났으며, 조사기간 동안 Kongsfjorden 수층은 대기 중 N_2O 의 sink (air → sea)로서 역할을 하는 것으로 추정되었다. 하지만 해당 연구는 연구 지역이 연안으로 제한되어 있어 북극의 외해에 대한 N_2O 연구는 국내에서 미흡한 실정이다.

2. 기술개발 현황

국내에서 N_2O 의 경우 태안 안면도·제주 고산 총 2곳의 관측소에서 대기 중 농도를 주기적으로 관측하고 있다. 각각의 관측소에서 획득한 자료는 기상청에서 관리 및 배포하고 있다. 반면에 국내 해양에 대한 N_2O 에 대한 측정 자료는 매우 부족하고, 관련 연구 또한 굉장히 부족한 실정이다.

극지연구소

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 서북극해의 수층 N₂O 농도 특성 및 플럭스 분석

1. 2017년 서북극해 관측 조사

가. 해양 환경 특징

- 2017년 서북극해 현장 조사는 베링해협 북부해역 (Northern Bering Strait; NBS, 그림 3.1.1.1A), 척치해 북부해역 (Northern Chukchi Sea; NCS, 그림 3.1.1.1B), 동시베리아 북부해역 (Northern East Siberian Sea; NESS, 그림 3.1.1.1C)에서 총 30개의 정점에서 수행되었다.
- 여름철 비교적 따뜻하고 영양분이 풍부한 태평양 수역의 영향을 많이 받는 NBS 해역은 일반적으로 높은 엽록소 a 농도가 나타났다 ($2.26 \pm 2.49 \mu\text{g/L}$) (그림 3.1.1.1). 이는 생물량 (Biomass)을 나타내는 생물학적 지표로 NBS가 매우 생산적인 해양 환경임을 보여준다.
- 반면에 NCS와 NESS는 해빙 용융이나 강을 통해 담수 유입의 영향을 받아 수온이 낮고 염분이 낮은 것이 특징이다. 해당 해역에서는 일반적으로 낮은 엽록소 a 농도로 나타났다 (그림 3.1.1.1).
- NBS 해역의 표층수 (수심 < 50m)는 북부해역들의 표층수와 비교했을 때 일반적으로 수온이 더 높고, 염분이 높고, 영양염이 더 풍부했다 (그림 3.1.1.2). NBS 해역의 표층수의 수온 (Θ)은 평균 $5.14 \text{ }^\circ\text{C}$, 염분 (S)은 32.33 psu , 용존 무기 질소 (dissolved inorganic nitrogen; DIN)는 $5.31 \mu\text{mol/L}$ 로 나타났다.
- 반면에 북부해역 (NCS와 NESS)의 표층수는 상대적으로 수온과 염분이 더 낮고 영양염도 적었다 (그림 3.1.1.2). 북부해역 표층수의 평균 수온은 $-1.00 \text{ }^\circ\text{C}$, 염분은 29.65 psu , DIN은 $1.20 \mu\text{mol/L}$ 로 나타났다.

- 표층수의 용존 산소는 NBS의 경우 평균 333.8 $\mu\text{mol/L}$, 북부해역은 평균 385.4 $\mu\text{mol/L}$ 로 NBS보다 NCS와 NESS에서 더 높게 나타나는 경향을 보였다 (그림 3.1.1.2).
- 수온-염분 도표에 보이듯이 (그림 3.1.1.3), 연구 해역의 표층수는 두 개의 수괴로 구성되어 있다. 한 수괴는 수온과 염분이 높고, 영양염이 풍부한 Pacific Summer Water (PSW)이고 Bering Summer Water (BSW)라고 불리기도 한다. 또 다른 수괴는 수온과 염분이 낮고 영양염이 고갈된 수괴로 해당 연구에서는 Fresh Water (FW)라고 표기하였다. 두 수괴는 9번 정점과 10번 정점 사이 (북위 73° 부근)에서 물리적 혼합이 이뤄지고 있다.
- 중층수 (수심 50 - 200m)는 북부해역의 경우 수온이 굉장히 낮고 ($< 0^\circ\text{C}$), 상대적으로 고염도 (31.5 - 33.6 psu)이고, 용존 산소가 낮으며 ($\sim 170 \mu\text{mol/L}$), 영양염이 풍부한 ($\text{DIN} > 10 \mu\text{mol/L}$) 물로 구성되어 있다. 이러한 특징은 Pacific Winter Water (PWW)의 특징으로 베링 해협 (Bering Strait)에서 겨울동안 생성되는 수괴이다. 또한 PWW는 N^* ($= [\text{NO}_3] - 16 * [\text{PO}_4]$) 최소값을 가지는 특징이 있다 (그림 3.1.1.3).
- PWW 아래 수심 200m와 1000m 사이에는 최대 수온 ($\sim 1.25^\circ\text{C}$), 높은 염도 (~ 34.89 psu)의 특징이 나타난다 (그림 3.1.1.3). 이러한 특징은 전형적인 Atlantic Water (AW)의 특징이다. PWW와 다르게 AW는 상대적으로 N^* 최댓값을 가지는 특징이 있다. 수심 1000m 아래에는 상대적으로 균질한 수온과 염분 ($\Theta < 0^\circ\text{C}$, $S = \sim 34.95$ psu) 분포를 보인다 (그림 3.1.1.3). 이 수괴는 Arctic Bottom Water (ABW)라고 불리며 가장 큰 N^* 값을 가진다.

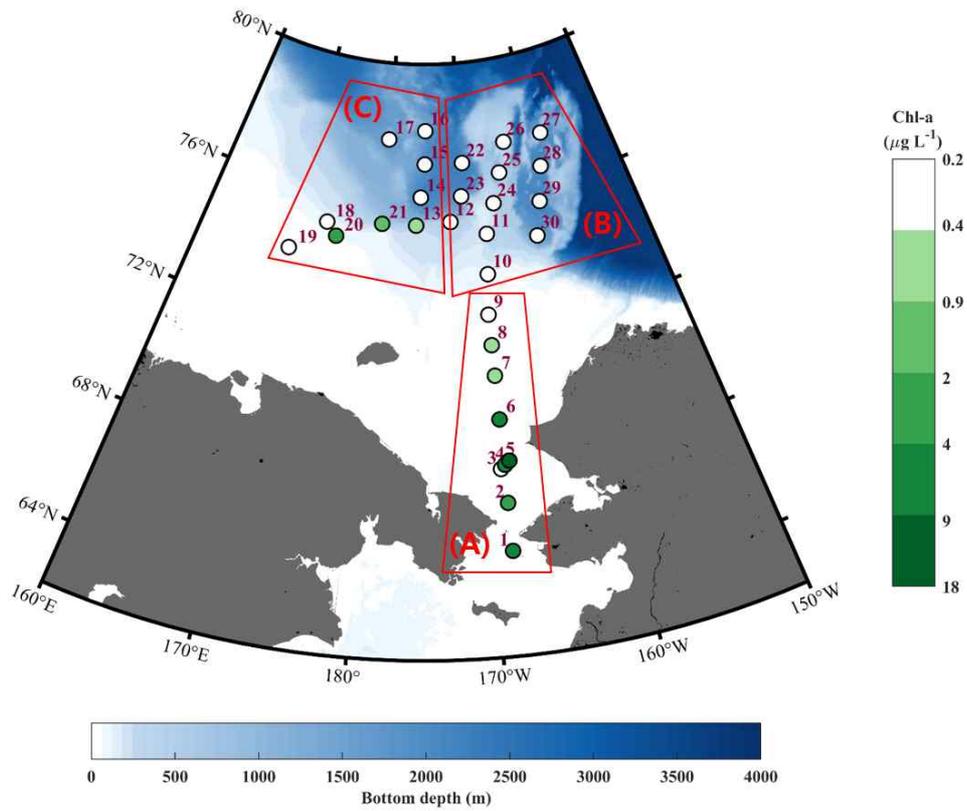


그림 3.1.1.1 2017년 서북극해 조사 정점도와 표층 엽록소 a 농도; (A) 베링해협 북부해역 (Northern Bering Strait, NBS); (B) 척치해 북부해역 (Northern Chukchi Sea, NCS); (C) 동시베리아 북부해역 (Northern East Siberian Sea, NESS)

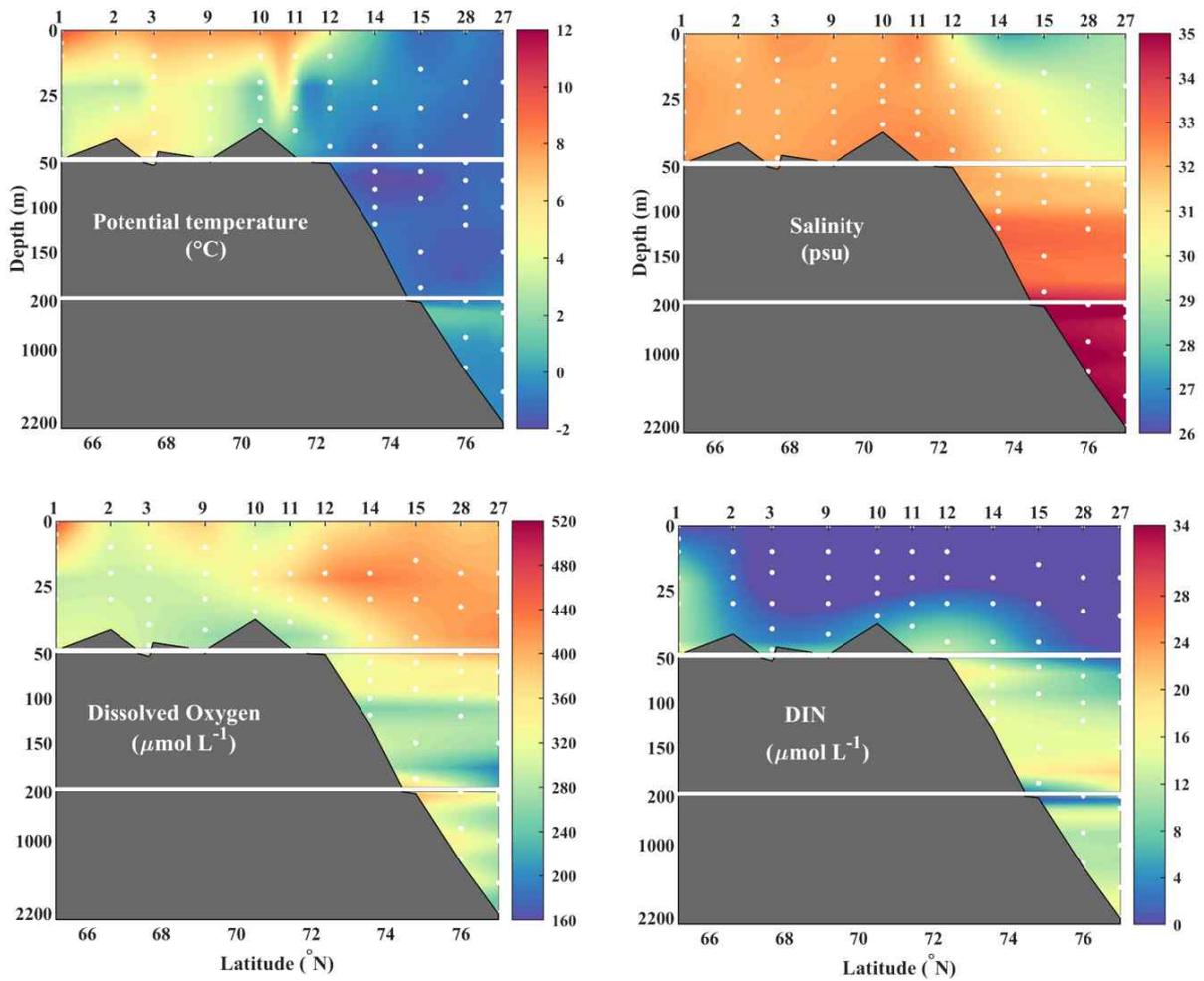


그림 3.1.1.2 2017년 서북극해 단면 프로파일; 수온 (왼쪽 위); 염분 (오른쪽 위); 용존산소 (왼쪽 아래); 용존 무기 질소 (오른쪽 아래); 각 도표의 상단 가로축은 정점 번호를 나타내고 하단 가로축은 위도를 나타냄

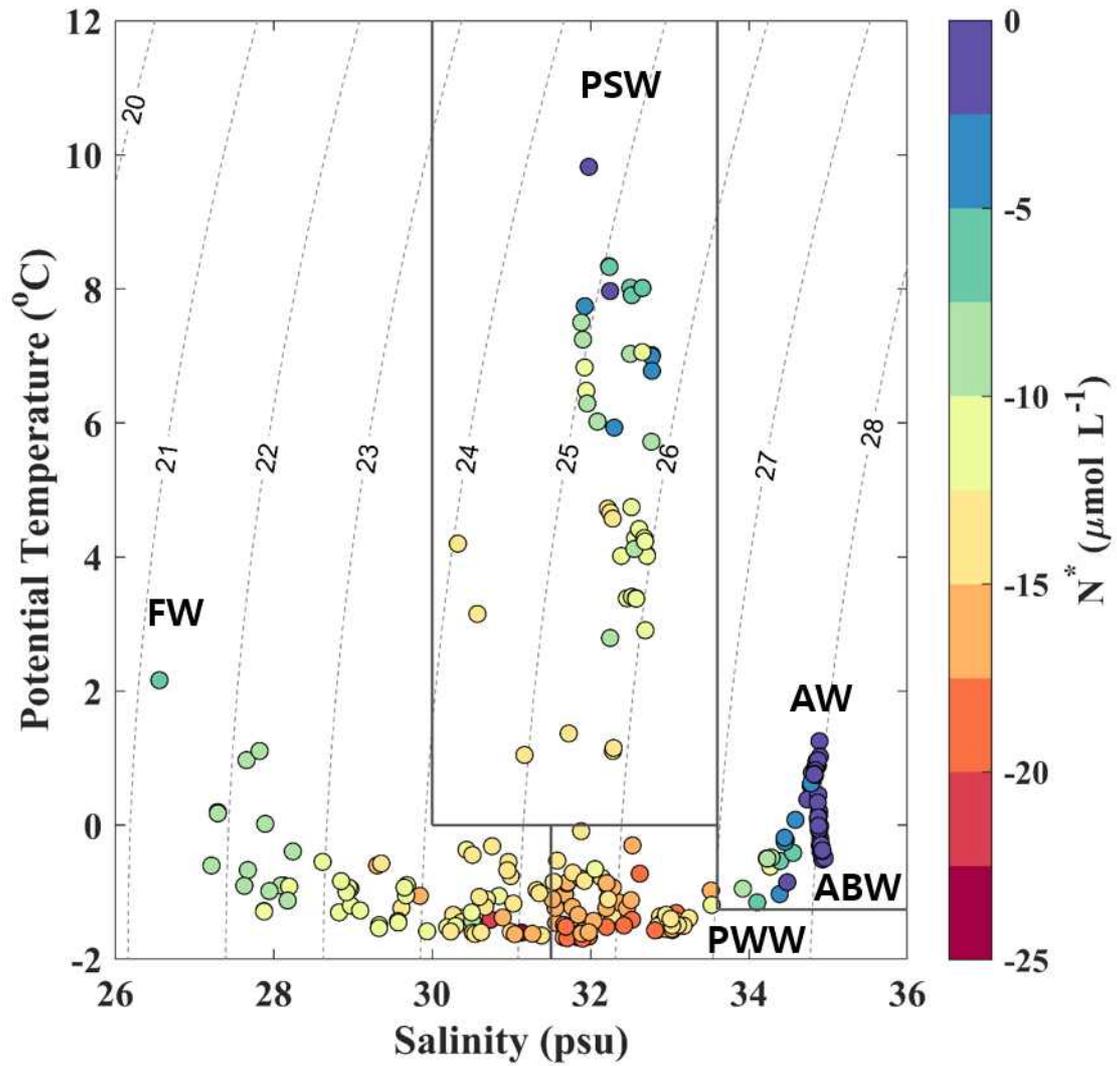


그림 3.1.1.3 2017년 서북극해 수온-염분 도표; 색은 N^* 를 나타냄

나. N₂O 분포와 발생 기작

- NBS의 표층수는 수심에 따라 N₂O 농도가 증가하는 패턴을 보였다 (그림 3.1.1.4). 표층에서는 ~11.1 nmol/L이었고 수심 50m에서는 ~19.4 nmol/L로 증가하였다. 반면에 NCS와 NESS의 표층에서는 약 16 nmol/L 수준으로 일정하게 분포하였다. NBS 표층수의 평균 N₂O 농도는 14.7 ± 2.1 nmol/L이었고, NCS와 NESS 표층수의 평균 N₂O 농도는 15.9 ± 0.8 nmol/L로 나타났다. 하지만 포화도는 NBS가 $113\% \pm 10\%$ 로 NCS와 NESS의 포화도 $95\% \pm 5\%$ 보다 높았다.
- 이후 수심 50 - 200m의 중층에서는 약 22 nmol/L의 N₂O 최대 농도가 관측되었다 (그림 3.1.1.4). 중층의 N₂O 평균 농도는 17.2 ± 1.5 nmol/L이고 평균 포화도는 $107\% \pm 10\%$ 로 나타났다. 연구해역 중 가장 높은 N₂O 농도 (22.0 nmol/L)와 포화도 (138%)가 관측되었다.
- 심층수는 AW와 ABW 수괴로 구성되어 있다. AW 수괴에서 N₂O 농도는 13.9 ± 1.0 nmol/L로 일정하게 관측되었다 (그림 3.1.1.4). 그 아래 ABW 수괴에서는 농도가 소폭 감소하여 12.9 ± 0.8 nmol/L로 관측되었다. 두 수괴 모두 N₂O 포화도는 100% 미만으로 불포화 상태로 나타났다.
- NBS 표층수에서 N₂O 발생의 공급원을 추정하기 위하여 ΔN_2O (= 측정된 N₂O 농도 - 평형 N₂O 농도)와 DIN, N*와의 상관관계를 구하였다. ΔN_2O 와 DIN은 0.68의 양의 상관관계를 보였고, ΔN_2O 와 N*는 -0.38의 음의 상관관계를 나타냈다 (그림 3.1.1.5). 이는 N₂O가 각각 질산화 과정과 탈질산화 과정을 통해서 생성되었음을 암시한다.
- NCS와 NESS 중층은 ΔN_2O 와 겉보기 산소 소비량 (Apparent Oxygen Utilization, AOU), N*와의 상관관계를 구하였다. ΔN_2O 와 AOU는 0.45의 양의 상관관계를 보이고, ΔN_2O 와 N*는 -0.36의 음의 상관관계를 나타냈다 (그림 3.1.1.5). 이는 역시 N₂O가 질산화 과정과 탈질산화 과정을 통해서 생성되었음을 나타낸다.
- NCS와 NESS 심층은 불포화 상태로 농도가 일정하게 나타난다. 이는 질산화 과정이나 탈질산화 과정같은 생지화학 반응에 의한 N₂O 생성이 아닌, 수괴가 이루어지면서 물리적인 작용에 의한 N₂O 농도임을 알 수 있다.

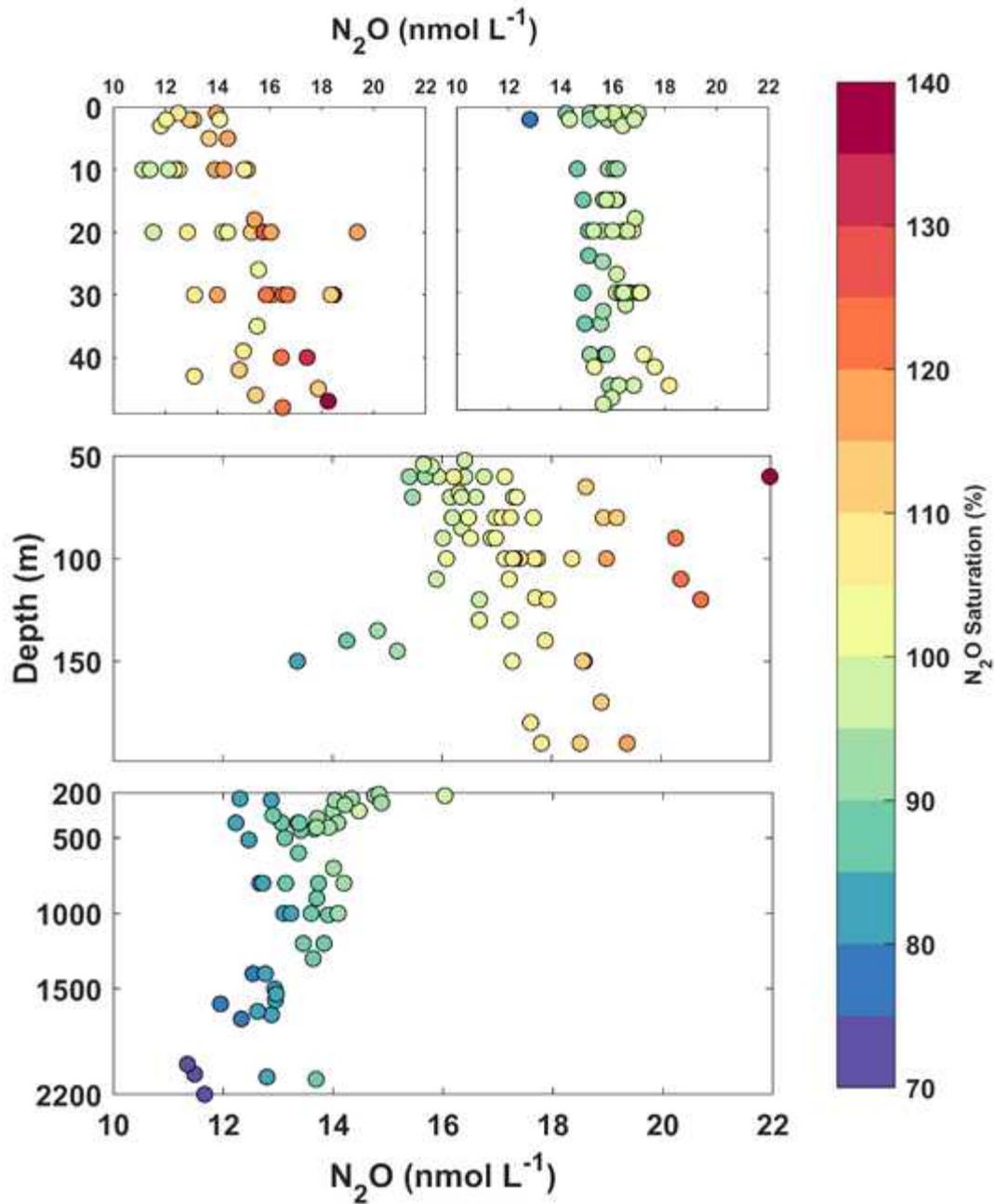


그림 3.1.1.4 2017년 서북극해 N₂O 수직 프로파일; NBS 표층 (왼쪽 위); NCS와 NESS 표층 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층 (가운데); NCS와 NESS 심층 (아래)

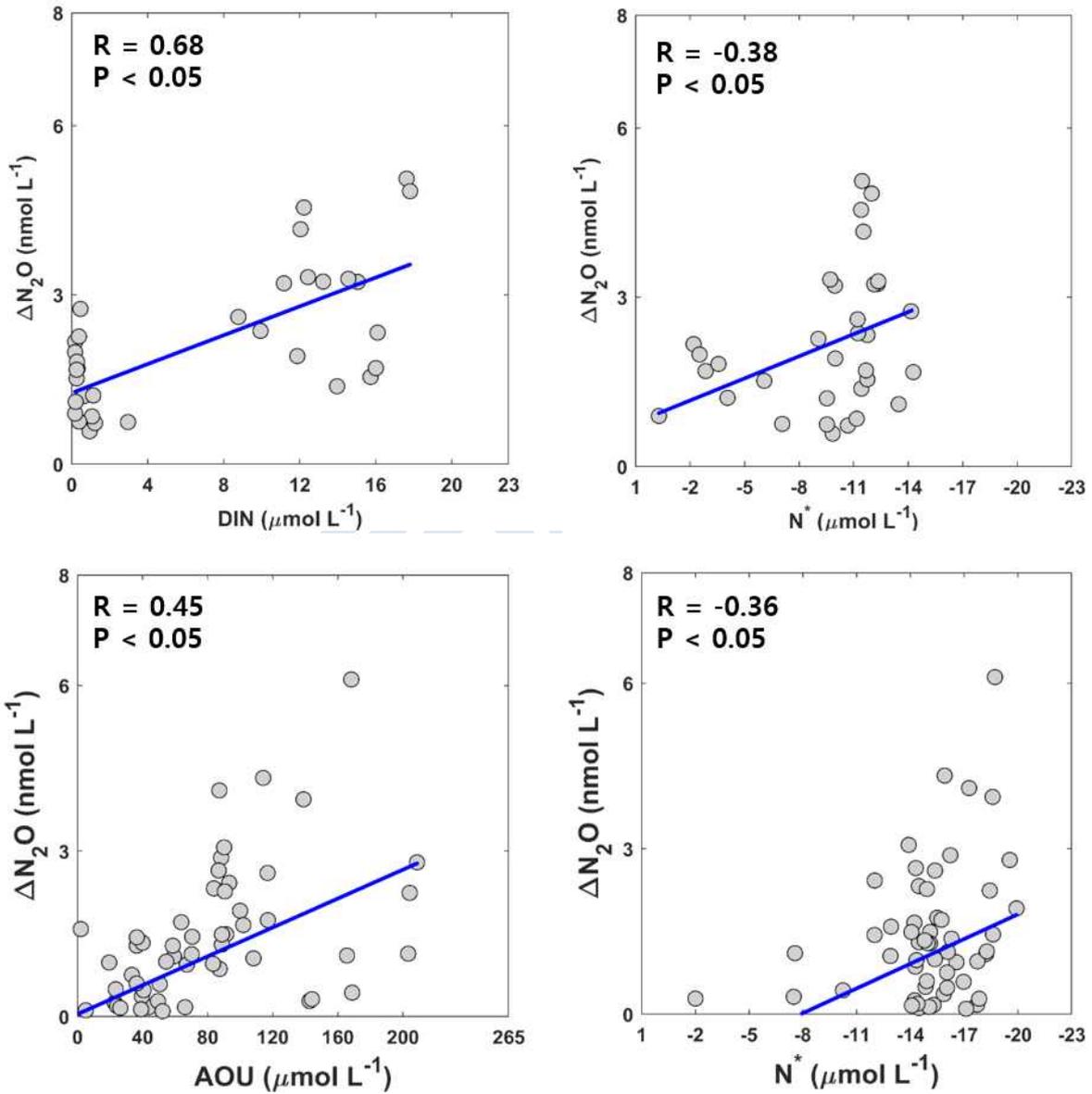


그림 3.1.1.5 2017년 ΔN_2O 와 DIN, N^* , AOU의 상관관계; NBS 표층에서 ΔN_2O 와 DIN의 상관관계 (왼쪽 위); NBS 표층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 AOU의 상관관계 (왼쪽 아래); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽 아래)

다. 해양-대기 N₂O 플럭스 추정 및 조절 인자

- 해양-대기 기체 교환 모델을 이용하여 서북극해의 N₂O 발생량을 계산하였다. NBS 해역은 0.1 - 8.6 $\mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 양의 플럭스 값으로 평균은 $+2.3 \pm 2.7 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.1.1.6). 이는 NBS 해역이 대기로 N₂O를 방출하는 source 역할을 하는 것을 보여준다.
- 반면에 NCS와 NESS의 북부해역은 $-4.3 - 0 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 음의 플럭스 값으로 평균은 $-1.3 \pm 1.5 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.1.1.6). 이는 NCS와 NESS 해역은 대기에서 해양으로 N₂O를 흡수하는 sink 역할을 하는 것을 보여준다.
- 서북극해 N₂O 플럭스의 조절 인자를 추정하기 위하여 플럭스와 여러 환경 인자들 간의 상관관계를 구하였다 (그림 3.1.1.7). N₂O 플럭스와 표층 수온 (sea surface temperature, SST), 표층 염분 (sea surface salinity, SSS)은 각각 0.69와 0.52의 강한 양의 상관관계를 보였다. N₂O 플럭스와 풍속은 유의미한 상관관계를 보이지 않았고 표층 N₂O 평균 농도와는 0.49의 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 2017년 서북극해 N₂O 플럭스는 용해도와 연관 있는 물리적인 인자들 (SST, SSS)과 생지화학적인 과정에 의해 생성된 N₂O 농도에 의해 영향을 받는 것으로 보인다.

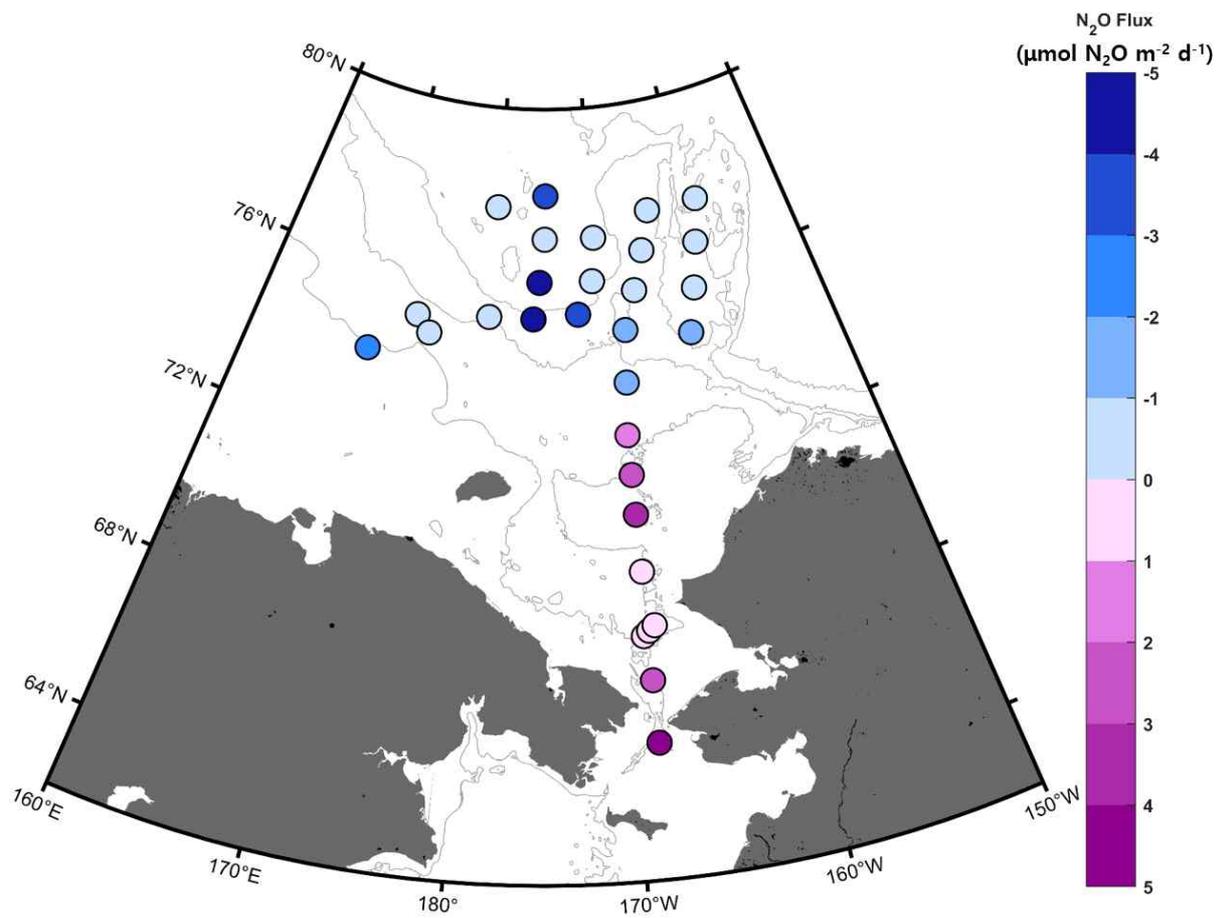


그림 3.1.1.6 2017년 서북극해의 N₂O 플럭스

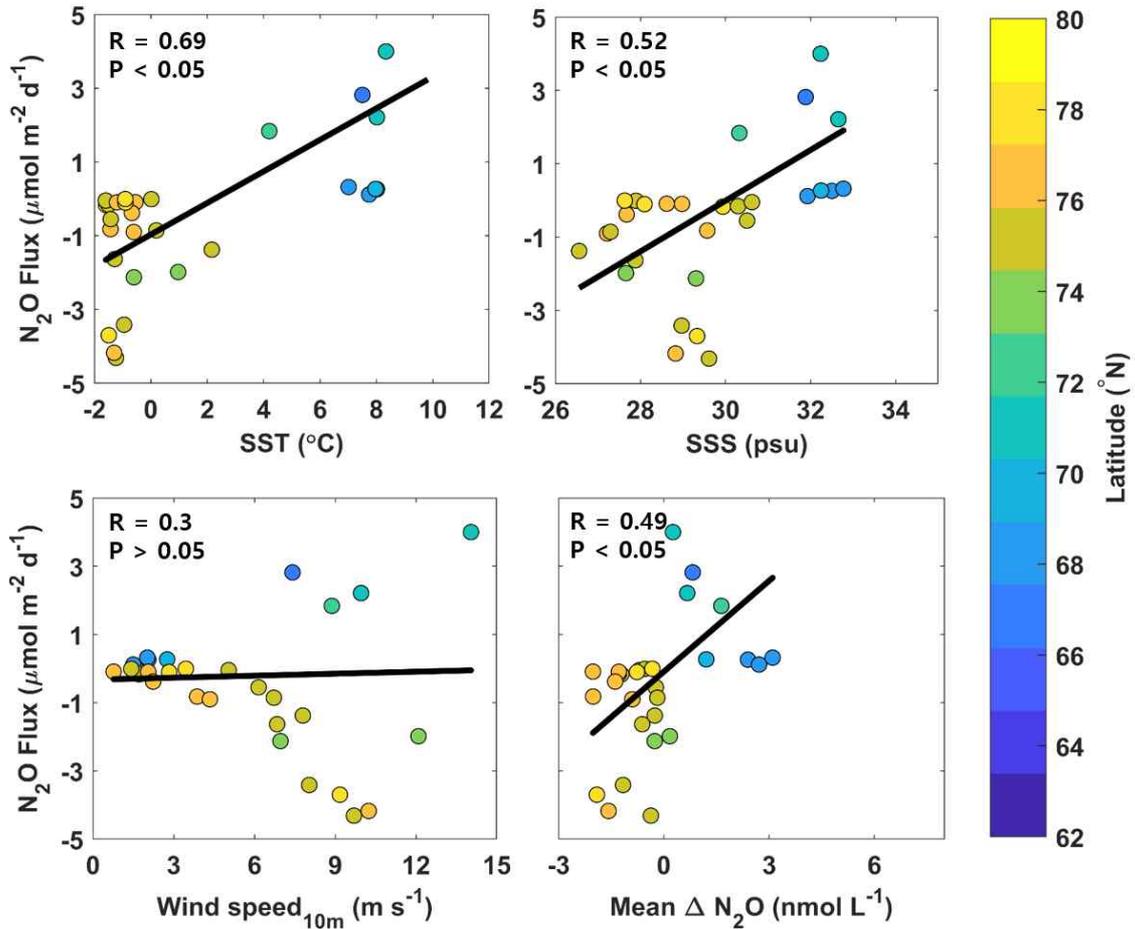


그림 3.1.1.7 2017년 서북극해 N₂O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계; N₂O 플럭스와 Sea Surface Temperature (SST)의 상관관계 (왼쪽 위); N₂O 플럭스와 Sea Surface Salinity (SSS)의 상관관계 (오른쪽 위); N₂O 플럭스와 풍속 (높이 10m)의 상관관계 (왼쪽 아래); N₂O 플럭스와 N₂O 평균 농도 (수심 0-50m)의 상관관계 (오른쪽 아래)

2. 2018년 서북극해 관측 조사

가. 해양 환경 특징

- 2018년 서북극해 현장 조사는 NCS (그림 3.1.2.1A), NESS (그림 3.1.1.1B)의 북부 해역에서 총 27개의 정점에서 수행되었다.
- NCS 해역은 2017년과 마찬가지로 엽록소 a 농도가 낮았던 반면에, NESS 해역은 엽록소 a 농도가 높게 나타났다 (그림 3.1.2.1). NESS 해역의 평균 엽록소 농도는 $2.14 \pm 2.49 \mu\text{g/L}$ 로 조사 당시 해역의 생산성이 높았음을 보여준다.
- NCS 해역의 표층수는 평균 수온은 $-1.00 \text{ }^\circ\text{C}$, 평균 염분은 29.56 psu, 용존 무기 질소는 $16.75 \mu\text{mol/L}$ 로 나타났다 (그림 3.1.2.2). NESS 해역의 표층수는 평균 수온은 $-1.47 \text{ }^\circ\text{C}$, 평균 염분은 30.93 psu, 용존 무기 질소는 $4.36 \mu\text{mol/L}$ 로 나타났다.
- 표층수의 용존 산소는 NCS는 $386.6 \mu\text{mol/L}$, NESS는 $395.4 \mu\text{mol/L}$ 로 NESS 해역에서 더 높았다 (그림 3.1.2.2).
- 2017년과는 달리 표층수는 수온과 염분이 낮은 FW 수괴로만 구성되어 있다 (그림 3.1.2.3).
- 중층수는 수온이 굉장히 낮고 (평균 $-1.21 \text{ }^\circ\text{C}$), 상대적으로 염분이 높고 (평균 32.94 psu), 영양염이 풍부한 (DIN 평균 $12.09 \mu\text{mol/L}$) PWW 수괴가 존재하였다 (그림 3.1.2.3).
- PWW 아래 수심 200m와 1000m 사이에는 최대 수온 ($\sim 1.26 \text{ }^\circ\text{C}$), 높은 염도 ($\sim 34.89 \text{ psu}$)의 특징이 나타나는 AW가 존재하는 것이 확인되었다 (그림 3.1.2.3). AW는 PWW에 비해 상대적으로 N^* 최댓값을 보였다. 수심 1000m AW 아래에는 상대적으로 균질한 수온과 염분 ($\theta < 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $S = \sim 34.90 \text{ psu}$) 분포를 보이는 ABW가 존재하였으며, 가장 큰 N^* 값을 보였다.

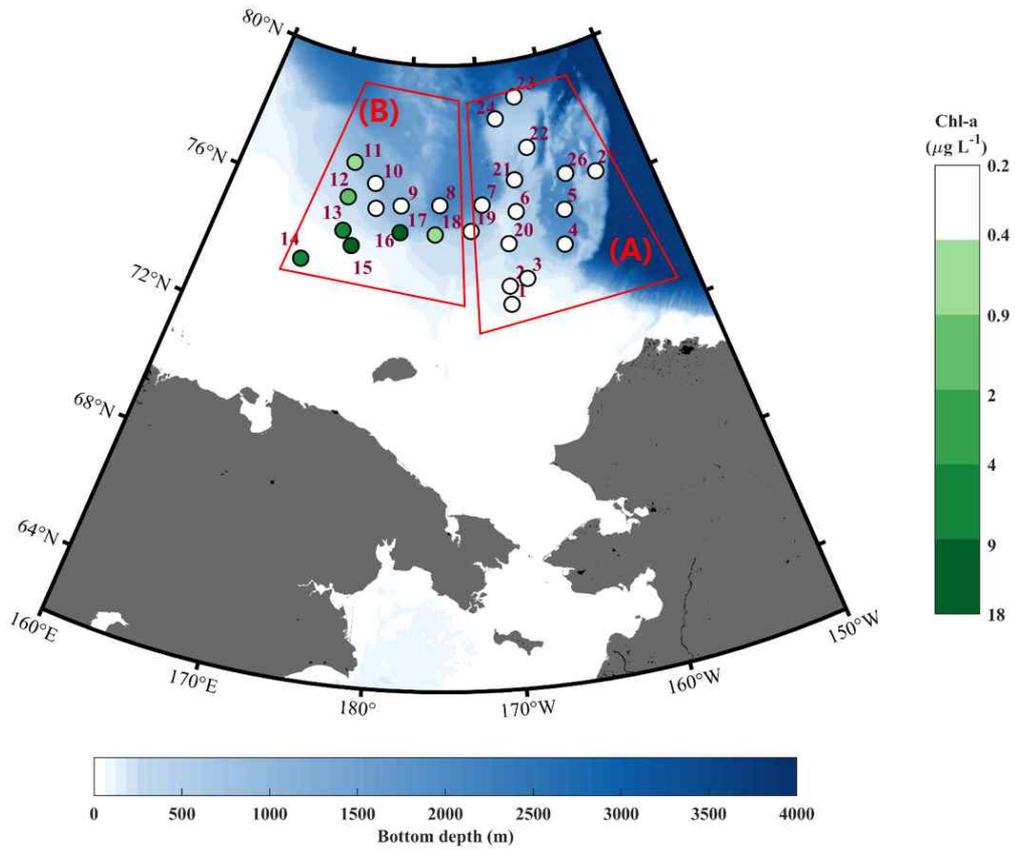


그림 3.1.2.1 2018년 서북극해 조사 정점도와 표층 엽록소 a 농도; (A) 척치해 북부해역 (Northern Chukchi Sea, NCS); (B) 동시베리아 북부해역 (Northern East Siberian Sea, NESS)

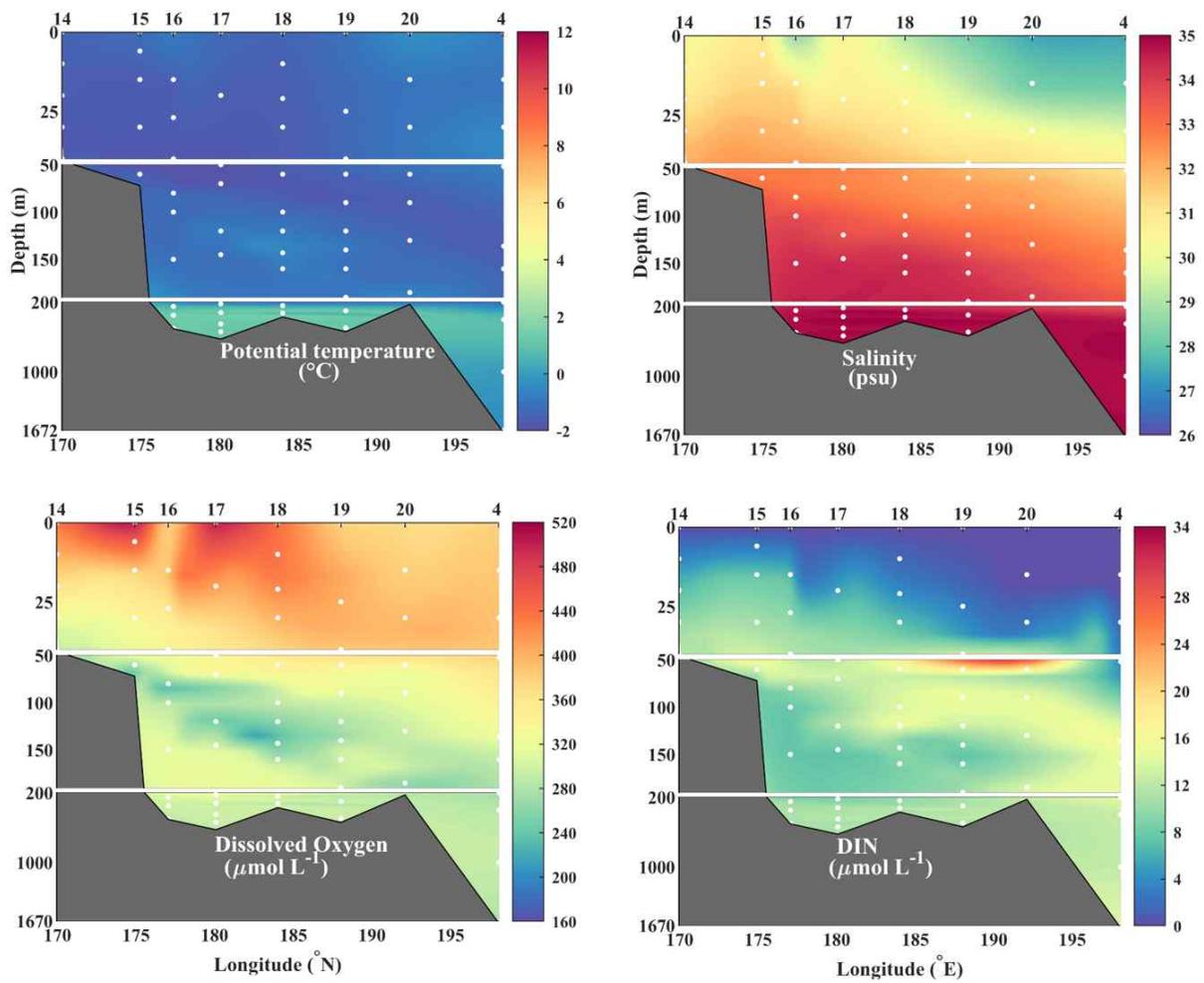


그림 3.1.2.2 2018년 서북극해 단면 프로파일; 수온 (왼쪽 위); 염분 (오른쪽 위); 용존산소 (왼쪽 아래); 용존 무기 질소 (오른쪽 아래); 각 도표의 상단 가로축은 정점 번호를 나타내고 하단 가로축은 경도를 나타냄

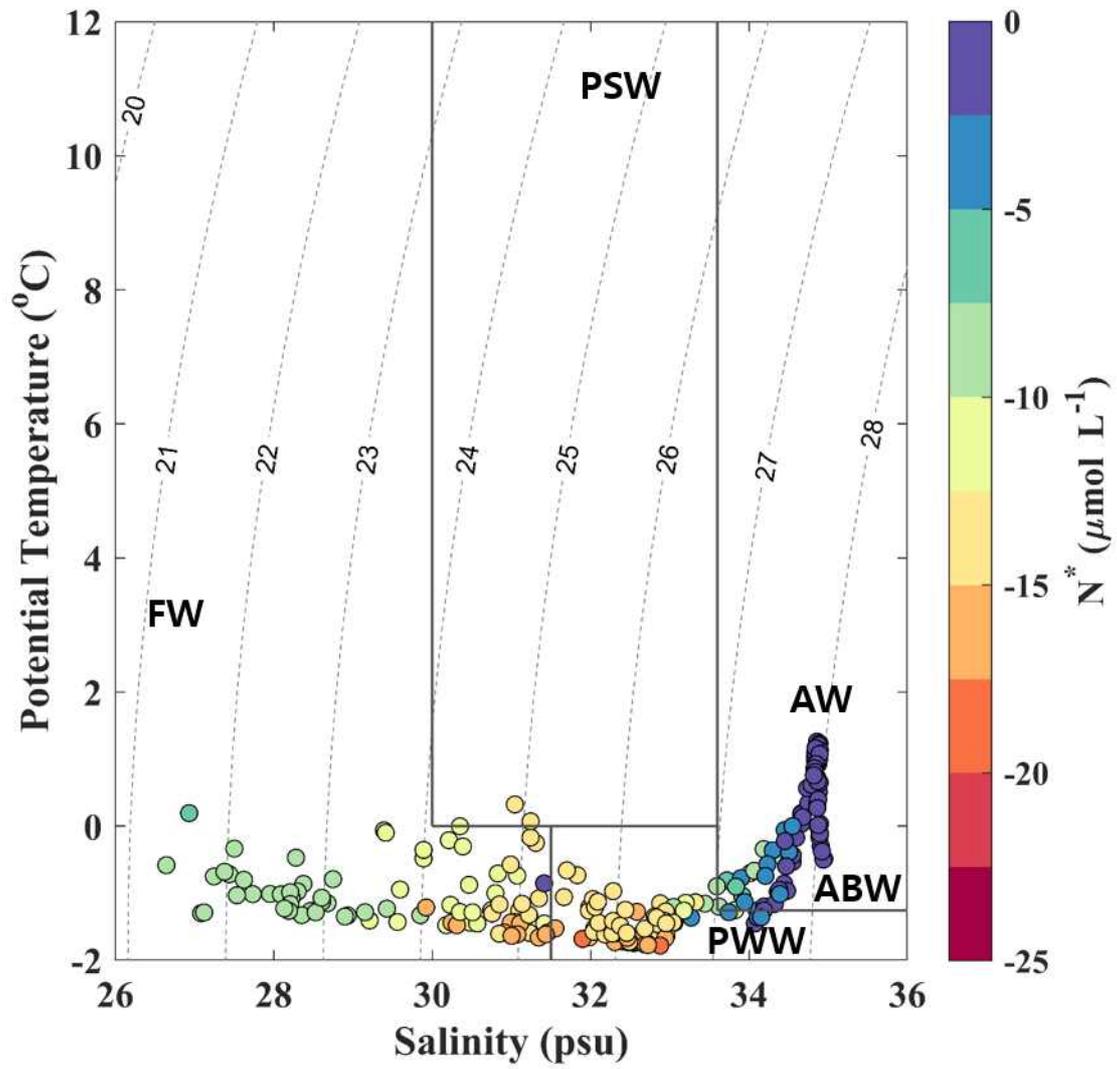


그림 3.1.2.3 2018년 서북극해 수온-염분 도표; 색은 N^* 를 나타냄

나. N₂O 분포와 발생 기작

- NCS의 표층에서는 평균 16.8 ± 1.0 nmol/L 수준으로 일정하게 분포하였다 (그림 3.1.2.4). NESS 표층수의 평균 N₂O 농도는 17.2 ± 1.1 nmol/L로 NCS 해역보다 다소 높게 나타났다. 하지만 포화도는 NCS와 NESS 각각 $100\% \pm 6\%$, $98\% \pm 6\%$ 로 큰 차이는 보이지 않았다.
- 이후 수심 50 - 200m의 중층에서는 약 20.7 nmol/L의 N₂O 최대 농도가 관측되었다 (그림 3.1.2.4). 중층의 N₂O 평균 농도는 17.5 ± 1.6 nmol/L이고 평균 포화도는 $104\% \pm 9\%$ 로 나타났다. 연구해역 중 가장 높은 N₂O 농도 (20.7 nmol/L)와 포화도 (123%)가 관측되었다.
- 심층수는 AW와 ABW 수괴로 구성되어 있다. AW 수괴에서 N₂O 농도는 15.0 ± 1.7 nmol/L로 일정하게 관측되었다 (그림 3.1.2.4). 그 아래 ABW 수괴에서는 농도가 소폭 감소하여 13.6 ± 0.7 nmol/L로 관측되었다. 두 수괴 모두 N₂O 포화도는 100% 미만으로 불포화 상태로 나타났다.
- NCS와 NESS 표층수는 대체적으로 포화도가 100% 가까워 대기와 평형을 이루고 있다. 이는 생지화학적 N₂O 생성보다 용해도와 같은 물리적인 요소에 의해 N₂O 농도가 영향을 받고 있음을 보여준다.
- NCS와 NESS 중층은 ΔN_2O 와 AOU, N*와의 상관관계를 구하였다. ΔN_2O 와 AOU는 유의미한 상관관계를 보이지 않았지만, ΔN_2O 와 N*는 -0.43의 음의 상관관계를 나타냈다 (그림 3.1.2.5). 이는 N₂O가 질산화 과정보다는 탈질산화 과정을 통해서 생성되었음을 나타낸다.
- NCS와 NESS 심층은 불포화 상태로 농도가 일정하게 나타난다. 이는 질산화 과정이나 탈질산화 과정같은 생지화학 반응에 의한 N₂O 생성이 아닌, 수괴가 이루어지면서 물리적인 작용에 의한 N₂O 농도임을 알 수 있다.

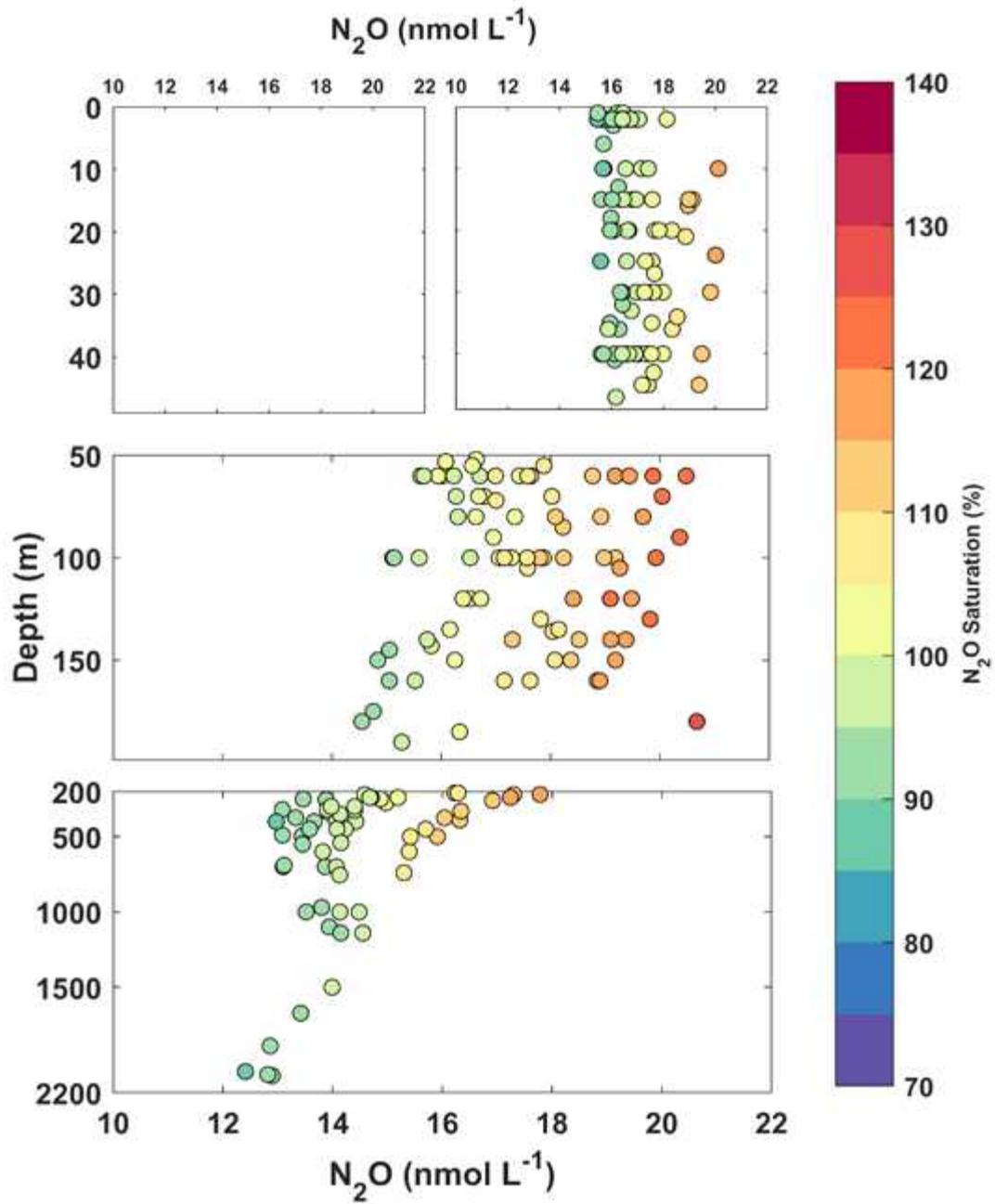


그림 3.1.2.4 2018년 서북극해 N₂O 수직 프로파일; NCS와 NESS 표층 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층 (가운데); NCS와 NESS 심층 (아래)

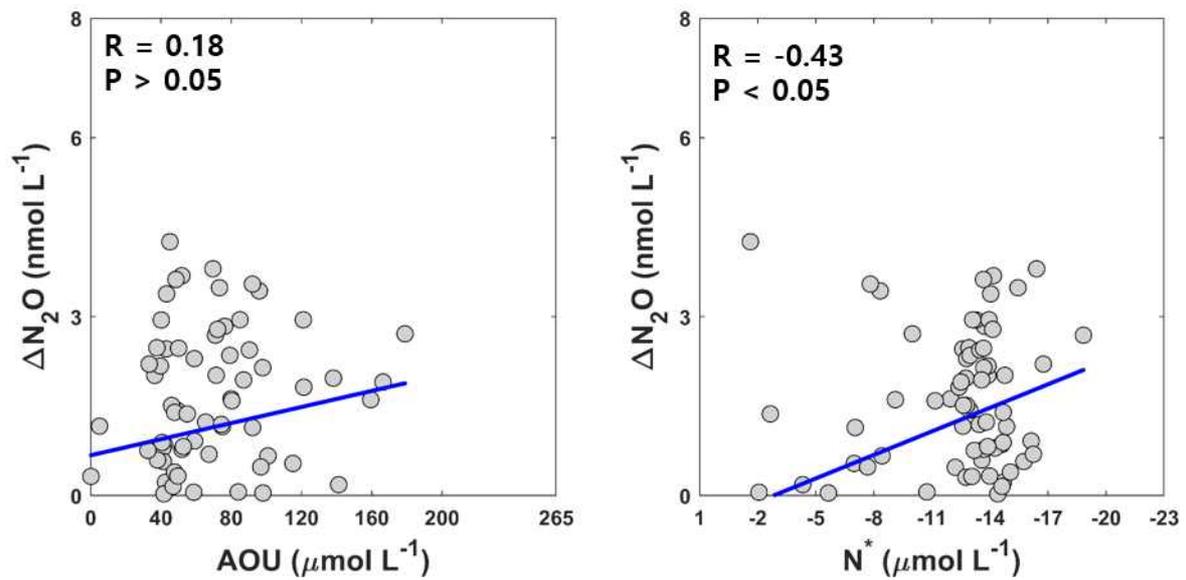


그림 3.1.2.5 2018년 ΔN_2O 와 AOU, N^* 의 상관관계; NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 AOU의 상관관계 (왼쪽); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽)

다. 해양-대기 N₂O 플럭스 추정 및 조절 인자

- 해양-대기 기체 교환 모델을 이용하여 서북극해의 N₂O 발생량을 계산하였다. NCS 해역은 $-4.4 - 0 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 음의 플럭스 값으로 평균은 $-0.8 \pm 1.1 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.1.2.6). 이는 NCS 해역이 대기에서 해양으로 N₂O를 흡수하는 sink 역할을 하는 것을 보여준다.
- NESS 해역은 $-1.7 - 0.1 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 대체적으로 음의 플럭스 값으로 평균은 $-0.7 \pm 0.6 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.1.2.6). 이는 NESS 해역 역시 NCS와 마찬가지로 대기에서 해양으로 N₂O를 흡수하는 sink 역할을 하는 것을 보여준다.
- N₂O 플럭스와 표층 수온 (sea surface temperature, SST), 표층 염분 (sea surface salinity, SSS)은 각각 0.21과 0.23으로 유의미한 상관관계를 보이지 않았다 (그림 3.1.2.7). N₂O 플럭스와 풍속은 -0.7 로 강한 음의 상관관계를 보였고 표층 N₂O 평균 농도와는 0.51의 강한 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 2018년 서북극해 북부해역에서는 N₂O 플럭스는 용해도와 연관 있는 물리적인 인자들 (SST, SSS)에는 크게 영향을 받지 않았고, 바람과 N₂O 농도에 의해 영향을 받는 것으로 보인다.

극지연구소

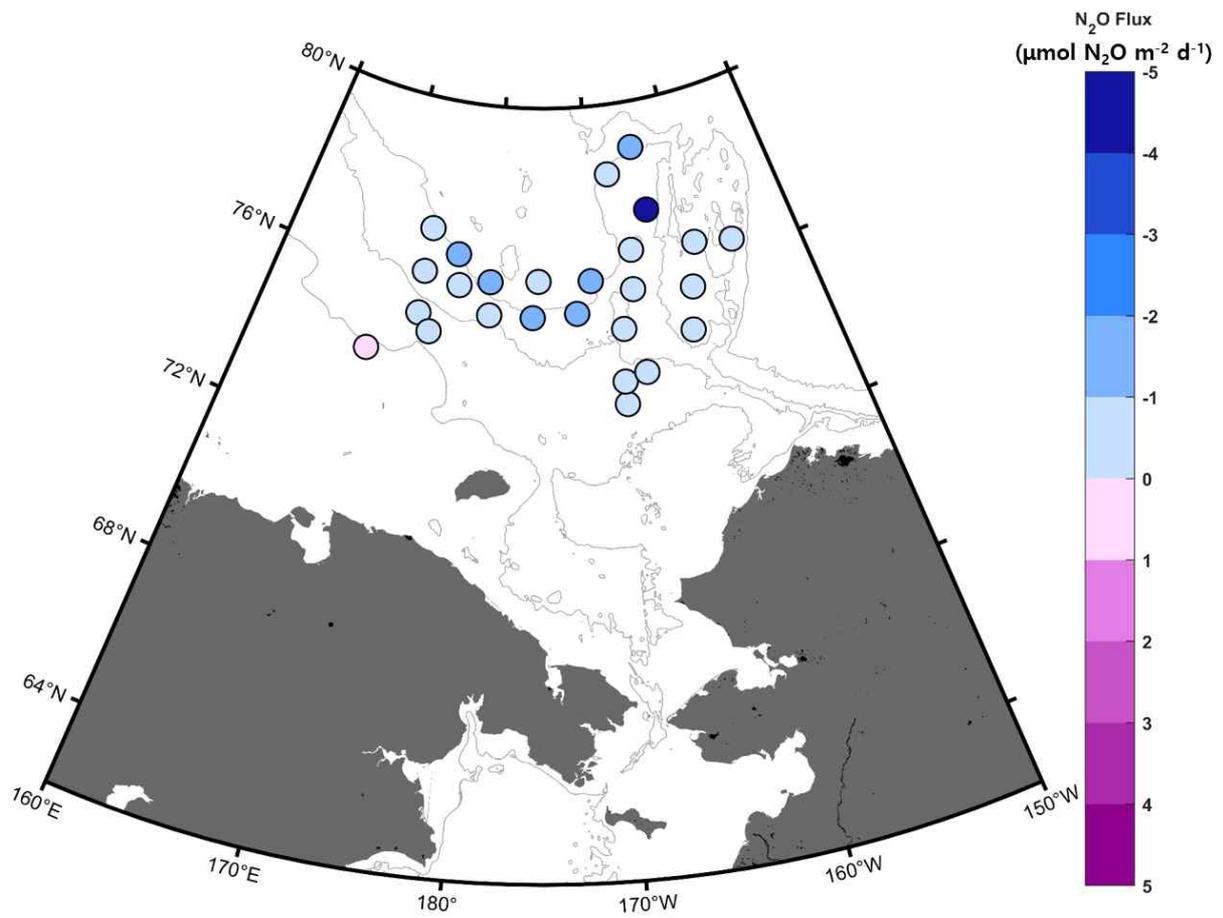


그림 3.1.2.6 2018년 서북극해의 N₂O 플럭스

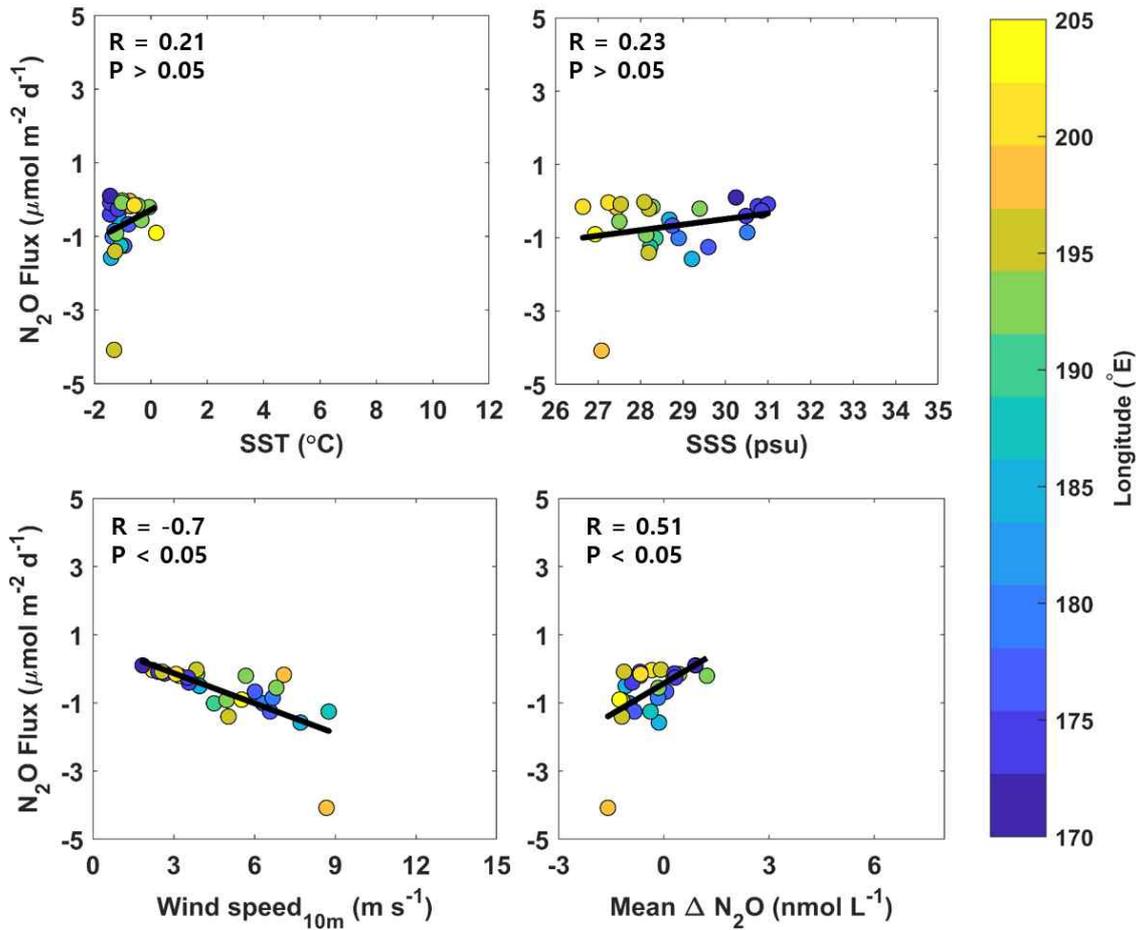


그림 3.1.2.7 2018년 서북극해 N₂O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계; N₂O 플럭스와 Sea Surface Temperature (SST)의 상관관계 (왼쪽 위); N₂O 플럭스와 Sea Surface Salinity (SSS)의 상관관계 (오른쪽 위); N₂O 플럭스와 풍속 (높이 10m)의 상관관계 (왼쪽 아래); N₂O 플럭스와 N₂O 평균 농도 (수심 0-50m)의 상관관계 (오른쪽 아래)

3. 2019년 서북극해 관측 조사

가. 해양 환경 특징

- 2019년 서북극해 현장 조사는 베링해협 북부해역 (Northern Bering Strait; NBS, 그림 3.1.3.1A), 척치해 북부해역 (Northern Chukchi Sea; NCS, 그림 3.1.3.1B), 동시베리아 북부해역 (Northern East Siberian Sea; NESS, 그림 3.1.3.1C)에서 총 34개의 정점에서 수행되었다.
- NBS 해역은 최대 엽록소 a 농도인 17.92 $\mu\text{g/L}$ 로 관측되었으며, 대체적으로 높은 엽록소 a 농도가 나타났다 (평균 $2.99 \pm 3.91 \mu\text{g/L}$) (그림 3.1.3.1). 이를 통해 NBS가 매우 생산적인 해역임을 보여준다. 반면에 NCS와 NESS는 낮은 엽록소 a 농도가 나타났다.
- NBS 해역의 표층수 (수심 < 50m)는 북부해역들의 표층수와 비교했을 때 일반적으로 수온이 더 높고, 염분이 높고, 영양염이 더 풍부했다 (그림 3.1.3.2). NBS 해역의 표층수의 수온 (θ)은 평균 5.55 $^{\circ}\text{C}$, 염분 (S)은 32.21 psu, 용존 무기 질소 (DIN)는 5.69 $\mu\text{mol/L}$ 로 나타났다.
- 반면에 북부해역 (NCS와 NESS)의 표층수는 상대적으로 수온과 염분이 더 낮고 영양염도 적었다 (그림 3.1.3.2). 북부해역 표층수의 평균 수온은 -0.28 $^{\circ}\text{C}$, 염분은 30.00 psu, DIN은 3.54 $\mu\text{mol/L}$ 로 나타났다.
- 표층수의 용존 산소는 NBS의 경우 평균 340.1 $\mu\text{mol/L}$, 북부해역은 평균 384.0 $\mu\text{mol/L}$ 로 NBS보다 NCS와 NESS에서 더 높게 나타나는 경향을 보였다 (그림 3.1.3.2).
- 2019년 연구해역의 표층수는 두 개의 수괴로 구성되어 있다 (그림 3.1.3.3). 한 수괴는 수온과 염분이 높고, 영양염이 풍부한 PSW이고, 또 다른 수괴는 수온과 염분이 낮고 영양염이 고갈된 수괴인 FW이다.
- 중층수 (수심 50 - 200m)는 북부해역의 경우 수온이 굉장히 낮고 (< 0 $^{\circ}\text{C}$), 상대적으로 고염도 (30.0 - 34.7 psu)이고, 영양염이 풍부하며 (평균 DIN 12.1 $\mu\text{mol/L}$), N*

최솟값을 가지는 물인 PWW가 존재했다 (그림 3.1.3.3).

- PWW 아래 수심 200m와 1000m 사이에는 최대 수온 (~ 1.06 °C), 높은 염도 (~ 34.88 psu)의 특징인 AW가 나타난다 (그림 3.1.3.3). 수심 1000m 아래에는 상대적으로 균질한 수온과 염분 ($\Theta < 0$ °C, $S = \sim 34.91$ psu) 분포를 보이고 가장 큰 N^* 값을 가지는 ABW가 나타난다 (그림 3.1.3.3).



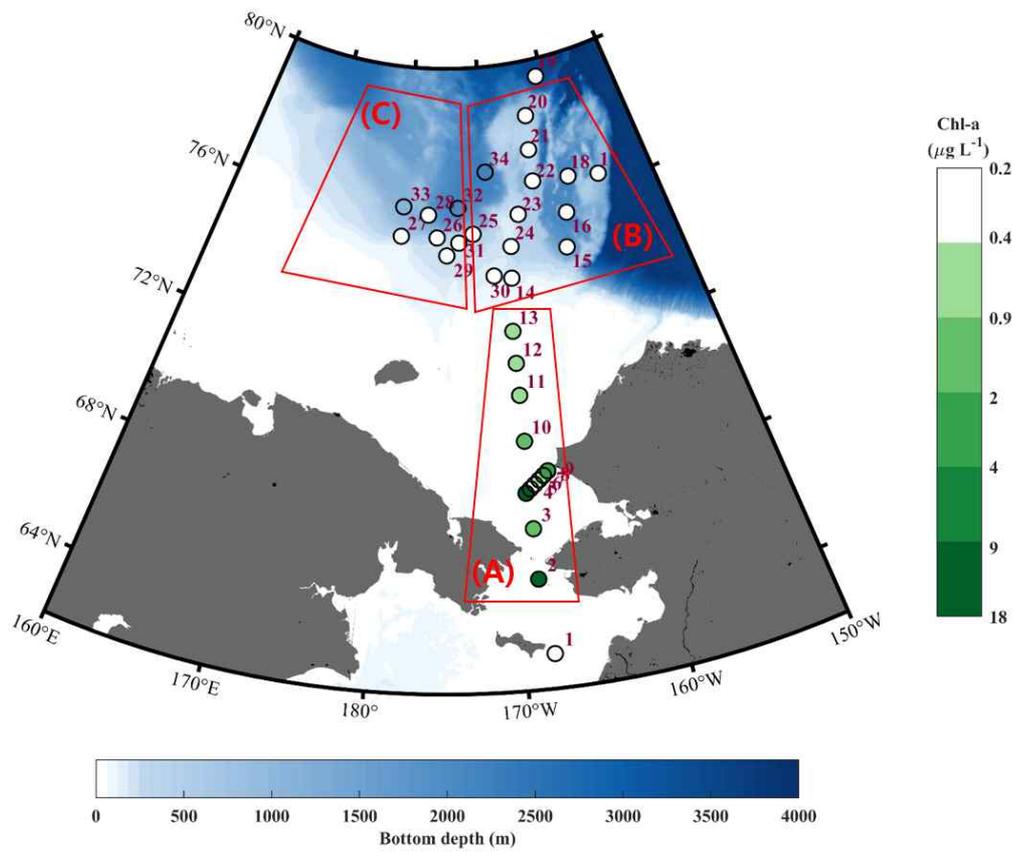


그림 3.1.3.1 2019년 서북극해 조사 정점도와 표층 엽록소 a 농도; (A) 베링해협 북부해역 (Northern Bering Strait, NBS); (B) 척치해 북부해역 (Northern Chukchi Sea, NCS); (C) 동시베리아 북부해역 (Northern East Siberian Sea, NESS)

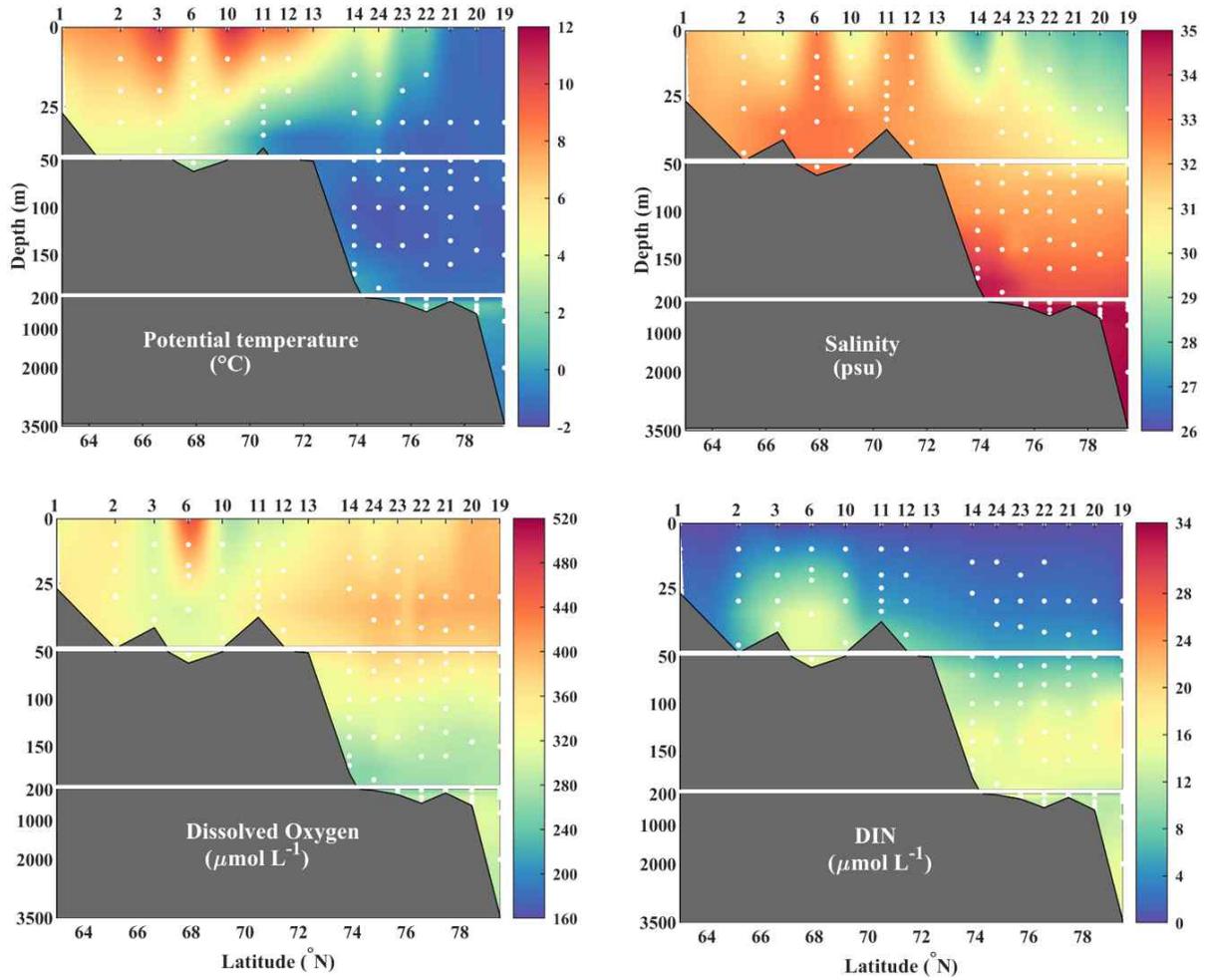


그림 3.1.3.2 2019년 서북극해 단면 프로파일; 수온 (왼쪽 위); 염분 (오른쪽 위); 용존산소 (왼쪽 아래); 용존 무기 질소 (오른쪽 아래); 각 도표의 상단 가로축은 정점 번호를 나타내고 하단 가로축은 위도를 나타냄

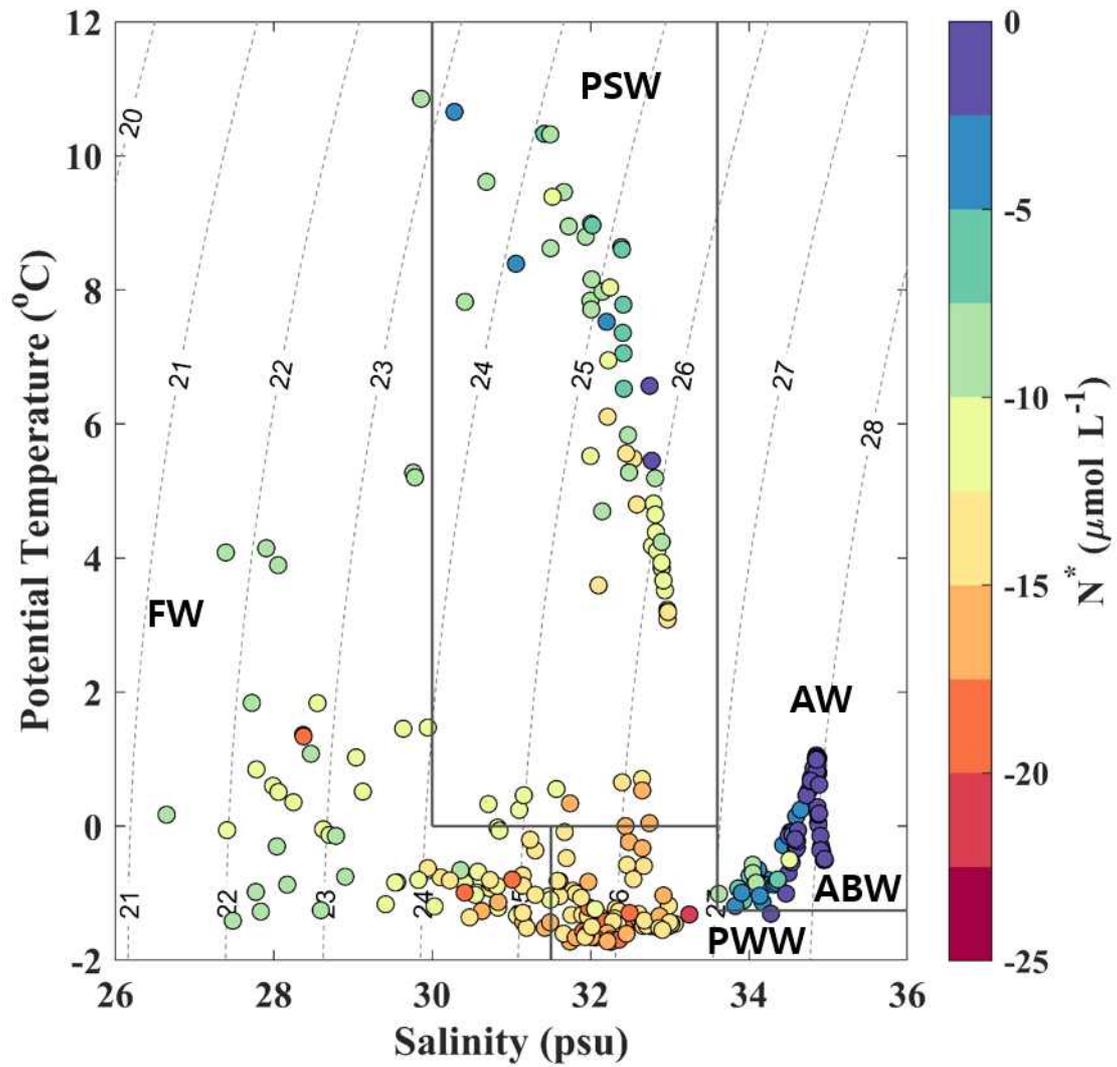


그림 3.1.3.3 2019년 서북극해 수온-염분 도표; 색은 N^* 를 나타냄

나. N₂O 분포와 발생 기작

- NBS의 표층수는 수심에 따라 다양한 N₂O 농도 분포를 보였다 (그림 3.1.3.4). 표층에서는 10.9 - 19.0 nmol/L이었고 수심 50m에서는 11.9 - 20.8 nmol/L로 증가하였다. 반면에 NCS와 NESS의 표층에서는 평균 16 nmol/L 수준으로 상대적으로 일정하게 분포하였다. NBS 표층수의 평균 N₂O 농도는 15.1 ± 2.5 nmol/L이었고, NCS와 NESS 표층수의 평균 N₂O 농도는 16.8 ± 1.4 nmol/L로 나타났다. 하지만 포화도는 NBS가 $114\% \pm 12\%$ 로 NCS와 NESS의 포화도 $102\% \pm 6\%$ 보다 높았다.
- 수심 50 - 200m의 중층에서는 약 22.4 nmol/L의 N₂O 최대 농도가 관측되었다 (그림 3.1.3.4). 중층의 N₂O 평균 농도는 17.2 ± 1.5 nmol/L이고 평균 포화도는 $103\% \pm 9\%$ 로 나타났다. 연구해역 중 가장 높은 N₂O 농도 (22.4 nmol/L)와 포화도 (138%)가 관측되었다.
- 심층수는 AW와 ABW 수괴로 구성되어 있다. AW 수괴에서 N₂O 농도는 14.8 ± 1.3 nmol/L로 일정하게 관측되었다 (그림 3.1.3.4). 그 아래 ABW 수괴에서는 농도가 소폭 감소하여 13.9 ± 1.1 nmol/L로 관측되었다. 두 수괴 모두 N₂O 포화도는 100% 미만으로 불포화 상태로 나타났다.
- NBS 표층수에서 N₂O 발생의 공급원을 추정하기 위하여 Δ N₂O와 DIN, N*와의 상관관계를 구하였다. Δ N₂O와 DIN은 0.82의 굉장히 강한 양의 상관관계를 보였고, Δ N₂O와 N*는 -0.63의 역시 강한 음의 상관관계를 보였다 (그림 3.1.3.5). 이는 N₂O가 각각 질산화 과정과 탈질산화 과정을 통해서 생성되었음을 암시한다.
- NCS와 NESS 중층은 Δ N₂O와 AOU, N*와의 상관관계를 구하였다. Δ N₂O와 AOU는 0.39의 양의 상관관계를 보이고, Δ N₂O와 N*는 -0.33의 음의 상관관계를 나타냈다 (그림 3.1.3.5). 이는 역시 N₂O가 질산화 과정과 탈질산화 과정을 통해서 생성되었음을 나타낸다.
- NCS와 NESS 심층은 불포화 상태로 농도가 일정하게 나타난다. 이는 질산화 과정이나 탈질산화 과정같은 생지화학 반응에 의한 추가적인 N₂O 생성이 아닌, 수괴가 이루어지면서 물리적인 작용에 의한 N₂O 농도임을 알 수 있다.

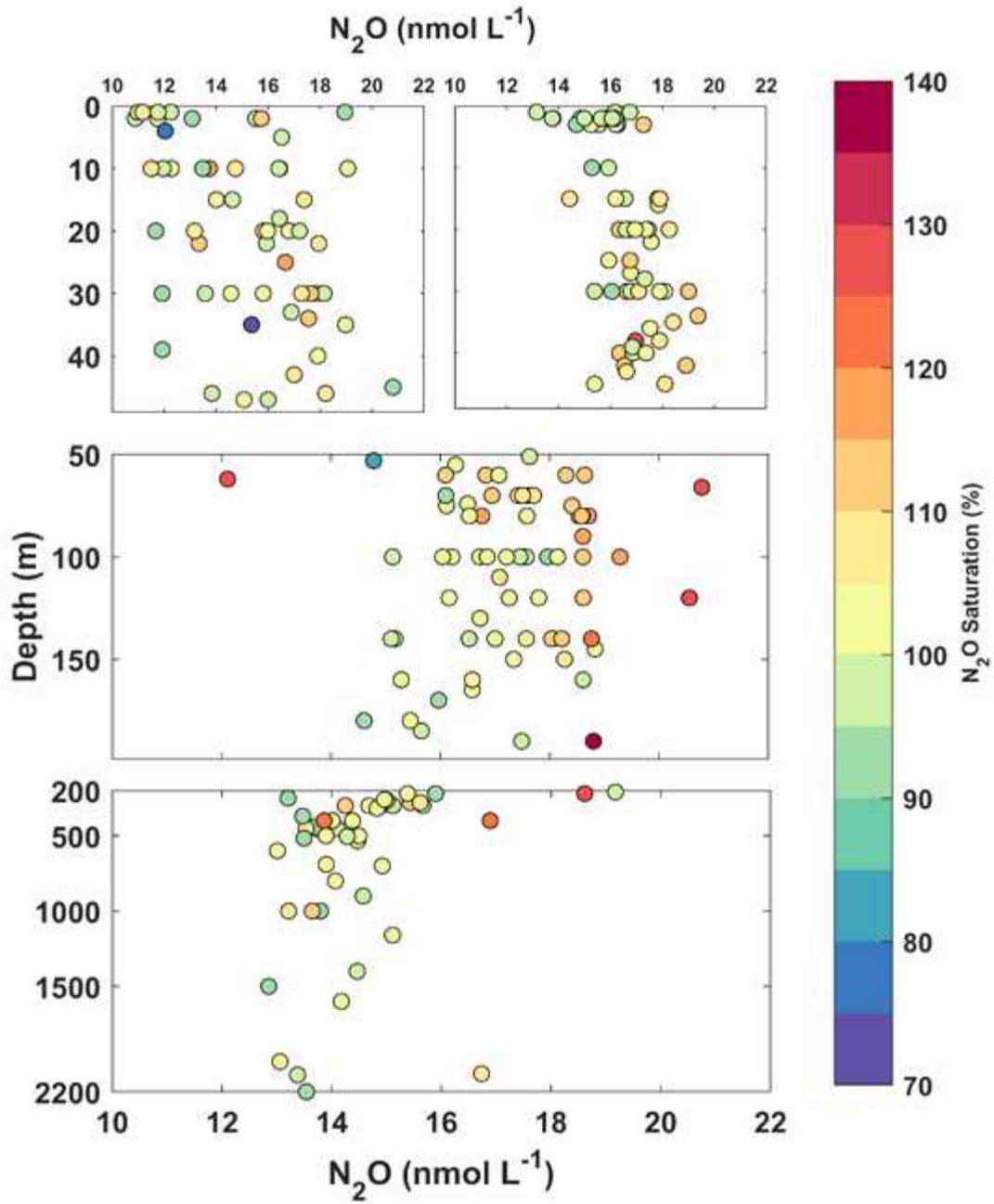


그림 3.1.3.4 2019년 서북극해 N_2O 수직 프로파일; NBS 표층 (왼쪽 위); NCS와 NESS 표층 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층 (가운데); NCS와 NESS 심층 (아래)

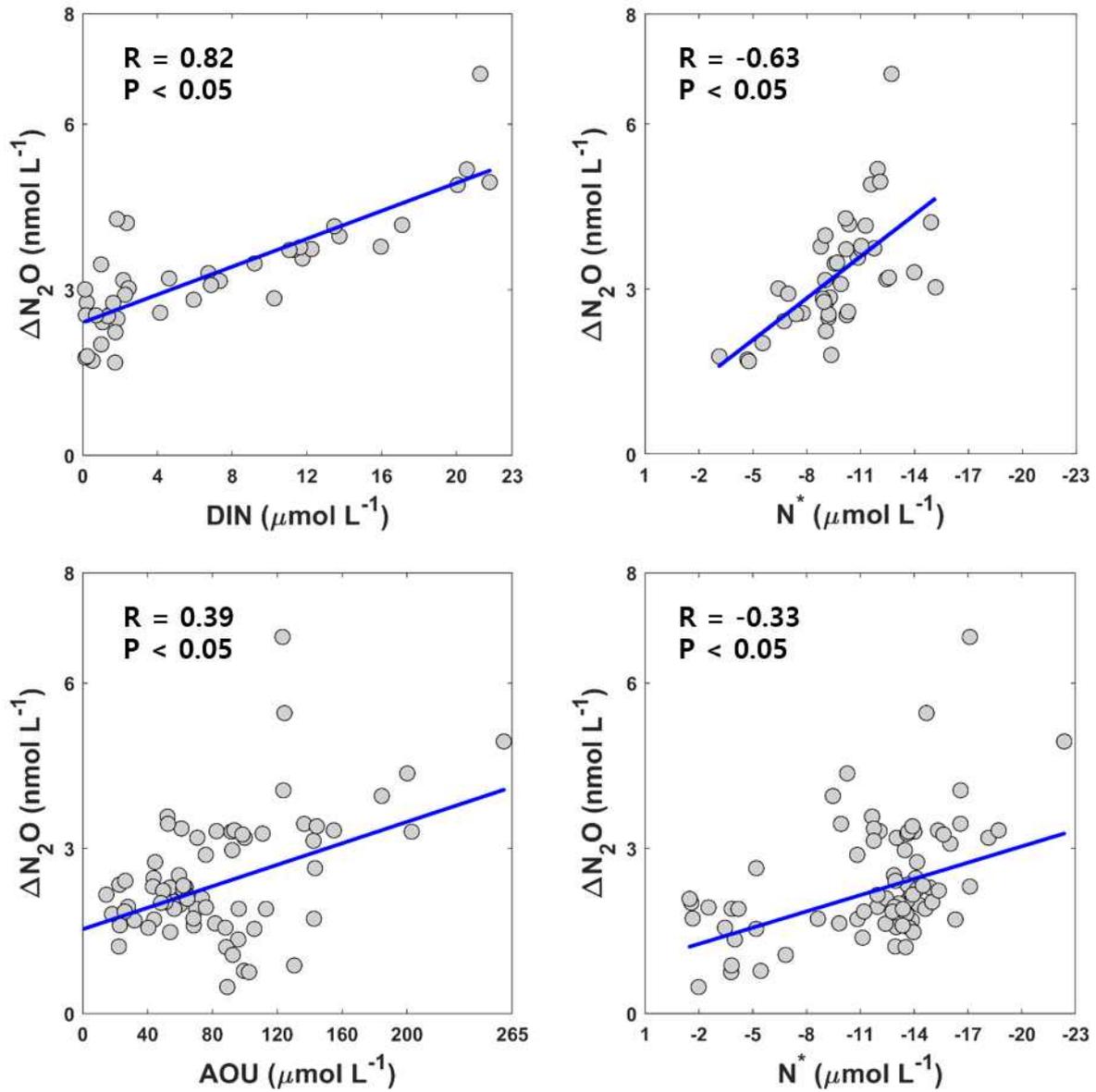


그림 3.1.3.5 2019년 ΔN_2O 와 DIN, N^* , AOU의 상관관계; NBS 표층에서 ΔN_2O 와 DIN의 상관관계 (왼쪽 위); NBS 표층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 AOU의 상관관계 (왼쪽 아래); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽 아래)

다. 해양-대기 N₂O 플럭스 추정 및 조절 인자

- 해양-대기 기체 교환 모델을 이용하여 서북극해의 N₂O 발생량을 계산하였다. NBS 해역은 $-1.4 - 14.2 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 대체적으로 양의 플럭스 값으로 평균은 $+2.0 \pm 4.1 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.1.3.6). 이는 대부분의 NBS 해역이 대기로 N₂O를 방출하는 source 역할을 하는 것을 보여준다.
- 반면에 NCS와 NESS의 북부해역은 $-4.8 - 0.4 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 대체적으로 음의 플럭스 값으로 평균은 $-0.7 \pm 1.3 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.1.3.6). 이는 NCS와 NESS의 대부분 해역은 대기에서 해양으로 N₂O를 흡수하는 sink 역할을 하는 것을 보여준다.
- 서북극해 N₂O 플럭스의 조절 인자를 추정하기 위하여 플럭스와 여러 환경 인자들 간의 상관관계를 구하였다 (그림 3.1.3.7). N₂O 플럭스와 SST는 유의미한 관계를 보이지 않았다. 하지만 N₂O 플럭스와 SSS는 0.54의 강한 양의 상관관계를 보였다. 또한 N₂O 플럭스와 풍속은 유의미한 상관관계를 보이지 않았고 표층 N₂O 평균 농도와는 0.74의 굉장히 강한 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 2019년 서북극해 N₂O 플럭스는 용해도와 연관 있는 물리적인 인자 (SSS)와 생지화학적인 과정에 의해 생성된 N₂O 농도에 의해 큰 영향을 받는 것으로 보인다.

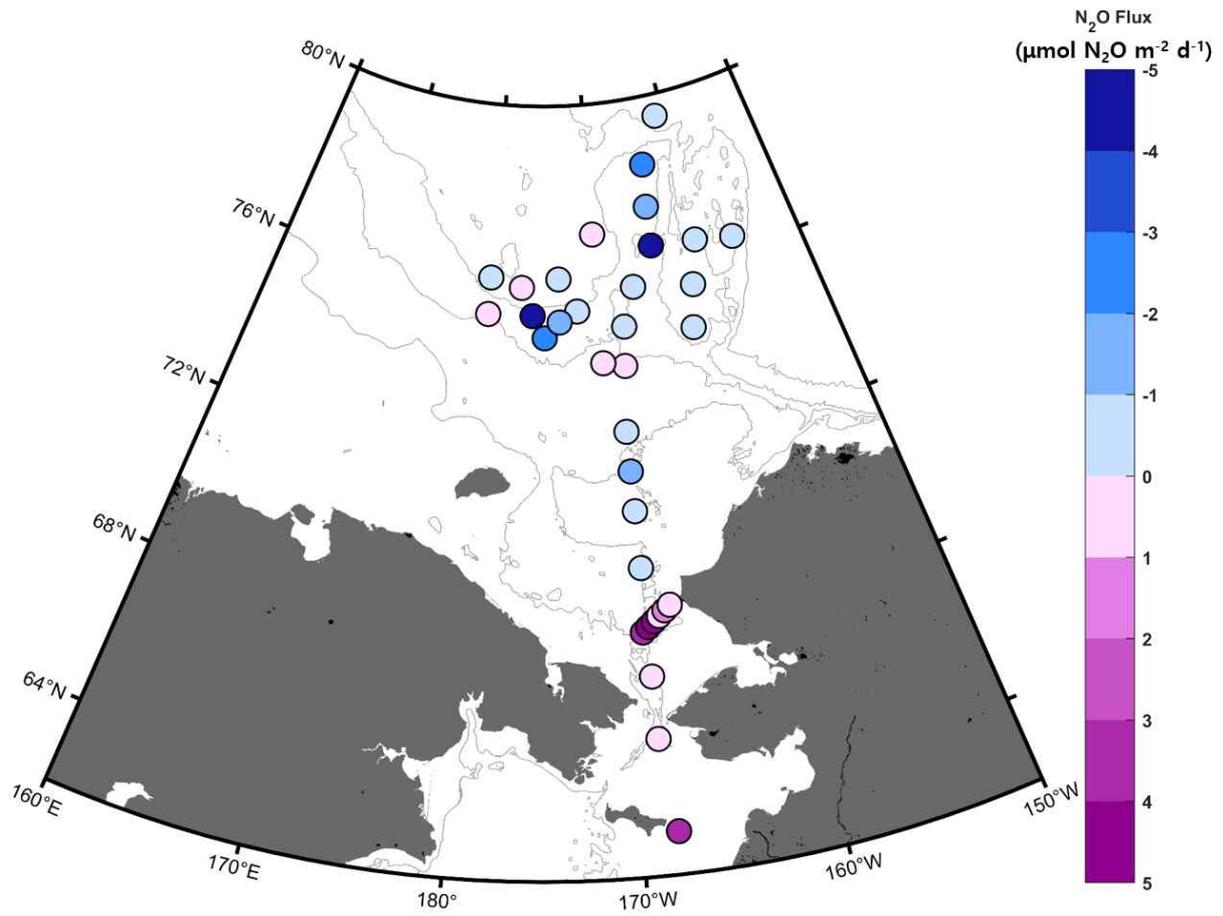


그림 3.1.3.6 2019년 서북극해의 N₂O 플럭스

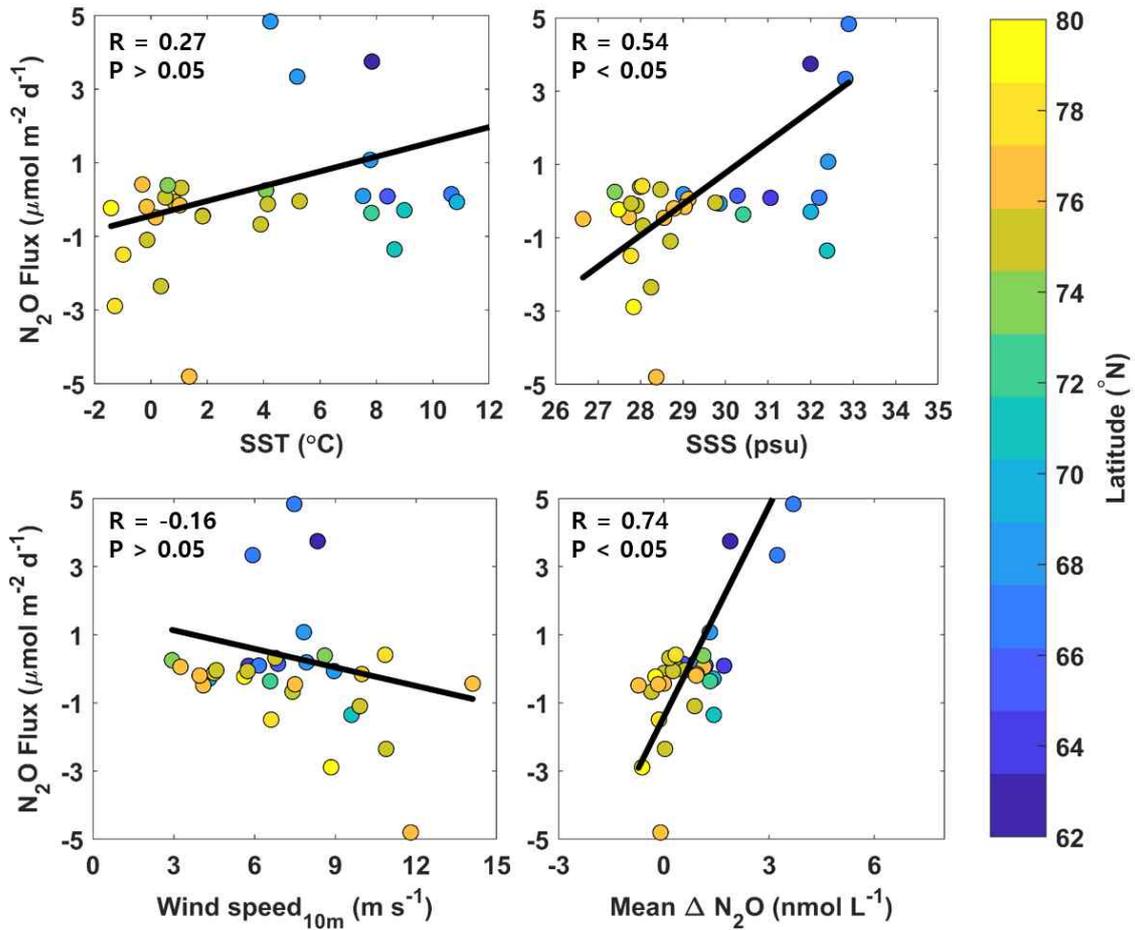


그림 3.1.3.7 2019년 서북극해 N_2O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계; N_2O 플럭스와 Sea Surface Temperature (SST)의 상관관계 (왼쪽 위); N_2O 플럭스와 Sea Surface Salinity (SSS)의 상관관계 (오른쪽 위); N_2O 플럭스와 풍속 (높이 10m)의 상관관계 (왼쪽 아래); N_2O 플럭스와 N_2O 평균 농도 (수심 0-50m)의 상관관계 (오른쪽 아래)

제 2절 서북극해의 N₂O 조사 종합 결과 (2017-2019년)

1. 서북극해 N₂O 농도 분포 및 발생 기작

- NBS 해역의 표층수는 수심이 깊어질수록 N₂O 농도가 함께 증가하는 패턴을 보인다 (그림 3.2.1.1). 그에 반면 NCS와 NESS 해역의 표층수는 대체적으로 ~16.0 nmol/L로 일정한 분포를 보인다. 또한 평균 농도는 NCS와 NESS 해역의 표층이 더 높았지만, 평균 포화도는 NBS 해역의 표층이 더 높게 나타났다.
- 수심 50 - 200m의 중층수에서는 20.0 nmol/L 이상의 연구 해역 중 N₂O 최대 농도가 관측되었으며 가장 높은 평균 N₂O 농도가 관측되었다 (그림 3.2.1.1).
- 심층의 AW (수심 200-1000m)와 ABW (수심 > 1000m)에서는 불포화 상태의 매우 일정한 N₂O 농도가 관측되었으며 AW에서의 N₂O 농도가 ABW에서보다 더 높게 나타났다 (그림 3.2.1.1).
- NBS의 표층수에서는 ΔN_2O 와 DIN은 0.66의 강한 양의 상관관계를 보인다 (그림 3.2.1.2). 또한 ΔN_2O 와 N* 역시 -0.28의 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 연구 기간 동안 NBS 표층수에서 N₂O 생성은 질산화 과정과 탈질산화 과정에 의한 것임을 암시한다. 중층에서의 ΔN_2O 와 AOU, N*는 각각 0.4, -0.41의 상관관계를 보였다. 연구 기간동안 서북극해의 중층에서 생성된 N₂O 역시 질산화 과정과 탈질산화 과정에 의한 것임을 보여준다.

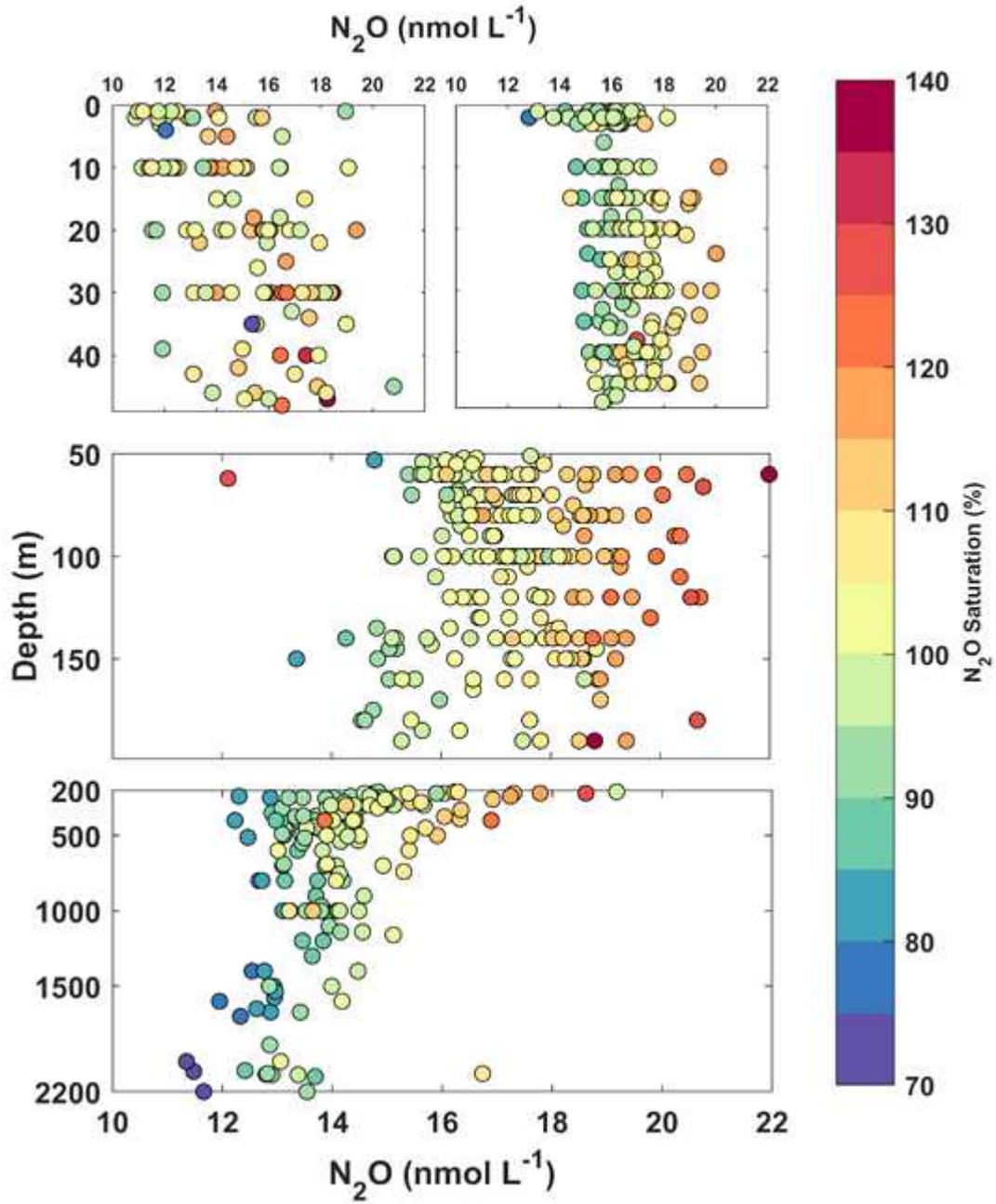


그림 3.2.1.1 2017-2019년 서북극해 N₂O 수직 프로파일; NBS 표층 (왼쪽 위); NCS와 NESS 표층 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층 (가운데); NCS와 NESS 심층 (아래)

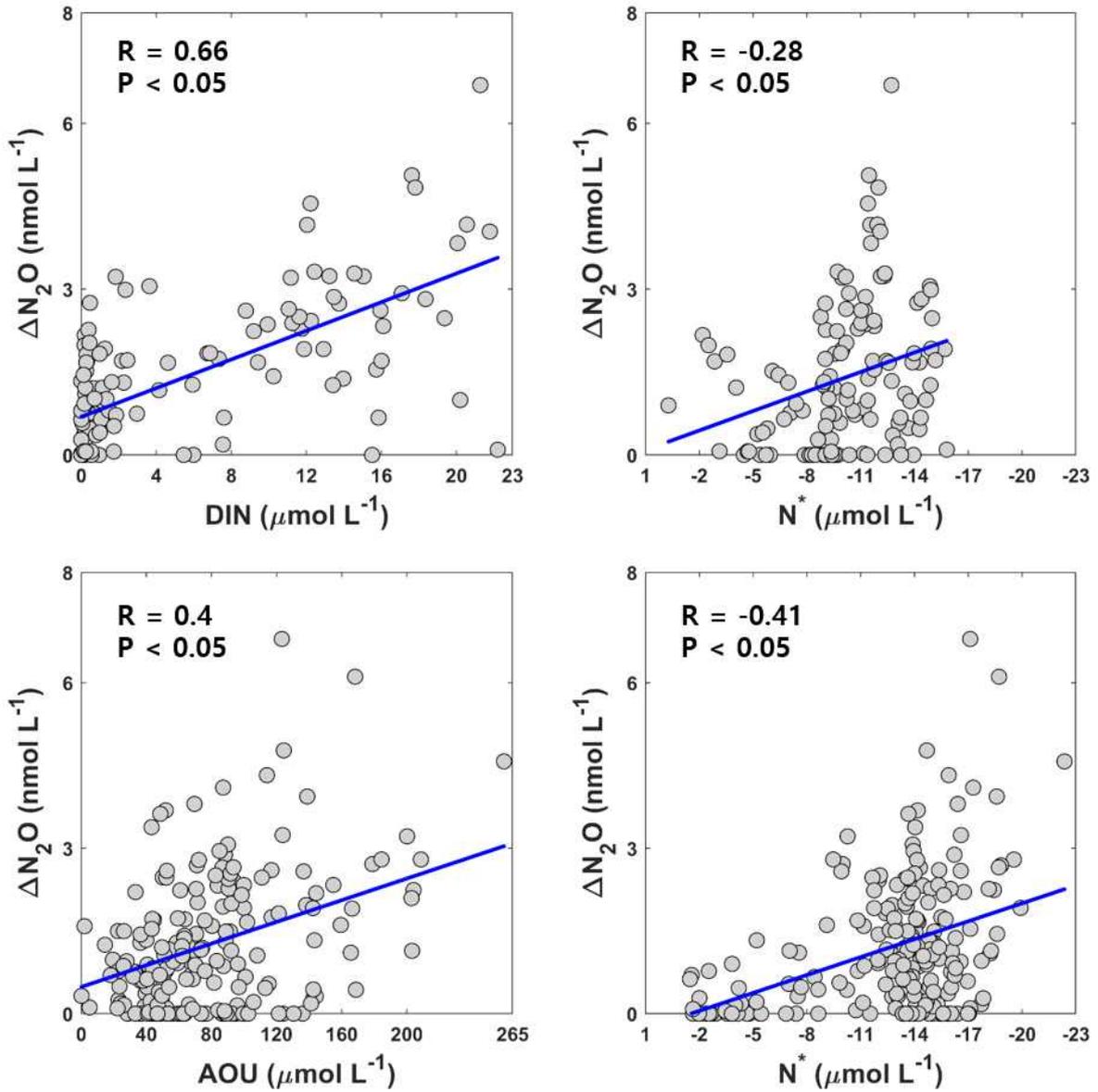


그림 3.2.1.2 2017-2019년 ΔN_2O 와 DIN, N^* , AOU의 상관관계; NBS 표층에서 ΔN_2O 와 DIN의 상관관계 (왼쪽 위); NBS 표층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽 위); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 AOU의 상관관계 (왼쪽 아래); NCS와 NESS 중층에서 ΔN_2O 와 N^* 의 상관관계 (오른쪽 아래)

2. 서북극해 해양-대기 N₂O 플럭스 추정 및 조절 인자

- 2017년부터 2019년까지 연구 해역에서 정점간의 위치는 모두 같지는 않지만, NBS 해역은 여름철 일반적으로 해양에서 대기로 N₂O를 방출하는 source 역할을 하는 것으로 나타났다 (그림 3.1.1.6, 3.1.3.6).
- NBS 해역과는 반대로 NCS와 NESS 해역은 2017년부터 2019년까지 여름철 대기에서 해양으로 N₂O를 흡수하는 sink 역할을 하는 것으로 나타났다 (그림 3.1.1.6, 3.1.2.6, 3.1.3.6).
- 2017년부터 2019년까지 서북극해 N₂O 플럭스의 조절 인자를 추정하기 위하여 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계를 구하였다 (그림 3.2.2.1). N₂O 플럭스와 SST, SSS는 각각 0.48, 0.51의 강한 양의 상관관계를 보였다. 또한 N₂O 플럭스와 풍속은 유의미한 상관관계를 보이지 않았고 표층 N₂O 평균 농도와는 0.62의 강한 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 연구 기간동안 서북극해 N₂O 플럭스는 용해도와 연관 있는 물리적인 인자 (SST, SSS)와 생지화학적인 과정에 의해 생성된 N₂O 농도에 의해 큰 영향을 받는 것으로 보인다.

극지연구소

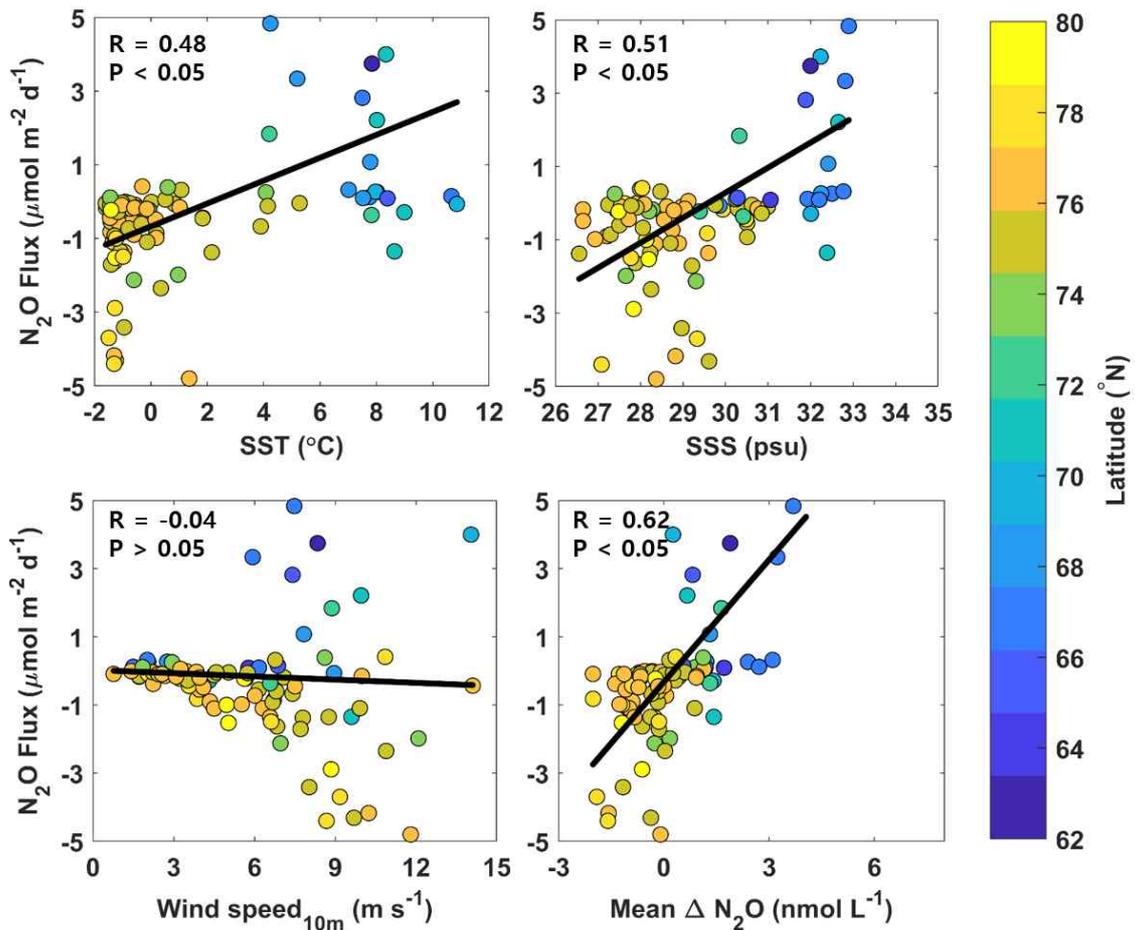


그림 3.2.2.1 2017-2019년 서북극해 N₂O 플럭스와 환경 인자들 간의 상관관계; N₂O 플럭스와 Sea Surface Temperature (SST)의 상관관계 (왼쪽 위); N₂O 플럭스와 Sea Surface Salinity (SSS)의 상관관계 (오른쪽 위); N₂O 플럭스와 풍속 (높이 10m)의 상관관계 (왼쪽 아래); N₂O 플럭스와 N₂O 평균 농도 (수심 0-50m)의 상관관계 (오른쪽 아래)

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 목표 달성도

가. 서북극해의 수층 N₂O 농도 특성 조사

- 서북극해에서 현장시료 분석을 통하여 N₂O 농도를 측정하고 2017년부터 2019년까지 3년간 여름철에 대한 N₂O 자료 및 해양 자료를 축적하였다.
- 서북극해의 N₂O 농도에 대하여 시·공간 분포를 분석하였다.
- 환경요인 분석을 통하여 서북극해의 N₂O 농도에 대한 발생 기작을 파악하였다.

나. 서북극해 해양환경의 해양-대기 N₂O 플럭스 추정

- 서북극해에서 해양-대기 N₂O 플럭스를 계산하고 2017년부터 2019년까지 3년간의 자료를 축적하였다.
- 서북극해에서 해양-대기 N₂O 플럭스의 시·공간 분포를 분석하고 이에 대한 조절요인을 파악하였다.
- 해양-대기 N₂O 플럭스 추정을 통해 서북극해의 NBS 해역은 대기 N₂O에 대하여 source (sea → air) 역할을 하고, NCS와 NESS 해역은 sink (air → sea) 역할을 하는 것을 밝혔다.

다. 서북극해의 환경변화에 따른 연간 용존 N₂O 변동성 파악

- 서북극해에서 용존 N₂O 농도 및 해양-대기 간 플럭스에 대한 3년간의 변동성을 분석하였다.
- 3년간의 종합적인 결과 도출을 통하여 서북극해의 환경과 N₂O의 관계 및 기작을 추정하였다.

2. 기대 효과

가. 기술적 측면

- 본 연구에서 이용된 N_2O 농도 측정 자료를 기반으로 향후 효율적인 N_2O 농도 측정을 위한 표준 방법 개발에 기초자료로 이용될 것으로 기대된다.

나. 기술적 측면

- 온실기체에 따른 지구 온난화 이슈와 관련하여 국민의 새로운 요구 및 수요에 대응 가능한 기초자료를 제공한다.
- 극지방에서의 온실기체로써의 N_2O 농도의 정량분석 자료를 이용하여 경제적인 극지방 보존 방안 수립을 위한 의사결정 단계에서 과학적인 근거자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

다. 사회적 측면

- 본 연구에서 생산된 N_2O 농도 및 해양-대기 플럭스 정량화 자료는 온실기체로써 N_2O 역할에 대한 국제적인 이해도를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

제 5장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구개발 성과의 활용방안

- 수층 N_2O 에 대한 측정 자료가 굉장히 희박한 극지방에서 현장 시료 채취를 통한 N_2O 농도 및 해양-대기 플럭스 자료를 생산함으로써 극지방에서의 N_2O 연구에 기초자료로 활용될 수 있다.
- 본 연구에서 생산된 N_2O 농도 및 플럭스 자료는 향후 기후변화에 따른 서북극해 환경 변화의 지시자로 활용이 가능하고, 기후변화 모델 개발에 필요한 자료의 제공이 가능하다.
- 서북극해의 N_2O 발생량 변화와 지구 온난화와의 인과관계를 규명할 수 있는 기초 자료로 활용이 가능하다.

2. 기대성과

- 서북극해 지역의 N_2O 농도 및 발생량에 대한 기준 자료로서의 역할을 기대할 수 있다.
- N_2O 농도 및 해양-대기 플럭스 자료는 서북극해 해양환경의 현황을 대표할 수 있는 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. ARP (Arctic Research Programme)

NERC (Natural Environment Research Council)에서 수행하고 있는 ARP의 15가지 프로젝트 중 아래 항목들이 본 연구와 긴밀한 연관이 있다.

- Methane and other Greenhouse Gases in the Arctic: Measurements, Process Studies and Modelling (MMAM)
- The Environment of the Arctic: Climate, Ocean and Sea Ice (TEA-COSI)

2. CCHDO (Clivar & Carbon Hydrographic Data Office)

- GO-SHIP, WOCE, CLIVAR 등의 글로벌 해양학 연구를 지원하며, 자료를 관리하는 표준화된 커뮤니티이다.
- 전 세계 해양 연구 프로그램에서 생산된 CTD 자료 및 생지화학 자료에 대한 열람이 가능하다.

3. MEMENTO (MarinE MethanE and NiTrous Oxide)

- 해양에서의 N_2O 와 CH_4 의 부족한 측정 자료들을 보완하고, 더 정확한 생지화학적 모델을 구축하기 위하여 설립된 글로벌 데이터베이스이다.
- 데이터베이스에 등록된 자료 현황 및 제공은 사이트를 통해서 열람이 가능하다.

4. HIPPO (HIAPER Pole-to-Pole Observations)

- HIPPO는 2009년부터 다년간 전 지구적인 탄소순환과 온실기체 분포를 모니터링하기 위해 남극점부터 북극점까지의 대기 미량가스 농도를 항공관측(고도 0~15km)으로 모니터링하고 있다.

제 7장 참고문헌

- 1) Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., van Ypserle, J. P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ipcc.
- 2) Jain, A. K., Briegleb, B. P., Minschwaner, K., Wuebbles, D. J. (2000). Radiative forcings and global warming potentials of 39 greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D16), 20773-20790.
- 3) Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustine, D., Haywood, J., Myhre, G., Solomon, S. (2001). Radiative forcing of climate. *Climate change*, 349.
- 4) Crutzen, P. J. (1970). The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(408), 320-325.
- 5) Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual review of marine science*, 1, 169-192.
- 6) Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque, J. F., Van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change*, 109(1), 213-241.
- 7) Takahashi, T., Sutherland, S. C., Chipman, D. W., Goddard, J. G., Ho, C., Newberger, T., Munro, D. R. (2014). Climatological distributions of pH, pCO₂, total CO₂, alkalinity, and CaCO₃ saturation in the global surface ocean, and temporal changes at selected locations. *Marine Chemistry*, 164, 95-125.
- 8) Caldeira, K., Wickett, M. E. (2005). Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C9).

- 9) Machida, T., Nakazawa, T., Fujii, Y., Aoki, S., Watanabe, O. (1995). Increase in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 250 years. *Geophysical research letters*, 22(21), 2921–2924.
- 10) Yang, S., Chang, B. X., Warner, M. J., Weber, T. S., Bourbonnais, A. M., Santoro, A. E., Bianchi, D. (2020). Global reconstruction reduces the uncertainty of oceanic nitrous oxide emissions and reveals a vigorous seasonal cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(22), 11954–11960.
- 11) Capone, D. G., Bronk, D. A., Mulholland, M. R., Carpenter, E. J. (Eds.). (2008). *Nitrogen in the marine environment*. Elsevier.
- 12) Sarmiento, J. L., & Gruber, N. (2006). *Ocean biogeochemical dynamics*. Princeton University Press.
- 13) Kitidis, V., Upstill-Goddard, R. C., Anderson, L. G. (2010). Methane and nitrous oxide in surface water along the North-West Passage, Arctic Ocean. *Marine Chemistry*, 121(1–4), 80–86.
- 14) Verdugo, J., Damm, E., Snoeijs, P., Díez, B., Farías, L. (2016). Climate relevant trace gases (N_2O and CH_4) in the Eurasian Basin (Arctic Ocean). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 117, 84–94.
- 15) Zhang, J., Zhan, L., Chen, L., Li, Y., Chen, J. (2015). Coexistence of nitrous oxide undersaturation and oversaturation in the surface and subsurface of the western Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 8392–8401.