쿠로시오 확장역 물질순환의 변동 특성 연구

A study on the variation of material cycles in the Kuroshio Extension



BSPE99601-11968-1

쿠로시오 확장역 물질순환의 변동 특성 연구

A study on the variation of material cycles in the Kuroshio Extension

2018. 12.



쿠로시오 확장역 물질순환의 변동 특성 연구

A study on the variation of material cycles in the Kuroshio Extension

2018, 12,



제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 "쿠로시오 확장역 물질순환의 변동 특성 연구"과제의 연차 보고서로 제출합니다.

2019년 2월 28일

총괄연구책임자 : 박 영 규

참 여 연 구 원 : 김돈기 김동국 김연경 김원년 김은영

김은진 김인혜 김재우 김재훈 김지훈 김창준 김충호 김한준 김형직 나한나 노재훈 노주철 도세은 문성훈 문혜진 민홍식 박나연 박동민 백영숙 변은진 서성봉 서옥희 서인아 신지영 안성민 안신혜 양원석 양은찬 원종석 유장연 유찬민 이상훈 이소정 이수환 이연정 이지영 이하은 이호원 이효종 전다은 전청균 전형구 정준모 정창수 정탄금 정홍석 조성태 주형태 최기영 최동한

보고서 초록

		1			1
과제고유 번호	PE99601	해당단계 연구기간	2017.1.1. ~ 2018.12.31	단계 구분	
어구지어머	중사업명		한국해양과학	가기술원 주요	-사업
연구사업명	세부사업명		기관	고유사업	
어 그리 케머	대과제명	(미래바디	·보기)해양연구를	· 통한 기후팀	변화 예측 및 대응
연구과제명	세부과제명	쿠로시오 확장역	물질순환의 변동	등 특성 연구	
연구책임자	HL0d □	해당단계 참여연구원수	총 : 50 명 내부: 22 명 외부: 28 명	해당단계 연구비	정부: 755,000 천원 기업: 천원 계 : 755,000 천원
연구색임자	박영규	총연구기간 참여연구원수	총 : 61 명 내부: 23 명 외부: 38 명	총 연구비	정부: 1,817,000 천원 기업: 천원 계 : 1,817,000 천원
연구기관명 및 소속부서명		양과학기술원 ·기후연구센터	참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
		요약		보고서 면수	136p

- 한반도 근해의 해양환경에 직접적 영향을 주는 북태평양의 쿠로시오-오야시오 확장역은 지구온 난화에 대한 민감하게 반응함.
- 다양한 시공간 규모로 변동하는 쿠로시로확장역을 연구하기 위해서 계류시스템을 설치하여 자료를 얻고 관측의 시공간 제약을 극복하기 위하여 고도계 수치모형 결과 등을 분석함.
- 하위생태계 구조·생산성 및 생지화학 물질(C, N) 순환 특성을 규명함.
- 용존 영양염, 부유물질, 입자성유기탄소 등 생태계 구조와 변동성 파악을 위한 생지화학적 기초 자료를 획득 자료를 획득함.
- 침강입자와 탄소, 질소의 순환 특성과 변동성을 연구 조사함
- 탄성파 해양학(Seismic Oceanography)을 이용하면 광역에서 고해상도로 수층구조를 측정함.
- 장기적 기후변화의 결과로서 발생할 쿠로시오확장역의 변화양상을 보다 명확히 예측하기 위해 지질학적 과거에 일어난 대규모 기후변화에 따른 반응을 이해하기 위하여 심해 퇴적물 코어를 획득하고 분석함.

색인어 (각 5개 이상)	한 글	기후변화, 생태계변화, 쿠로시오확장역, 탄소순환, 고기후, 탄성파해양학
	영 어	climate change, ecosystem change, Kuroshio Extension, carbon cycle, paleoclimate, seismic oceanography

요 약 문

I. 제 목

쿠로시오 확장역 물질순환의 변동 특성 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

- O 쿠로시오 확장역의 순환계 변동성 규명
 - 에디에서 수십년 주기 규모의 순환 변동성
 - 퇴적물 코어를 이용한 빙하기 간빙기규모 변동성
 - 쿠로시오 확장역 수층 구조 영상화 및 수괴 분포·혼합 특성
- O 하위생태계 구조·생산성 및 생지화학 물질(C, N) 순환 특성 규명
 - 물리화학적 변화에 의한 하위생태계의 구조와 생산성의 변동 특성 규명
 - 침강입자와 탄소, 질소의 순환 특성과 변동성

2. 연구개발의 필요성

- O 한반도 근해의 해양환경에 직접적 영향을 주는 북태평양의 쿠로시오-오야시오 확장역은 지구온난화에 대한 민감하게 반응함.
- 기후변화를 이해하고 대응하기 위해서는 이 해역이 어떻게 변화하는지 이해하고 예측할 수 있어야 함
- O 다양한 시공간 규모로 변동하는 쿠로시로확장역을 연구하기 위해서는 계류시스템에서 얻은 자료와 고도계 수치모형 결과 등을 분석하여야 함.
- 쿠로시오 확장역에서 용존 영양염, 부유물질, 입자성유기탄소 등 생지화학적 기초 자료 를 획득해야 변동성을 파악할 수 있음.
- O 계류시스템을 이용하여 침강입자 자료 획득하여 침강입자 플럭스 및 침강입자 내 유기 탄소 플럭스 변동 자료 등을 얻어야 변동의 조절인자를 파악할 수 있음.
- 쿠로시오 확장역에서 용존 영양염, 부유물질, 입자성유기탄소 등 생지화학적 자료를 획득하고 변동경향을 파악하여, 생태계 구조와 변동성 파악을 위한 기초자료를 획득하고,

계류시스템을 이용한 침강입자 자료 획득과 침강입자 플럭스 및 침강입자 내 유기탄소 플럭스 변동 자료 등을 획득하여야 조절인자를 파악할 수 있음.

- O 장기적 기후변화의 결과로서 발생할 쿠로시오확장역의 변화양상을 보다 명확히 예측하 기 위해 지질학적 과거에 일어난 대규모 기후변화에 따른 반응을 이해할 필요가 있음
- O 수층의 구조를 파악하고 해수의 물성 자료를 획득하는 것은 해양의 특징을 파악하는데 중요한 역할을 함. 탄성파 해양학 (Seismic Oceanography)을 이용하면 광역에서 수층구조 와 혼합특성을 파악할 수 있음.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- O 계류 시스템 설치, 유지와 관측자료 획득
 - sediment trap (침강입자 포집기) 2대, 해류계 3대 이상으로 구성된 계류선 설치
 - PIES 2대~4대를 샤츠키 해저고원 서쪽에 설치하여 자료 획득
 - 고도계, 모델 자료 등을 활용하여 대상 해역의 변동 특성 연구
- O 하위 생태계 구조 및 C-export 조사와 정량화
 - 생지화학 자료 획득과 분석
 - 하위 생태계 군집 구조 및 기능적 특성
 - 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 탄소플럭스 변동 연구
- O 수층구조와 해양 혼합 특성 조사
 - 미세난류구조과 혼합계수 추산
 - 탄성파 자료 취득과 처리를 통한 수층구조 가시화
- O Giant 피스톤 코어 퇴적물 시료 획득 및 고해양환경 프록시 분석
 - 샤츠키 해저고원 정상부에서 자이언트피스톤코아 시료 2개 획득
 - 퇴적물 내 존재하는 고기후 지시자의 분석 및 변화기작 연구
 - 빙하기-간빙기 기후변화에 따른 과거 쿠로시오확장역의 위치변화 복원

Ⅳ. 연구개발결과

- O 쿠로시오 확장역의 변동성
 - 인공위성, 수치모델 자료 등을 활용한 변동 특성 연구
 - Shatsky Rise 주변에서 서쪽보다 수온과 염분의 남북 차이가 작고, 쿠로시오 제트의 세기도 약하게 나타남.
 - Shatsky Rise를 비롯한 지형의 영향으로 쿠로시오 제트가 남북으로 갈라짐.
 - 쿠로시오 확장역 해양 상층부 열용량은 이러한 쿠로시오 제트의 변동과 Subarctic Frontal Zone의 변동에 영향을 받음.

- 계류 및 PIES 관측 결과
 - 계류정점에서 해류의 세기는 쿠로시오 확장역 경로의 위치에 따라 변함.
 - 쿠로시오 확장역 계류 관측에서는 전층에 걸쳐 반일주기 조석(약 12시간), 준관성(약 21시간)의 단주기 변동과 중규모에디 등 활동에 의한 3~10일의 중주기 변동이 나타남.
 - PIES 관측을 통해 얻은 음파전달속도를 이용하여 계류시기 동안에 전체 수층의 물 성구조 파악.
- O 하위 생태계 구조 및 C-export 조사와 정량화
 - 생지화학 자료 획득과 분석
 - 2017년에 암모니아는 38°N 부근의 수심 65 m에서 0.140 μM의 농도를 보였으며, 다른 정점의 모든 수심에서는 ND를 나타냈고, 유광대 (수심 200 m 이내)에서 영양염의 분포는 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염 모두 고갈되어 있었으며, 규산염은 2 μM이하의 농도값을 나타냄.
 - 2018년에 44°N 부근의 정점에서 상대적으로 저온의 표층에 질소계 영영염(암모니아, 아질산염, 질산염)이 수심 50 m까지 존재하고 있으며, 인산염은 1.2 μ M이하의 농도 값을 나타내고 있고, 규산염은 수심 15 m까지 3 μ M이하의 농도값을 보였음.
 - 2018년에 42°N부터 저위도로 갈수록 표층에서 수심 70 m까지 암모니아, 아질산염, 질 산염, 인산염 모두 고갈되어 있었으며, 규산염은 3 μM이하의 농도값을 나타냄.
 - 하위 생태계 군집 구조 및 기능적 특성
 - 쿠로시오 해역에 집중된 2017년과 달리, 고위도의 오야시오 해역이 포함된 2018년에 보다 시·공간적으로 큰 하위생태계의 변화를 보임.
 - 하위생태계를 구성하는 생물 군집 (동/식물플랑크톤, 박테리아 군집)의 생물량 및 생산력은 고위도에서 저위도로 갈수록 구성 생물 크기 및 생체량, 생산력이 모두 감소하는 경향을 보였으나, 유광층 하부로부터 심층수의 유입이 발생한 전선역 정점에서는 주변해역보다 상대적으로 높은 생산력 및 생체량을 나타냄.
 - 연구해역에서 식물플랑크톤 일차생산력은 광합성 효율의 차이보다, 생체량에 따라 결정되는 것으로 보이며, 저위도에서 박테리아 생산력이 높음에 따라 빈영양 수괴에서 미생물 먹이망의 중요성을 확인함.
 - 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 탄소플럭스 변동 연구
 - 북서태평양 쿠로시오 확장역에서 2017년 11월부터 2018년 8월까지 시계열 퇴적물 트랩을 수심 약 800 m와 4,000 m에 설치하여 침강입자를 획득하였음.
 - 수심 800 m에서 획득한 총질량 플럭스는 0.5-248 mg m⁻²day⁻¹(평균 88 mg m⁻²day⁻¹)의 범위에서 변하였음.
 - 수심 4,000 m에서 관측된 총질량 플럭스는 0.02-125 mg m⁻²day⁻¹(평균 44 mg m⁻²day⁻¹) 의 범위에서 변하였음.



O 수층구조와 해양 혼합

- 정량적인 연직 혼합을 파악하기 위해 2017년과 2018년에 직간접적인 해양혼합관측 실시.
- 미세구조 직접관측을 통해서 해당 연구해역에서 난류소산률은 상층에서 10^{-7} kg/m³ 이상 의 비교적 강한 소산율이 나타나며, 수심 $80\sim120$ m까지 지속적으로 감소하다가 보다 깊은 층에서는 $10^{-10}\sim10^{-9}$ kg/m³ 의 일정한 소산율을 갖음.
- 간접적으로 소산률을 계산방법으로 Thorpe scale 방법과 GM model을 사용함.
- 미연직확산계수를 계산에 있어서 Shih 방법이 Osborn 방법보다 크기 및 경향성이 더 좋음.
- 탐사지역 환경이 수층 반사파 취득이 미치는 영향을 분석함.
- 약 132 km의 측선을 따라 탄성파 탐사를 수행하여 수층 반사파 자료를 취득하였고 측선을 따라 일정 간격마다 해양 물리 관측 장비를 통해 해수의 물성 값을 직접 취득함.
- 취득한 수층 반사파 자료에 탄성파 자료 처리 기법들을 적용하여 최종 수층 단면을 도출하였고 해양 물리 관측 장비로 취득한 자료와 비교함.
- 탄성파 단면을 통해 혼합층-수온 약층의 경계가 탐사 시작 위치인 36° 4'N, 158° 22'E에 서는 약 100 m 깊이에 형성 되었으나 남쪽으로 내려갈수록 깊이야 얕아져 탐사 종료 위치인 34° 52'N, 158° 8'E에서는 약 60~70 m 사이에 위치하는 것을 확인함.
- O 과거 장주기 기후변화에 따른 쿠로시오확장역 변동성
 - 샤츠키 해저고원의 중앙 고원과 북쪽 고원 정상부에서 총 25 m 이상의 자이언트피스톤 코아 시료 획득, 32°N~38°N에 이르는 쿠로시오확장역의 변동범위 내 위도별 시료 확보 함.
 - 현재 쿠로시오확장역의 남쪽 경계, 중심축, 북쪽 경계에서 획득한 시료간 퇴적상이 서로 다름을 확인, 과거 쿠로시오확장역의 위치를 추적할 근거 마련함.
 - 부유성 유공충의 산소동위원소조성과 군집조성 변화로 빙하기, 소빙기 등 한랭기에 쿠로시오확장역의 남쪽 경계부의 남하가 확인됨.
 - 빙하기와 간빙기 동안 대륙기원입자의 기원지 변화가 관찰되며, 빙하기에 현재보다 편 서풍이 남하하였음을 지시함.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- 기후변화 ~ 쿠로시오 확장역 변동성 ~ 생태계 특성 사이의 상관성 연구를 통해 기후변 화 시나리오에 다른 북서태평양 생태계 변동을 예측하기 위한 과학적 근거로 활용.
- 기후변화와 북태평양 아열대 순환류 변동에 따른 해양 탄소 플럭스 변동성 규명에 활용.
- O 과거 기후조건의 환경변수를 이용한 기후 모의 자료 제공 및 적도-한반도 해역 및 아열 대 ~ 아한대 기후상관성 규명에 활용.
- O 해수수층 구조, 특성 및 공간 분포 등을 쉽게 인지할 수 있는 2-D 및 3-D 영상화 기술 및 기법 개발에 활용.



- O 다양한 환경요인의 변화에 따른 생태계 반응 특성 및 민감도 분석을 통해 전지구적인 생태계 변화를 이해하고 예측에 활용.
- O 기후변화/환경변화에 따른 지속적인 이용 및 관리를 위한 대응방안 수립에 활용.

0.

SUMMARY

I. Title

A study on the variation of material cycles in the Kuroshio Extension

II. Necessity and Objectives of the Study

1. Objectives of the study

- O Investigation on the variability of the Kuroshio Extension
 - Variability of ocean circulation on eddy to multi-decadal scales.
 - Glacial-interglacial variability using deep sediment core
 - Visualization of water column structure and investigation on water mass property and ocean mixing
- O Investigation on the ecosystem structure, productivity, and biochemical (C, N) cycle
 - Variability of ecosystem structure and productivity due to physical and chemical changes
 - Structure and variability of sinking particles and carbon/nitrogen cycle

2. Necessities of the study

- O The Kuroshio-Oyashio Extension that directly affects the marine environment off the Korean Peninsula is sensitive to the global warming.
- O To understand and respond to climate change, it is necessary to understand and predict how this area will change.
- O In order to study the diverse spatio-temporal scale variability of the Kuroshio extension, it is necessary to analyze the data obtained from the mooring system and the results of numerical modeling, altimeter data.
- O Aquisition and analyses the fluctuation trends of the biochemical data such as dissolved nutrients, suspended materials, and particulate organic carbon at Kuroshio Extension. In addition, adjustment factors of controlled these trends could be identified by collecting the sinking particles and its organic carbon fluxes from mooring system.

- O To quantify the variability we need to collect biogeochemical data such as dissolved nutrients, suspended solids, and particulate organic carbon through field experiments.
- O It is necessary to acquire settling particle data by using the mooring system and to obtain data on fluctuation of sediment particle and organic carbon flux in settled particle.
- O In order to predict the evolution of the Kuroshio extension that will occur as a result of long-term climate change, it is necessary to understand the response to large-scale climate change in the geological past.
- O Identifying the structure of the water layer and obtaining the properties of the sea water is important in analyzing the characteristics of the ocean. By using Seismic Oceanography, it became possible to obtain the oceanographic features at the wide area of the ocean.

III. General Scope of the Study

- O Deployment of a mooring system and data aquisition
 - A mooring line with two sediment traps and three or more current meters
 - Deploy two to four PIES' to the west of the Shatskiy Rise
 - Variability from altimeters and ocean model outputs
- O Survey and quantification of Ecosystem structure and C-export
 - Aquisition and analysis of biogeochemical data
 - Ecosystem structure and functional properties
 - Temporal variation of particle flux using time-series sediment traps
- O Water column structure and ocean mixing
 - Microstructure measurement and investigation on vertical mixing
 - Imaging water column structure using seismic data and processing
- O Analyses of paleoclimate proxies of the giant piston core sediments
 - Acquisition of giant piston cores at the summit of Shatsky Rise
 - Examining the atmospheric and oceanographic conditions in the geological past at the Kuroshio Extension region based on paleoclimate proxies
 - Reconstruction of the migration of Kuroshio Extension on glacial-interglacial time scale

IV. Results of the Study

- O Variability of Kuroshio Extension
 - Variability from altimeters and numerical model outputs

- 0,
- Near the Shatsky Rise meridional gradients of temperature and salinity weaker that those to the upstream resulting in weaker Kuroshio jets.
- The jet show meridionally bifurcated structure possibly affected by the bathymetry.
- Upper-ocean heat content variability over the Kuroshio Extension are induced by changes in the Kuroshio Extension jet and Subarctic Frontal Zone.
- Results of a tall current mooring and PIES
 - Currents speed at the mooring site depend on the location of Kuroshio Extension jet.
 - Variability of current at the mooring site includes semidiumal tide (about 12 hours), inertial wave (about 21 hour), and meso-scale eddy(about 3~10 days).
 - Measured time series of temperature and salinity for the full depth in the mooring site using an acoustic travel time form the PIES.
- O Survey and quantification of ecosystem structure and C-export
 - Aquisition and analysis of biogeochemical data including nutrients
 - In 2017, the ammonium concentration was 0.140 μ M in the depth of 65 m at 38°N and the concentrations of ammonium, nitrite, nitrate and phosphate in the euphotic zone (upper 200 m of the water column) were depleted, and those of silicate was below 2 μ M at all other stations.
 - In 2018, ammonium, nitrite, nitrate exist between 0 to 50 m depth and the concentrations of phosphate and silicate were below 1.2 μ M and 3 μ M respectively, at Oyashio Current region (44°N).
 - From 42°N to 32°N, the concentrations of ammonium, nitrite, nitrate and phosphate in the upper 30~70 m of the water column were depleted, and those of silicate was below 3 μ M at all other stations.
 - Ecosystem structure and functional properties
 - The cruise in 2018 showed a greater spatio-temporal change in the lower trophic level compared to 2017 mainly due to expansion of study area to Oyashio Current region (44°N).
 - Biomass of prokaryotes, phytoplankton and zooplankton showed a decreasing trend in lower latitude. with an exception of higher biomass and productivity at the stations with upwelling In the eutrophic region of the Oyashio Current.
 - Primary productivity was also high in the Oyashio Current region and low in the Kuroshio waters, and that the primary production depend on the biomass of the phytoplankton.
 - The ratio of bacterial production to primary productivity tended to largely increase in lower latitude, showing that energy flow via microbial loop is important in the oligotrophic subtropical area.

- Temporal variation of particle flux using time-series sediment traps
 - Time series sediment traps were operated at water depth of 800 m (upper trap) and 4,000 m (lower trap) in the Kuroshio extension from November 2017 to August 2018.
 - In the upper trap, total particle fluxes ranged 0.5 to 248 mg m⁻²day⁻¹ with an average of 88 mg m⁻²day⁻¹.
 - In the lower trap, total particle fluxes varied between 0.02 and 125 mg m⁻²day⁻¹ with an average of 44 mg m⁻²day⁻¹.

O Water column structure and ocean mixing

- Operated the direct/indirect observations to figure out the quantity of vertical mixing.
- Calculated dissipation rate from the directly measuring the micro structure has 10^{-7} kg/m³ in the upper layer, keep decreasing at $80\sim120$ m and stable at the deeper layer about $10^{-10}\sim10^{-9}$ kg/m³.
- Using Thorpe scale and GM model for the indirect method to calculate dissipation rate.
- Shih method has better quantity and trend than Osborn method at calculate vertical diffusion.
- Analyzed the influences of the surrounding environments of the exploration area on the water column reflection data acquisition.
- Performed the seismic exploration along a line approximately 132 km long at the Kuroshio extension to obtain the water column reflection data, and obtained the oceanographic data directly from the oceanographic instruments along the line.
- Applied the seismic data processing techniques to the acquired seismic data to derive the final water-layer section and compared with the data obtained from the oceanographic instruments.
- Identified that the boundary of the mixed layer-thermocline in the seismic section was formed at about 100 m depth at 36° 4'N, 158° 22'E, but the depth of the boundary became shallower and formed between 60 and 70 m at 34° 52'N, 158° 8'E.
- O Variation of Kuroshio Extension in response to glacial-interglacial climatic cycles
 - By obtaining three piston cores at the summits of Shatsky Rise, a meridional transect of sedimentary archives across the main pathway of Kuroshio Extension has been made.
 - Each core has its unique sedimentary features including color, facies association, sedimentation rate, etc; allowing the identification of the KE main pathway from its meandering range.
 - During the glacial and stadial periods, the more southerly positioning of meandering KE than the present was recognized in the oxygen isotope compositions and faunal assemblages of planktic foraminifera.
 - Provenance of the terrigenous component in the Shatsky Rise sediment has also been varied in response to the glacial-interglacial cycles, possibly resulted from the changes in transport pathway by westerly jet.

0,

- The changes in terrigenous provenance and paleoceanograpic indicators indicate the southward migration of westerly winds and Kuroshio Extension during the glacial periods.

V. Suggestions for Applications

- O Utilize the results from studies on the corelation among climate change, the variability of the Kuroshio Extension and ecosystem as a scientific basis for predicting changes in other northwest Pacific ecosystems under climate change scenarios
- O Apply to the investigation of variability of the ocean carbon flux due to climate change and variability of the North Pacific Subtropical Gyre.
- O Provide data for paleoclimate modeling and systematic understanding on the connectivity between the equatorial ocean and waters around Korea, and subtropical and subpolar climates.
- O Develop the 2-D and 3-D imaging technologies to recognize the water-layer structures, characteristics, and spatial distribution.
- Applicable to understand and predict ecological responses of global ecosystems to changes of marine environments such as climate change.
- O Applicable to establish effective adaptation plan for sustainable development and management of the marine ecosystem under climate and environmental changes.

목 차 •

요약문	i
요약문 ······ 목차 ·····	xi
표목차	xiii
그림목차	
제1장 서 론	1
제1절 연구개발의 필요성	
제2절 연구개발의 목표와 내용	
제2장 국내외 기술 개발 현황	9
제1절 국내 현황	11
제2절 국외 형황	
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제1절 연구해역 탐사	17
제2절 쿠로시오 확장역 물리 특성 관측과 분석	
제3절 하위 생태계 구조 및 C-export 조사와 정량화	
제4절 수층구조와 해양 혼합 특성	
제5절 과거 장주기 기후변화에 따른 쿠로시오확장역 변동성	
제4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	117
제1절 목표달성도	119
제2절 대외 기여도	
제5장 연구개발 결과의 활용계획	125
제6장 참고문헌	129

CONTENTS • _

Summary ····································
Contents xii
List of Figures xiv
List of Tables ·······xxi
Chapter 1 Out line of the study1
Section 1 Necessity of the study
Section 2 Objectives and contents of the study 6
Chapter 2 Technical development in Korea and foreign countries 9
Section 1 Trends of study in Korea
Section 2 Trends of study in foreign countries
Chapter 3 Results of the study 15
Section 1 Field Survey
Section 2 Observation and analysis of physical oceanographical properties
Section 3 Survey and quantification of low level ecosystem structure and C-export 60
Section 4 Water column structure and ocean mixing
Section 5 Variation of Kuroshio Extension in response to glacial-interglacial climatic
cycles
Chapter 4 Achievements of objectives and contributions 117
Section 1 Achievements of objectives
Section 2 Contributions to the related area
Chapter 5 Application plans of the results of the study 125
Chapter 6 References 129

표목차 •_

Ŧ	1-2-1. 연	구목표	6
Ŧ	1-2-2. 연	차별 선과목표 및 연구내용	7
Ŧ	3-1-1-1.	연도별 정점 위치 정보 1	8
Ŧ	3-1-1-2.	연도별 탐사 내용 1	8
Ŧ	3-1-1-3.	2017년 탐사 일정 1	9
Ŧ	3-1-1-4.	2018년 탐사 일정 2	20
Ŧ	3-1-2-1.	계류 시스템 관측 정점 및 정보 2	2
Ŧ	3-1-2-2.	계류 회수 작업 일정 및 항목 2	25
Ŧ	3-1-2-3.	2017년 PIES 설치 및 기기 정보 ······ 2	28
Ŧ	3-1-2-4.	2018년 PIES 설치 및 기기 정보 ······ 2	29
Ŧ	3-2-4-1.	Argo 플로트의 주요 사항과 관측 설정	7
Ŧ	3-2-4-2.	Argo 플로트 실시간 관측 자료 검증과 처리 방법4	8
Ŧ	3-2-4-3.	Ocean Current Drifter 투하 정보 5	2
Ŧ	3-3-3-1.	쿠로시오 확장역 계류선에서 퇴적물 채집 정보 8	37
#	3-5-1-1.	2017-2018년 탐사에서 획득한 퇴적물 시료 목록 10	8(

표목차 •_

Table	1-2-1. Pu	urpose of research
Table	1-2-2. Ye	early research purpose and contents
Table	3-1-1-1.	Information of the stations
Table	3-1-1-2.	Works list at the cruise
Table	3-1-1-3.	Cruise schedule at 2017
Table	3-1-1-4.	Cruise schedule at 2018
Table	3-1-2-1.	Information of the mooring system
Table	3-1-2-2.	Schedule and list of the mooring recovering
Table	3-1-2-3.	Information of the moored PIES at 2017
Table	3-1-2-4.	Information of the moored PIES at 2018
Table	3-2-4-1.	Infomation and setting of Argo floats
Table	3-2-4-2.	Steps of Argo data processing48
Table	3-2-4-3.	Information of Ocean Current Drifter deployment
Table	3-3-3-1.	Sampling schedule for sediment traps mooring used in Kuroshio cruise \cdots 87
Table	3-5-1-1.	List of sediment samples during the cruise

그림	1-2-1. 연	구내용 요약	. 6
그림	1-2-2. 추	진계획	. 8
그림	3-1-1-1.	연도별 탐사 경로 및 정점	17
그림	3-1-2-1.	쿠로시오 확장역 계류 시스템 모식도	23
그림	3-1-2-2.	계류 설치와 회수 시 선박의 이동과 위치(2017년 설치, 2018년 회수 및 재설치) …	25
그림	3-1-2-3.	Pressure Inverted Echo Sounder 관측 정점	27
그림	3-2-1-1.	연도별 탐사 경로의 수온 분포 및 정점	30
그림	3-2-1-2.	연도별 탐사 경로의 염분 분포 및 정점	31
그림	3-2-1-3.	연도별 탐사경로의 상층 유속분포 및 정점	32
그림	3-2-1-4.	연도별 탐사경로의 수직유속분포	32
그림	3-2-2-1.	75 kHz ADCP에서 관측한 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)의 상층 유속 분석 …	34
그림	3-2-2-2.	단층 유속계에서 관측한 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)의 900m, 2,000m,	
		44,000m의 일평균 유속의 벡터 분포	35
그림	3-2-2-3.	300 kHz ADCP에서 관측한 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)의 바닥 근처의	
		유속 분석	35
그림	3-2-2-4.	계류 정점에서 30분 간격으로 관측한 수층별 Progressive vector diagrams 분포 \cdots	36
그림	3-2-2-5.	계류 정점(33.72°N, 156.62°E)에서 관측한 수층별 Power spectrum 분포.	
		동서성분(왼쪽)과 남북성분(오른쪽)	36
그림	3-2-2-6.	PIES 자료처리 모식도 (Kennelly et al., 2007) ·····	37
그림	3-2-2-7.	EN4 프로파일러의 시공간적 분포	38
그림	3-2-2-8.	수온 물성분포표(Temperature GEM) 및 오차값. 초록, 빨강색 선은 각각	
		C09, C07에서 측정된 $ au$ 의 범위	39
그림	3-2-2-9.	염분 물성분포표(Salinity GEM) 및 오차값. 초록, 빨강색 선은 각각 CO9,	
		C07에서 측정된 $ au$ 의 범위	39
그림	3-2-2-10). PIES 정점에서 수온염분 분포	40
그림	3-2-3-1.	2017년 (1차년도) CTD로부터 획득한 수온(좌) 및 염분(우)의 관측 단면 ······	41
그림	3-2-3-2.	2018년 (2차년도) CTD로부터 획득한 수온(좌) 및 염분(우)의 관측 단면 ······	41
그림	3-2-3-3.	(a) 2017년도와 (b) 2018년도 관측한 수온-염분 관계도 ·····	42
ㄱ리	3-2-3-1	UCTD(좌)와 CTD(우) 온도(상) 및 역분(하) 자료비교	13

그림	3-2-3-5.	정점별 CTD frame의 평균 기울기 및 표준편차 (좌) 2017년 (우) 2018년 …	44
그림	3-2-3-6.	LADCP 자료처리 모식도	45
그림	3-2-3-7.	2017년 LADCP 운용모습(좌). 2018년 LADCP 운용모습(우) ······	45
그림	3-2-3-8.	2018년 LADCP로부터 획득한 유속 관측단면, (좌)동서유속 (우)남북유속	46
그림	3-2-4-1.	쿠로시오 확장역에 투하된 Argo 플로트 이동 궤적과 관측 위치	49
그림	3-2-4-2.	Argo 플로트에서 관측한 수온과 염분 분포, 2901780(왼쪽)과 2901779(오른쪽) ··	50
그림	3-2-4-3.	쿠로시오 확장역에서 관측한 Argo 플로트의 수심별 수온 염분 분포	51
그림	3-2-4-4.	투하한 Surface drifter로부터 획득한 2018년 12월 31일까지의 이동 궤적 \cdots	52
그림	3-2-5-1.	북서태평양 쿠로시오 확장역 상층 온도와 상층 700 m 열용량의 45년	
		(1964-2008년) 평균과 표준편차	53
그림	3-2-5-2.	쿠로시오 확장역 상류 해역(동경 145-155도, 왼쪽 패널)과 하류 해역	
		(동경 155-165도, 오른쪽 패널)의 수온, 염분, 유속 남북방향 수직 단면 비교 …	54
그림	3-2-5-3.	쿠로시오 확장역 상층 700 m 열용량 변동의 Kuroshio Extension—Subarctic	
		Frontal Zone (KE-SAFZ) 모드 ·····	55
그림	3-2-5-4.	쿠로시오 확장역 상층 700 m 열용량 변동의 Kuroshio Extension (KE) 모드 …	56
그림	3-2-5-5.	KE-SAFZ 모드와 관련된 (a) 해면기압, (b) 바람장, (c) 해면고도의 시간차	
		상관관계	57
그림	3-2-5-6.	KE 모드와 관련된 (a) 해면기압, (b) 바람장, (c) 해면고도의 시간차 상관관계 \cdots	58
그림	3-2-5-7.	KE-SAFZ mode와(위) KE mode와(아래) 관련된 해면고도 ·····	59
그림	3-3-1-1.	2017년 쿠로시오 확장역 질산염 수직분포	60
그림	3-3-1-2.	2017년 쿠로시오 확장역 인산염 수직분포	61
그림	3-3-1-3.	2017년 쿠로시오 확장역 규산염 수직분포	62
그림	3-3-1-4.	2017년 쿠로시오 확장역 N/P 수직분포	63
그림	3-3-1-5.	2018년 쿠로시오 확장역 질산염 수직분포	64
그림	3-3-1-6.	2018년 쿠로시오 확장역 인산염 수직분포	65
그림	3-3-1-7.	2018년 쿠로시오 확장역 규산염 수직분포	66
그림	3-3-1-8.	2018년 쿠로시오 확장역 N/P 수직분포	67
그림	3-3-1-9.	주성분 도출표	68
그림	3-3-1-10). 인자부하량에 따른 각정점의 인자점수 분포	68

그림	3-3-2-1.	2017년 전체(상), 피코(하) 사이즈 염록소 수직분포69
그림	3-3-2-2.	2018년 정점도 70
그림	3-3-2-3.	2017년 항차에서 측정된 전체 및 pico 사이즈 chlorophyll a의 농도 70
그림	3-3-2-4.	2017년 항차에서 측정된 전체 및 pico 사이즈 chlorophyll a의 농도 71
그림	3-3-2-5.	쿠로시오 확장역의 2017년 조사 간 식물플랑크톤 지시색소조성
		(ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19' -hex, chlorophyll-b,
		divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin) 72
그림	3-3-2-6.	쿠로시오 확장역의 2017년 조사 간 pico 사이즈 식물플랑크톤의 지시색소조성
		(ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19' -hex, chlorophyll-b,
		divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin) 72
그림	3-3-2-7.	쿠로시오 확장역의 2018년 조사 간 식물플랑크톤 지시색소조성
		(ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19' -hex, chlorophyll-b,
		divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin) 73
그림	3-3-2-8.	쿠로시오 확장역의 2018년 조사 간 pico 사이즈 식물플랑크톤의 지시색소조성
		(ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19' -hex, chlorophyll-b,
		divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin) 73
그림	3-3-2-9.	쿠로시오 확장역 2017년 조사 간 주요 식물플랑크톤 군집의 개체수
		($\langle 40~\mu$ m, Cryptomonads, nanoflagellates, picoeukaryotes, Synechococcus
		and Prochlorococcus) 75
그림	3-3-2-10). 쿠로시오 확장역 2017년 조사 간 주요 식물플랑크톤 군집의 개체수
		($\langle 40~\mu$ m, Cryptomonads, nanoflagellates, picoeukaryotes, Synechococcus
		and Prochlorococcus) 75
그림	3-3-2-11	. 2017년 쿠로시오 확장역에서 FlowCAM을 활용하여 확인한 식물플랑크톤
		형태학적 이미지 결과 76
그림	3-3-2-12	2. 쿠로시오 확장역에서 출현하는 중심돌말류. (a) Coscinodiscus marginatus,
		(b) Actiniscus pentasterias, (c) Actinocyclus cuneiformis,
		(d) Asteromphalus elegans, (e) Coscinodiscus granii, (f) Chaetoceros danicus,
		(g) Actinoptychus senarius, (h) Asteromphalus arachne,
		(i) Rhizosolenia hebatata. (i) Bacteriastrum hyalinum. (k) Azpeitia barronii.

		(I) Chaetoceros peruvianus, (m) Hemiaulus sinensis, (n) Hemiaulus hauckii,	
		(o) Asteromphalus roperianus, (p) Chaetoceros messanensis,	
		(q) Bacteriastrum furcatum, (r) Bacteriastrum comosum	77
그림	3-3-2-13	3. Morphologic images of pennales in Kuroshio Extension. (a) Fragilariopsis	
		doliolus, (b) Nitzschia sicula, (c) Nanoneis hasleae, (d) Thalassionema	
		bacilare, (e) Pleurosigma directum, (f) Pseudo-nitzschia pungens	78
그림	3-3-2-14	4. 쿠로시오 확장역에서 출현하는 와편모조류 (a) Dinophysis acuta,	
		(b) Dinophysis tripos, (c) Dinophysis acuminata, (d) Dinophysos schuettii $\cdot\cdot$	78
그림	3-3-2-15	5. 2017년 쿠로시오 확장역에서 Proteobacteria 군집의 분포(Alphaproteobacteria	ì,
		Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria Deltaproteobacteria)	78
그림	3-3-2-16	6. 2018년 쿠로시오 확장역에서 Proteobacteria 군집의 분포(Alphaproteobacteria	ì,
		Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria Deltaproteobacteria)	79
그림	3-3-2-17	7. 2017년 쿠로시오 확장역에서 초미세남세균 군집의 분포(Prochlorococcus	
		high-light (HL), low-light (LL), Synechococcus 5.1, 5.2, 5.3)	80
그림	3-3-2-18	3. 2017년 쿠로시오 확장역에서 진핵생물의 분포 (3 μ m 이상의 군집:	
		Prymnesiophyceae, Bacillariophyta, Mamiellophyceae, Prasinophyceae,	
		Orchrophyta_unclassified, Cryptophyceae; 3 μ m 이하의 초미소플랑크톤	
		군집: Prymnesiophyceae, Mamiellophyceae, Orchrophyta_unclassified,	
		Archeplastida_unclassified, Pelagomonas, Prasinophyceae, Chrysophyceae	_
		Synurophyceae, Cryptophyceae)	80
그림	3-3-2-19	9. 2018년 쿠로시오 확장역에서 정점별 일차생산력(mg C m—2 d—1) 결과 …	81
그림	3-3-2-20). T2017년, 2018년 쿠로시오 확장역에서 유광층 내의 광화학적 광합성 계수	
		Fv/Fm 변화	81
그림	3-3-2-2	1. 2017년 쿠로시오확장역에서의 Prokaryotic 생산양	82
그림	3-3-2-22	2. 2018년 쿠로시오 확장역에서 정점별 박테리아 군집의 개체수	82
그림	3-3-2-20	3. 2018년 쿠로시오 확장역에서 정점별 박테리아 생산성	83
그림	3-3-2-24	4. 2017년 쿠로시오 확장역에서 정점별 유광층 내 질산염, 암모늄, 요소,	
		질소의 동화속도	84
그림	3-3-2-25	5. 2017년 쿠로시오 확장역에서 질소동위원소별 동화속도 (위) 및	
		신생산/재생산 (아래) 결과	84

그림	3-3-2-26	2017년 쿠로시오 확장역에서 안정동위원소를 이용한 정점별 생물의	
		먹이망 연구결과	85
그림	3-3-2-27	7. 2017년 쿠로시오 확장역에서 안정동위원소를 이용한 크기별 생물의	
		먹이망 연구결과	85
그림	3-3-3-1.	빈영양 북태평양 자이어에서의 관측 정점도	87
그림	3-3-3-2.	계류정점 수심 800 m에서 침강입자 채집기를 이용해 획득한 침전물	88
그림	3-3-3-3.	계류정점 수심 4000 m에서 침강입자 채집기를 이용해 획득한 침전물	89
그림	3-3-3-4.	계류정점 800 m, 4000 m에서의 입자 플럭스	91
그림	3-4-1-1.	2017년 (1차년도) 정점 별 연직 난류 소산율 분포	93
그림	3-4-1-2.	2018년 (2차년도) 정점 별 연직 난류 소산율 분포	94
그림	3-4-1-3.	2017년 (1차년도) 정점 별 직접 관측 (검은색) 및 간접 추산 (붉은색) 연직	
		확산계수 분포. 실선과 점선은 각각 Osborn method와 Shih method에 의해	
		계산된 연직 확산 계수	96
그림	3-4-1-4.	2018년 (2차년도) 정점 별 직접 관측 (검은색) 및 간접 추산 (붉은색) 연직	
		확산계수 분포. 실선과 점선은 각각 Osborn method와 Shih method에 의해	
		계산된 연직 확산 계수	97
그림	3-4-1-5.	직간접 방법을 통한 난류 소산율 분포. 직접관측(VMP, 검정색),	
		간접관측(GM model, 빨강색) ······	99
그림	3-4-2-1.	송신원 에너지에 따른 SO 신호 비교	100
		6C~S2 까지의 탄성파 탐사 측선(좌) 및 선미 스트리머 배치(우) ·····	
그림	3-4-2-3.	탄성파 탐사 자료 처리 절차도	101
그림	3-4-2-4.	자료 처리 전(좌), Band pass 필터 및 구형 발산 보정 적용 후(중), F-K 필터	
		적용 후 (우) 공통 송신원 모음	102
		두 번째(상), 다섯 번째(중), 열 번째(하) 수신기의 공통 수신기 모음	
		중합 단면도	
		CTD, XBT, XCTD 관측 자료 ·····	
		중합 단면도와 반사계수	
		선형 보간법으로 얻은 음파 전달 속도	
그리	3-1-2-10) 음파 전닥 속도 반사계수 및 중합 단면도와 각 자료에서 보이는 수층 경계 …	106

그림 3-	-5-1-1.	샤츠키 해저고원(Shatsky Rise)의 해저지형과 2018년도 획득시료	
		HI1818-GPC1 및 2017년 획득시료 HI1715-GPC1 의 위치(figure modified	
		from Sager et al., 2009)	107
그림 3-	-5-1-2.	HI1715-GPC1 절개 단면 사진	110
그림 3-	-5-1-3.	HI1818-GPC1 절개 단면 사진	110
그림 3-	-5-1-4.	지난 3만년 동안 지역별 퇴적률 변화양상	111
그림 3-	-5-1-5.	NPGP1302-1B 내 부유성(A) 및 저서성(B), 유공충의 산소동위원소조성 및	
		부유성유공충 종간 차이(C)	112
그림 3-	-5-1-6.	NPGP1302-1B 내 산출되는 부유성 유공충 중 우점하는 9종의 상대적인	
		비율	113
그림 3-	-5-1-7.	연구지역 (NPGP1302—1B)과 계절변동에 의한 편서풍 제트의 경로,	
		중앙-동아시아의 주요 건조지대의 위치와 그들의 석영 전자스핀공명값	114
그림 3-	-5-1-8.	NPGP1302-1B 코어 퇴적물의 (a) 퇴적률과 성분별 플럭스(mass accummulation)
		rate; MAR), (b) 풍성기원입자의 ε Nd, 87Sr/86Sr 조성, (c) 화산기원물질의	
		함량(P3)과 정장석/사장석 비율, (a) 석영입자의 ESR, (e) P3과 ESR로	
		계산한 고비사막, 타클라마칸사막, 화산쇄설물의 상대적 기여도	115
그림 3-	-5-1-9.	(A) HI1715-GPC1 퇴적물 내 풍성기원입자의 함량(녹색선) 및 평균입도 변호	ŀ
		(적색선). (B) 마지막 빙하 최성기(LGM) 이후 현재까지 지구 평균 온도변화	
		(녹색선), 그린란드 기온(적색선) 및 서남극 기온(청색선) 비교(data from	
		Cuffey et al., 2016)	116

Fig.	1-2-1. Su	ummary of research contents	. 6
Fig.	1-2-2. Or	ganization	. 8
Fig.	3-1-1-1.	Map of the stations and ship track during the cruise	17
Fig.	3-1-2-1.	Mooring diagram in the Kuroshio Extension region	23
Fig.	3-1-2-2.	Ship track during the mooring works at 2017, 2018	25
Fig.	3-1-2-3.	Map of the Pressure Inverted Echo Sounder stations	27
Fig.	3-2-1-1.	Map of the surface temperature following the ship track	30
Fig.	3-2-1-2.	Map of the surface salinity following the ship track	31
Fig.	3-2-1-3.	Map of the current at the upper layer following the ship track	32
Fig.	3-2-1-4.	Contours of the ocean current during the cruise	32
Fig.	3-2-2-1.	Upper layer current at the mooring site (33.72° N, 156.62° E) $\cdots\cdots$	34
Fig.	3-2-2-2.	900m, 2000m, 44000m currents at the mooring site	35
Fig.	3-2-2-3.	Bottom current at the mooring site	35
Fig.	3-2-2-4.	Progressive vector diagrams of measuring depth at the mooring site	36
Fig.	3-2-2-5.	Currents power spectrum density at the mooring site, zonal (left) and	
		meridional (right) components	36
Fig.	3-2-2-6.	Diagram of PIES data processing. (Kennelly et al., 2007)	37
Fig.	3-2-2-7.	Distribution of EN4 profilers	38
Fig.	3-2-2-8.	Temperature GEM table and rms error, green and red lines are range of	
		the $ au$ which measured C09, C07 respectively	39
Fig.	3-2-2-9.	Salinity GEM table and rms error, green and red lines are range of the $\boldsymbol{\tau}$	
		which measured C09, C07 respectively	39
Fig.	3-2-2-10). Contour of temperature and salnity at the PIES site	40
Fig.	3-2-3-1.	Contour of temperature(left) and salinity(right) from CTD at 2017	41
Fig.	3-2-3-2.	Contour of temperature(left) and salinity(right) from CTD at 2018	41
Fig.	3-2-3-3.	TS-diagram at (a) 2017, (b) 2018	42
Fig.	3-2-3-4.	Contour of temperature and salinity UCTD(left) and CTD(right)	43
Fig.	3-2-3-5.	Mean and standard deviation of CTD-frame tilting	44
Fig.	3-2-3-6.	Diagram of LADCP data processing	45

Fig.	3-2-3-7.	LADCP operation at 2017 (left) and 2018 (right)	45
Fig.	3-2-3-8.	Contour of the ocean currents at 2018. zonal (left) and meridional (right)	
		current	46
Fig.	3-2-4-1.	Map of Argo float track	49
Fig.	3-2-4-2	Contour of temperature and salinity of Argo float, serial number 2901780	
		(left), serial number 2901779 (right)	50
Fig.	3-2-4-3.	Temperature and salinity at depths following the Argo float	51
Fig.	3-2-4-4.	Map of the Surface drifter tracks	52
Fig.	3-2-5-1.	Mean and standard deviation of sea surface temperature and upper	
		700 m heat content over the Kuroshio Extension for 45 years	
		(1964-2008). Black dotted lines in the right panel denote 35° N and	
		41° N, which are representative latitude of the Kuroshio Extension jet	
		and Subarctic Frontal Zone, respectively. Note that sea surface	
		temperature and upper ocean heat content exhibits strong variability at	
		different latitudes	53
Fig.	3-2-5-2.	Zonal mean (left: 145° E-155° E. right: 155° E-165° E) of the	
		vertical section of temperature, salinity, and zonal velocity. Black solid	
		lines highlight 35° N and 41° N, which are representative latitude of	
		the Kuroshio Extension jet and Subarctic Frontal Zone, respectively	54
Fig.	3-2-5-3.	Spastial pattern and its corresponding PC time series of the Kuroshio	
		Extension-Subarctic Frontal Zone (KE-SAFZ) mode of upper 700 m	
		heat content variability over the Kuroshio Extension	55
Fig.	3-2-5-4.	Spastial pattern and its corresponding PC time series of the Kuroshio	
		Extension (KE) mode of upper 700 m heat content variability over the	
		Kuroshio Extension	56
Fig.	3-2-5-5.	Lag correlation (2-yr lag-half-year lead) of the KE-SAFZ mode with	
		(a) sea level pressure, (b) wind stress curl, and (c) sea surface height.	
		The top four rows are when the KE-SAFZ mode lags, the fifth row	
		(the second row from the bottom in the blue box) is at zero lag,	
		and the bottom row is when the KE-SAFZ mode leads. Correlation	

	coefficients exceeding ± 0.2 are shaded (red for positive and blue for	
	negative) and black contours indicate 95% confidence level. The 35°	
	and 41° N latitude lines and the 155° E longitude line are displayed as	
	bold black lines	57
Fig. 3-2-5-6.	Lag correlation (4-yr lag-1-yr lead) of the KE mode with (a) sea level	
	pressure, (b) wind stress curl, and (c) sea surface height. The top four	
	rows are when the KE mode lags, the fifth row (the second row from	
	the bottom in the red box) is at zero lag, and the bottom row is when	
	the KE mode leads. Correlation coefficients exceeding ± 0.2 are shaded	
	(red for positive and blue for negative) and black contours indicate 95%	
	confidence level. The 35° and 41° N latitude lines and the 155° E	
	longitude line are displayed as bold black lines	58
Fig. 3-2-5-7.	Lag correlation (4-yr lag-1-yr lead) of the (a) KE-SAFZ mode and	
	(b) KE mode with sea surface height (SSH) averaged over 32° -38° N.	
	Positive lag means that SSH leads and a zero lag is displayed as bold	
	black lines. Correlation coefficients exceeding ± 0.2 are shaded (red for	
	positive and blue for negative) and black contours are every 0.2 from	
	± 0.4 . The 155° E longitude lines are displayed as bold black lines	59
Fig. 3-3-1-1.	Vertical profiles of nitrate at the Kuroshio Extension in 2017	60
Fig. 3-3-1-2.	Vertical profiles of phosphate at the Kuroshio Extension in 2017	61
Fig. 3-3-1-3.	Vertical profiles of silicate at the Kuroshio Extension in 2017	62
Fig. 3-3-1-4.	Vertical profiles of N/P at the Kuroshio Extension in 2017	63
Fig. 3-3-1-5.	Vertical profiles of nitrate at the Kuroshio Extension in 2018	-64
Fig. 3-3-1-6.	Vertical profiles of phosphate at the Kuroshio Extension in 2018	65
Fig. 3-3-1-7.	Vertical profiles of silicate at the Kuroshio Extension in 2018	66
Fig. 3-3-1-8.	Vertical profiles of N/P at the Kuroshio Extension in 2018	67
Fig. 3-3-1-9.	Plots of the principal component loads	68
Fig. 3-3-1-10	D. Scatter plot of the scores on the principal components	68
Fig. 3-3-2-1.	Total and pico-sized chlorophyll concentrations measured in 2017	69

Fig.	3-3-2-2.	A map showing the study stations in 2018	70
Fig.	3-3-2-3.	Total and pico-sized chlorophyll concentrations measured in 2018	70
Fig.	3-3-2-4.	The biomass (mg C m-3; a: 2017; c: 2018) and relative biomass	
		(%; b: 2017; d: 2018) of the zooplankton in the Kuroshio Extension	
		during 2017 and 2018 cruise	71
Fig.	3-3-2-5.	Distributions of the total pigments (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin,	
		19' -hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin,	
		peridinin, alloxanthin) in the Kuroshio Extension area during 2017 cruise $\cdot\cdot$	72
Fig.	3-3-2-6.	Distributions of the pico-sized pigments (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthir	٦,
		19' -hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin,	
		peridinin, alloxanthin) in the Kuroshio Extension area during 2017 cruise $\cdot\cdot$	72
Fig.	3-3-2-7.	Distributions of the total pigments (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin,	
		19' -hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19' -but, zeaxanthin,	
		peridinin, alloxanthin) in the Kuroshio Extension area during 2018 cruise $\cdot\cdot$	73
Fig.	3-3-2-8.	Distributions of the pico-sized pigments (ng m-3; chlorophyll-a,	
		fucoxanthin, 19' -hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19' -but,	
		zeaxanthin, peridinin, alloxanthin) in the Kuroshio Extension area during	
		2018 cruise ····	73
Fig.	3-3-2-9.	The abundances of phytoplankton groups ($\langle 40~\mu$ m, Cryptomonads,	
		nanoflagellates, picoeukaryotes, Synechococcus and Prochlorococcus) of	
		Kuroshio Extension in 2017	75
Fig.	3-3-2-10). The abundances of phytoplankton groups (<40 μ m, Cryptomonads,	
		nanoflagellates, picoeukaryotes, Synechococcus and Prochlorococcus) of	
		Kuroshio Extension in 2018	75
Fig.	3-3-2-11	. Phyplanktonic morphologic images obtained by FlowCAM in 2017	75
Fig.	3-3-2-12	2. Morphologic images of centrale diatom in Kuroshio Extension.	
		(a) Coscinodiscus marginatus, (b) Actiniscus pentasterias, (c) Actinocyclus	
		cuneiformis (d) Asteromphalus elegans, (e) Coscinodiscus granii,	
		(f) Chaetoceros danicus, (g) Actinoptychus senarius, (h) Asteromphalus	
		arachne, (i) Rhizosolenia hebatata, (j) Bacteriastrum hyalinum, (k) Azpeitia	

그림목차・

		barronii, (I) Chaetoceros peruvianus, (m) Hemiaulus sinensis, (n) Hemiaulus	
		hauckii, (o) Asteromphalus roperianus, (p) Chaetoceros messanensis,	
		(q) Bacteriastrum furcatum, (r) Bacteriastrum comosum	7
Fig.	3-3-2-13.	Morphologic images of pennales in Kuroshio Extension. (a) Fragilariopsis	
		doliolus, (b) Nitzschia sicula, (c) Nanoneis hasleae, (d) Thalassionema	
		bacilare, (e) Pleurosigma directum, (f) Pseudo-nitzschia pungens	8
Fig.	3-3-2-14.	Morphologic images of dinoflagellate in Kuroshio Extension. (a) Dinophysis	
		acuta, (b) Dinophysis tripos, (c) Dinophysis acuminata, (d) Dinophysos	
		schuettii 75	8
Fig.	3-3-2-15.	Distributions of Proteobacteria groups (Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria,	
		Gammaproteobacteria and Deltaproteobacteria) of Kuroshio Extension in 2017 · 73	8
Fig.	3-3-2-16.	Distributions of Proteobacteria groups (Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria,	
		Gammaproteobacteria and Deltaproteobacteria) of Kuroshio Extension area	
		in 2018	9
Fig.	3-3-2-17.	Distributions of cyanobacterial groups (Prochlorococcus high-light (HL),	
		low-light (LL), Synechococcus 5.1, 5.2 and 5.3) of Kuroshio Extension	
		in 2017	0
Fig.	3-3-2-18.	Distributions of eukaryotes (Above 3 μ m size: Prymnesiophyceae,	
		Bacillariophyta, Mamiellophyceae, Prasinophyceae, Orchrophyta_unclassified,	
		and Cryptophyceae; pico size: Prymnesiophyceae, Mamiellophyceae,	
		Orchrophyta_unclassified, Archeplastida_unclassified, Pelagomonas,	
		Prasinophyceae, Chrysophyceae-Synurophyceae, and Cryptophyceae)	
		of Kuroshio Extension in 2017	0
Fig.	3-3-2-19.	Distributions of the daily primary production (mg C m-2 d-1) in the	
		Kuroshio Extension during 2018 research period	1
Fig.	3-3-2-20.	The contour plot of the Fv/Fm ratios in the Kuroshio Extension during	
		2017 and 2018 research periods	1
Fig.	3-2-2-21.	Prokaryotic abundances in Kuroshio Extension area in 2017 8	1
Fig.	3-3-2-22	Prokaryotic abundances in Kuroshio Extension area in 2018 8	2
Fig.	3-3-2-23	Bacterial productions of Kuroshio Extension in 2018 8.	3

Fig. (3-3-2-24.	The integrated uptake rates of the nitrogen species (nitrate; ammonium;	
		urea; nitrogen-gas) in the Kuroshio Extension during 2017 study period \cdots	84
Fig. 3	3-3-2-25.	The relative percentages of uptake rates (top) and the new/regenatrated	
		production (bottom) in the Kuroshio Extension during 2017 study period \cdots	84
Fig. 3	3-3-2-26.	The stable isotope food web diagram for stations in the Kuroshio	
		Extension during 2017 study period	85
Fig. 3	3-3-2-27.	The stable isotope food web diagrams for size-fraction in the Kuroshio	
		Extension during 2017 study period	85
Fig. 3	3-3-3-1.	Map showing the location of Station 8 in the oligotrophic North Pacific	
		Subtropical Gyre	87
Figure	e 3-3-3-7	2. Sediment trap samples recovered at a water depth of 800 m in Station 8 \cdots	88
Figure	e 3-3-3-3	3. Sediment trap samples recovered at a water depth of 4,000 m in	
		Station 8 ····	89
Fig. (3-3-3-4.	Particle fluxes at a water depth of 800 m (grey vertical bars) and 4,000	
		(opened vertical bars) of the Station 8	91
Fig. 3	3-4-1-1.	Vertical dissipation rate at the stations during 2017	93
Fig. 3	3-4-1-2.	Vertical dissipation rate at the stations during 2018	94
Fig. 3	3-4-1-3.	Vertical diffusivity at the stations during 2017. Black and red lines are	
		direct measurement and indirect parameterization respectively. line and	
		dotted line are Osborn and Shih method respectively	96
Fig. 3	3-4-1-4.	Vertical diffusivity at the stations during 2018. Black and red lines are	
		direct measurement and indirect parameterization respectively. line and	
		dotted line are Osborn and Shih method respectively	97
Fig. 3	3-4-1-5.	Directly measured and parameterized vertical dissipation rate. Black line is	
		direct measured dissipation rate using VMP. Red line is parameterized	
		vertical dissipation rate using GM-model	99
Fig. 3	3-4-2-1.	Comparison of SO signals from the different source energy 1	00
Fig. 3	3-4-2-2.	Seismic survey line(6C \sim S2) (left) and streamer on the ship (right) 1	01
Fig. 3	3-4-2-3.	Work flow of the seismic data processing	01

Fig.	3-4-2-4.	Shot gather before applying data processing (left), after applying band	
		pass filter and spherical divergence correction (middle), and after applying	
		F-K filter (right) 1	02
Fig.	3-4-2-5.	The second (top), fifth (middle), and tenth (bottom) receiver gather	03
Fig.	3-4-2-6.	Stack section	04
Fig.	3-4-2-7.	Data from CTD, XBT, and XCTD 1	04
Fig.	3-4-2-8.	Stack section and reflection coefficient	05
Fig.	3-4-2-9.	Sound velocity obtained by using linear interpolation 1	05
Fig.	3-4-2-10). Sound velocity, reflection coefficient, stack section and water layer	
		boundaries of each section1	06
Fig.	3-5-1-1.	Bathymetric figure of Shatsky Rise, Northwest Pacific, and the locations of	
		HI1818-GPC1 and HI1715-GPC1 (figure modified from Sager et al., 2009) \cdots 1	07
Fig.	3-5-1-2.	Core photograph of HI1715-GPC11	10
Fig.	3-5-1-3.	Core photograph of HI1818-GPC11	10
Fig.	3-5-1-4.	Sedimentation rates for the three sites for the last 30 kyrs 1	11
Fig.	3-5-1-5.	Oxygen isotope composition variations of planktic foraminifera (A),	
		benthic foraminifera (B), and their inter-species differences (C) 1	12
Fig.	3-5-1-6.	Relative abundances of major 9 planktic foraminiferal species, classified	
		into three groups1	13
Fig.	3-5-1-7.	Seasonal variation of westerly jet pathway and the characteristic values	
		of electron spin resonance (ESR) of sedimentary quartz in the present-day	
		East-Central Asian aridlands 1	14
Fig.	3-5-1-8.	(a) The linear sedimentation rate and the mass accumulation rates of	
		sedimentary components, (b) ϵ Nd and 87Sr/86Sr compositions, (c) the	
		amounts of volcanogenic components (P3), (d) ESR of quartz grains, and	
		(e) the relative contributions from possible sources of lithogenic sediments	
		for NPGP1302-1B	15
Fig.	3-5-1-9.	(A) The contents and median grain size of eolian components for	
		HI1715-GPC1 and (B) the comparison of modelled global temperature	
		(green line), proxy-based Greenland air temperature (red line) and the	
		West Antarctica air temperature (blue line) (data from Cuffev et al. 2016) 1	16

제1장 서 론



제1장 서 론

제1절 연구개발의 필요성

전 대양에서 온난화가 가장 강하게 나타나는 해역은 우리나라가 포함된 북서태평양, 미국북동부 연안 등 아열대 순환계와 아한대 순한계가 만나는 순환계경계역과 서안경계역이다. 북태평양의 쿠로시오-오야시오 순환류 경계역은 지구온난화에 대한 민감하게 반응하는 해역으로, 북태평양 아열대-아한대 순환류 시스템의 서안경계류인 쿠로시오와 오야시오 해류는 한반도 근해의 해양환경에 직접적 영향을 주는 매우 중요한 해역이다. 그러므로 기후변화를 이해하고 대응하기 위해서는 이 해역이 어떻게 변화하는지 이해하고 예측할 수 있어야 하는데 전지구적으로 진행되고 있는 중·장기 기후변화에 의한 북서태평양 아열대-아한대 순환류 경계역, 즉 쿠로시로 확장역의 지역적 변화와 그에 따른 한반도 인근해의 반응은 예측이 어려운 상황이다.

쿠로시오 확장역은 다양한 시간규모를 가지고 변한다. 수십일에서 수 개월 사이에서는 에디에 의한 변동성이 나타나고, 연 규모 에서는 Shatsky rise 해역에서 쿠로시오 확장역이 갈라지거나 위치를 바꾸는 변화가 나타난다. 수십년 범위 이내에서 기후모델을 분석하여 지구온난화가 지속되면 쿠로시오 오야시오 확장역이 변화함을 보여주었고 (Cheon et al., 2012), 북태평양영양염분포가 쿠로시오 오야시오 확장역의 남북방향 이동에 의해 좌우됨을 증명하였다 (Kwon et al., 2016), 빙하기 간빙기 규모에서는 기후모형을 이용하여 빙하기 동안 북태평양 중층수생성이 증가함을 보여주었고(Kim and Park, 2008), 북태평양순환계의 남하로 하와이부근 퇴적물에서 복원한 계절특성을 설명할 수 있음을 제시하였다 (Lee & Park, 2003).

쿠로시오 확장역에서 수행된 대규모 미-일 공동 해양 조사에서 해류 변동성에 미치는 eddy 의 영향이 큼이 밝혀졌으나 관측이 쿠로시오 확장역의 상류역에 한정되어 있어 에디 생성에 대한 추가 조사가 필요하다. 쿠로시오 확장역 해류 변동성이 해저지형의 효과로 생성된다고 여겨지는 deep eddy의 영향을 크게 받는다는 것을 수치모델 실험 결과로 보였다 (Na et al. 2012, 2016). 해류와 해저지형의 작용에 의해 deep eddy가 생성되는 Shatsky rise 해역에서의 관측 조사는 deep eddy 생성과 전파 과정에 대한 중요 정보를 제공할 수 있다. Shatsky rise 해역에서 쿠로시오 확장역이 갈라지거나 위치를 바꾸는 등 순환계에 커다란 변화가 나타나는데, 이런 순환계의 변화는 생태계, 물질순환 등 해양 환경을 변화시키고, 해양-대기 상호작용을 통해 대기순환도 변화시킨다. 이런 변화를 이해하기 위해서는 계류시스템으로부터 이 해역의 변동 특성 연구에 대한 자료를 얻었다.

쿠로시오 확장역에서 용존 영양염, 부유물질, 입자성유기탄소 등 생지화학적 자료를 획득하

고 변동경향을 파악하여, 생태계 구조와 변동성 파악을 위한 기초자료를 제공하며, 계류시스 템을 이용한 침강입자 자료 획득과 침강입자 플럭스 및 침강입자 내 유기탄소 플럭스 변동 및 조절인자 분석에 연구 범위를 두고 있다.

장기적 기후변화의 결과로서 발생할 쿠로시오확장역의 변화양상을 보다 명확히 예측하기 위해 지질학적 과거에 일어난 대규모 기후변화에 따른 반응을 이해할 필요가 있다. 쿠로시오 확장역의 빙하기-간빙기 규모 변동성을 이해하려는 목적으로, 쿠로시오확장역의 경로상에 놓 인 북서태평양 샤츠키 해저고원(Shatsky Rise)에서 자이언트피스톤코어(Giant Piston Core, GPC) 를 획득하고 시기별 고해양환경에 대한 분석을 시도하였다. 대부분의 태평양 분지가 수심 5,000 m 이상인 데 비해 샤츠키 해저고원은 주변부에 비해 약 2-3000 m 높은 지형을 형성하 여 탄산염 퇴적물의 보존이 양호하고 고해상도의 고기후/고해양 연구에 적합한 지역으로 알려 져 있다. 본 연구에서는 퇴적물 내 보존되어 있는 과거 해양환경의 지시자인 부유성 유공충의 동위원소 및 원소 조성, 그리고 편서풍 경로를 나타내는 풍성기원입자의 기원지 분석을 통하 여 편서풍 경로와 쿠로시오확장역의 경로변화에 대한 종합적 해석을 이끌어내고자 하였다. '심해퇴적물 고기후 지시자를 이용한 북태평양순환류 변동성 연구'(한국해양과학기술원, 2013-2015년, 연구책임자: 형기성)에서 북태평양 아열대순환류 영향역 내 퇴적물 시료를 이용 한 해양환경 복원 연구를 수행하였으나, 아열대-아한대 순환류 경계역의 시료확보가 어려워 본 연구해역에 대한 연구는 매우 제한적으로 진행되었다. 지질학적 과거에 일어난 대규모 기 후변화 시기(예: 해빙기 온난화) 북서태평양 아열대-아한대 순환류 경계역에서 발생한 해양환 경 변화와 그에 따른 생태계 변화는 현재 발생하는 기후변화에 중요한 정보를 제공한다.

수층의 구조를 파악하고 해수의 물성 자료를 획득하는 것은 해양의 특징을 파악하는데 중 요한 역할을 한다. 기존에는 해양 물리 관측 장비 (CTD, XBT, XCTD)를 이용하여 일정 간격 마다 정해진 정점에서 해수의 물성 값을 직접 관측하였다. 이 방법은 높은 수직 해상도를 가 진다는 장점이 있지만 시간 및 경제적 한계로 인해 수평 해상도가 낮다는 단점이 있다. 낮은 수평 해상도 문제를 극복하기 위해서 탄성파 해양학 (Seismic Oceanography) 이 제안되었다. 탄성파 해양학은 지층 구조 파악 및 물성 취득을 위해 널리 사용되는 탄성파 탐사 기법을 수 층 구조 파악 및 물성 취득에 적용하는 방법으로 서로 다른 물성을 가진 수층 간 존재하는 임피던스 차이로 인해 발생하는 반사파를 측정하여 수층 구조를 영상화하고 물성 값을 도출 한다. 탄성파 해양학 연구는 현재 해양 물리 관측 방법 중 하나로 자리잡아가고 있으나 우리 나라에서는 아직 연구가 미진한 상태이다. 본 연구 과제에서는 탄성파 해양학 탐사 설계, 자 료 취득 및 자료 처리 방법에 대해 연구를 수행하고 쿠로시오 확장역에서 직접 탄성파 탐사 를 수행하여 수층 구조를 도출하였다.

해양 산성화, 온난화 등 지구적 규모의 해양 환경 변화가 일어나고 있으나, 해양의 대부분 을 차지할 뿐만 아니라. 우리나라 주변해에 영향을 미칠 수 있는 대양 환경에서의 연구 자료 는 매우 부족한 실정이다. 본 연구를 통해 다양한 해양학적 구배에 따른 물리·화학·생물 및 지화학적 자료를 축적함으로써 지구적 해양 환경 변동에 따른 생태계 및 생지화학 물질의 변

동성을 이해하는데 중요한 기초 정보를 얻었다. 종합적이고 집중적인 연구를 통해 해양과기원의 대표 연구 해역을 마련하고, 이를 통해 해양 연구 역량을 고양하고, 우수 연구 성과를 창출하기 위한 기반을 마련하고자 하였다. 또한 장기적이고 종합적인 해양 연구 자료 확보를통해 우수한 해양학적 연구 성과를 도출하고 이런 성과를 바탕으로 우수 해외 연구 기관 및연구자와의 협력 연구의 주도권도 확보하려고 하였다.

기후모의의 정확도를 높이기 위해 실해역 모니터링이 진행 중이나, 현재 진행 중인 기후변 화가 유례없이 급격하게 진행되어 해양·대기 기후모의의 재현성, 정확도를 높이기 위해서는 다양한 기후 변수 조건의 실례가 필요한데 이 연구사업에서 자료가 상대적으로 부족한 해역 의 실측자료를 획득하였다. 지역적 중요성에도 불구, 독립적 시료 확보가 어려워 면밀한 연구 가 이루어지지 못한 상황에서 본 연구를 통해 쿠로시오 확장역의 순환계 변동성을 규명하면 한반도를 포함한 북서태평양 기후변화를 이해하고 기후 예측에 필요한 기반이 마련될 것이다. 이 연구과제는 '해양과학기술의 창의적 원천기초연구, 응용 및 실용화 연구와 해양분야 우 수 전문인력의 교육·훈련을 통하여 국내·외적으로 해양과학기술의 연구개발을 선도하고 그 성과를 확산'한다는 해양과기원 정관상 설립 목적에 부합하며, '해양과학기술 및 해양산업 발전에 필요한 원천연구, 응용 및 실용화연구'등의 고유 임무에 부합된다. 또한 '기후변화 예 측 및 대응 - 북태평양 해류변동, 물질교환'라는 주요 연구 주제와도 연계된다. 이 연구를 통 하여 "해양연구기반 강화"와 "창의적 인재양성"과 관련하여 지구 규모의 기후변화 예측 및 해 양환경 변화 복원 기술에 관한 국제경쟁력을 확보하고, 국제공동연구프로그램 개발을 주도할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다. 우리원 발전 전략(2012-2020)에 따른 주요 기능 중 '해양 관측탐사, 해양환경 및 기후 변화에 관한 연구'및 12대 중점연구분야 중'해양환경 및 생태 계 보전기술'과 '기후변화 예측 및 대응기술''에 부합된다. 우리원의 경영 목표(과제시작시) 중 '해양연구를통한 기후변화 예측 및 대응', '지속가능한 해양생태계 관리 및 미래 유용자원 탐 색·활용' 및 '국가 해양영토 관리체제 구축 및 해양경제영토 확대를 위한 과학기술 개발'을 지원하며, 우리원의 전략목표 중 "기후변화의 과학적 이해를 위한 해양순환연구"와 "환경변화 에 따른 해양생태계 반응 이해 및 대응기술 연구"와 부합한다. 우리원의 성과목표 중 "북태평 양 해수순환 및 해양 기후변화 진단"과 직접적으로 관련된다.

정부 140대 국정과제 중 13번 "해양 신성장 동력 창출 및 체계적 해양관리"를 위해 주변해역에 대한 해양관측과 조사활동 강화 및 해양관리와 관련된다. 국정과제 98 "온실가스 감축등 기후변화 대응"을 위해서는 범지구적 기후변화 및 환경문제에 주도적 역할을 수행하는데기여하고, 국정과제 99 "기상 이변등 기후변화적응"을 위해 기후변화의 해양 영향 및 연동되는 생태계 반응에 대한 이해와 예측 능력 강화에 기여한다.

제2절 연구개발의 목표와 내용

연구개발 최종목표와 내용 설정근거는 아래와 같다.

표 1-2-1. 연구목표

구분	내 용
최종목표	- 쿠로시오 확장역의 순환계 변동성, 하위생태계 구조·생산성 및 생지화학 물질(C, N)
의 중국표	순환 특성 규명
	- 기후변화의 영향이 쿠로시오 확장역에서 더 크게 나타나는 것으로 알려짐
	- 쿠로시오 확장역의 변화는 해양과 대기에 큰 영향을 미치나, 쿠로시오 확장역에 대
최종목표	한 국내 연구는 매우 부족함
설정근거	- 쿠로시오 확장역의 변화를 파악하는 것은 기후변화에 대응하기 위한 기초자료를 제시함
	- 쿠로시오 확장역의 변화는 해양생태계와 생지화학 순환에도 큰 영향을 미치므로 이
	에 대한 연구를 수행해야 함
	- 계류시스템을 이용한 물리와 침강입자 자료 획득
	- 하위생태계의 구조와 생산성의 변동 특성 규명
лнпы	- 탄소, 질소의 순환 특성과 변동성 규명
세부목표	- 순환계의 장단기 (계절-십년 규모) 변화특성 파악과 규명
	- 북태평양의 장주기 (빙하기-간빙기) 변동성 규명
	- 쿠로시오 확장역 수층 구조 영상화 및 수괴 분포·혼합 특성 규명

연차별 연구내용은 요약하여 아래에 나타내었다. 최초 연구기간은 2017년부터 2019년 까지 3년 이었으나 원내 정책이 바뀌면서 2018년에 중단되었다. 2019년에 계획했던 내용은 다른 연 구과제에 편입되었다.

쿠	최종목표	1차년도(2017)	2차년도(2018)	3차년도(2019)
로 시 오 확	쿠로시오 확장역의 순환계 변동성 규명 하위생태계 구조 · 생산성 및 생지화화 물질(C, N) 순환 특성 규명	쿠로시오 확장역에서 물질순환 기초 자료 획득과 계류시스템 설치	쿠로시오 확장역 해양 순환 과 물질 분포 관련성 규명	쿠로시오 확장역의 변동과 물질 순환 특성 규명
장 역				
예	세부성과목표	• Sediment trap 계류	·하위 생태계 생물량/다양성/ 먹이망	·해역별 하위 생태계 생물량/ 다양성/먹이망
서	하위생태계 구조와 생산성	• 탄소플럭스, 영양염 등 생지화학 자료 획득	· 기초생산성 연변동 추정 알고리	· 탄소/질소 등 물질순환 특성과
	평가 및 생지화학 물질(C, N)	· 하위 생태계 먹이망 구조. 생물량	좀 및 C-export 연변동	조절요인
물 질	순환 특성 규명	/다양성, 기초생산성		
순 환 의	쿠로시오 확장역 순환계의 수개월-수십년 주기 변동성	· 계류시스템 설치 · 기존자료를 활용한 연구	· 계류자료 분석, 기존 자료 분석 · 기존자료를 활용한 변동 특성 연구	 계류자료, 기존 자료 분석 수개월~수십년 주기 변동성 구조 파악
변 동		• 샤츠키 해저고원에서 퇴적물 시	• 샤츠키 해저고원에서 퇴적물 시	• 과거 아열대-아한대환류 경계역
	북태평양 빙하기-간빙기	료 1개 획득	료 1개 획득	위치변화 규명
특 성	주기 변동성	• 확보 시료 기초 분석	· 수온 염분 프록시 및 유공충 군집 구조 분석, 편서풍 경로변화 추적	• 경계역/대기순환 변동 관련성해석
04		· 미세난류구조 직접 관측	• 소~중규모 수층 구조 영상화	• 소~중규모 수층 구조 영상화 (?)
연구	수층구조와 혼합 특성	· 탄성파해양확 연구기법수립과 자료 (200~300 km) 획득	• 해수 혼합특성 연구	• 해수 혼합특성 연구

그림 1-2-1. 연구내용 요약 (Summary of research contents)

연차별 상세 연구내용은 아래와 같다.

표 1-2-2. 연차별 성과목표 및 연구내용 (Yearly research purpose and contents)

74	연차별 성과목표 및 연구내용			
구분	성과목표	연구내용		
	1. 계류시스템 설치	1-1. sediment trap (침강입자 포집기) 2대, 해류계 3대 이상으로 구성된 계류선과, PIES 2대 이상을 샤츠키 해저고원 서쪽에 설치		
		1-2. 고도계, 모델 자료 등을 활용하여 대상 해역의 변동 특성 연구		
	a 케네케 케키취취	2-1. 탄소플럭스, 영얌염 등 생지화학 자료 획득		
1차년도 (2017)	2. 생태계 생지화학 기초자료 획득	2-2. 하위 생태계 먹이망 구조, 생물량/다양성, 기초생산성 현장 조 사, 시료 확보 및 기초분석		
	3. 수층구조와 해양	3-1. 미세난류구조 직접 관측		
	혼합 특성 조사	3-2. 탄성파해양학 연구기법수립과 자료 (200 ~ 300 km) 획득		
	4. Giant 피스톤 코어	4-1. Shatsky 해저고원에서 giant 피스톤 코어 퇴적물 시료 2 정점 획득		
	퇴적물 시료 획득	4-2. 확보 시료 기초 분석		
	1. 계류 시스템 유지와 관측자료 분석	1-1. 기 sediment trap 2대, 해류계 3대 이상으로 구성된 계류선과 PIES 2대 이상 샤츠키 해저고원 서쪽에 설치		
		1-2. 고도계, 모델 자료 등을 활용하여 대상 해역의 변동 특성 연구		
	2. 하위 생태계 구조 및 C-export 조사와 정량화	2-1. 하위 생태계 구조 및 먹이망 연구 - 하위 생태계 특성 및 먹이망 구조 - 경계역 수괴 내 영양염, 부유물질, 입자성 유기탄소 변동 경향		
		2-2. 탄소플럭스 변동 연구 - 시계열 퇴적물 포집장치를 이용한 수심 별 침강 입자 시료 획득		
2차년도 (2018)	3. 소~중규모 수층	3-1. 미세난류연구		
	구조와 혼합 특성	3-2. 탄성파 자료 취득 방법 개선 및 처리 기법 보완		
	규명	3-3. 1차년도에 취득한 탄성파 탐사 자료 처리 및 분석		
	4, Giant 피스톤 코어 퇴적물 시료	4-1. Shatsky 해저고원에서 giant 피스톤 코어 퇴적물 시료 1 정점 획득		
	획득 및	4-2. 확보시료 수온 염분 프록시 및 유공충 군집구조 분석		
	고해양환경 프록시 분석	4-3. 풍성기원입자 기원지 및 플럭스 분석을 통한 편서풍 경로변화 추적		

이 과제를 구성하는 분야는 아래 표시한 것처럼 연결된다. 직접 얻은 계류시스템 자료에서 수개월에서 년 규모의 변동성을 파악하고 이를 해수면 고도계자료와 수치모형 결과를 이용하 여 수십년 규모까지 확장한다. 고기후자료를 분석하여 빙하기 간빙기 규모에서 순환계의 변동 성을 이해한다. 채수와 배양실험을 통해서 하위 생태계구조와 영양염 분포특성을 조사하고, 침강물 채집기에 얻은 시료를 분석하여 조사해역의 생지화학특성과 생태계 특성을 이해한다. 이 결과를 수온과 해류 변화 등 물리 특성과 연계하여 해석하여 물리적 변동성과 물질순환 간 관계를 이해한다. 수층구조와 혼합특성에 대한 연구는 물질의 분포와 변동성의 원인을 이 해하는데 사용된다.

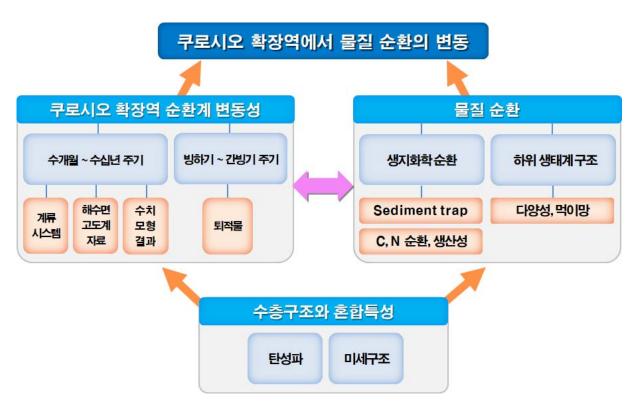


그림 1-2-2. 추진체계 (organization)

제2장 국내외 기술 개발 현황



제2장 국내외 기술 개발 현황

제1절 국내 현황

- 북서태평양, 적도태평양, 북동태평양을 대상으로 한 조사연구는 수행된 적이 있으나, 쿠로시오 확장역에 대한 조사연구는 수행된 적 없음
- O 이사부가 취항하면서 연구영역을 쿠로시오 확장역까지 확대할 기반이 조성되었음
- O 원내·외 연구사업을 진행하면서 심해계류기술을 포함하여 대양 연구 경험을 축적하고 원천기술을 확보하였음
- 북서태평양에서 하위 먹이망 구조, 장기 계류, 기초생산성 및 지화학적 대양 연구 경험 이 있음
- 북서태평양과 북동태평양에서 퇴적물 포집장치를 이용하여 침강입자를 획득하여 해양생 산성 및 침강입자 플럭스 변동연구를 수행한 바 있음
- O 하지만 쿠로시오 확장역에서 생태계, 해양 탄소 플럭스 등 생지화학적 연구는 매우 미미 한 실정임
- O 자료나 모델결과를 이용하여 쿠로시오 확장역의 물리적 (Na et al, 2016, Cheon et al 2013), 생지화학적 (Kwon et al, 2016) 변동에 대한 연구를 단편적으로만 진행하고 있음
- 국내의 탄성파 해양학 연구는 현재 시작 단계이며 초기 단계의 몇몇 연구가 수행되음. 한국해양과학기술원 연구진은 황해에서 탄성파 탐사를 수행하여 얻은 수층 반사파 신호를 이용하여 황해 저층 냉수의 분포를 영상화하는데 성공하였으며 J. Oceanography (Moon et al., 2017)에 논문을 게재하였으며 동해에서 내부 조석에 의한 수층 혼합 특성 파악을 위한 탄성파 해양학 연구를 수행 중임.
- O 하지만 아직 국내 연구진이 대양에서 탄성파 해양학을 이용하여 수층 구조를 연구를 수 행한 적은 없었으며 본 연구가 국내 연구진이 최초로 대양에서 수행한 탄성파 해양학 연구임.
- O 동해나 동중국해에서 해양 혼합에 대한 연구는 진행하여 관련 연구에 핵심기술은 확보 하고 있으나, 쿠로시오 확장역에서 관련 연구를 수행한 적은 없음
- 적도태평양 해역에서는 퇴적물 자료를 이용하여 고기후가 복원 연구가 진행되었으나(심 해퇴적물 고기후 지시자를 이용한 북태평양순환류 변동성 연구, 한국해양과학기술원, 2013-2015년, 연구책임자: 형기성), 쿠로시오 확장역은 나쁜 해황으로 온누리호 접근이 어려워 Shatsky 해저고원중부와 북부 해산의 시료를 얻지 못함

- O 쿠로시오-오야시오 경계역 인근에서 기후모형을 통한 빙하기 동안 북태평양중층수 형성 에 관한 모의가 이루어진 바 있으나(Kim and Park, 2008), 아열대-아한대 경계역에 관한 실제 관측은 없었음
- O 북태평양순환계의 남하로 하와이부근 퇴적물에서 복원한 계절특성을 설명할 수 있음을 제시하였으나(Lee and Park, 2003), 쿠로시오 확장역에 대한 연구는 없음

제2절 국외 현황

- 대규모 계류 관측인 미-일 국제 공동 조사 Kuroshio Extension System Study (KESS)가 2004-2006년 기간 동안 수행되어 획득된 시계열 자료로 인해 쿠로시오 확장역 변동성에 대한 연구가 진일보하였음
- 미국 NOAA PMEL과 일본 JAMSTEC은 북서태평양의 두 정점(KEO, JKEO stations)에 부이(buoy)를 설치하여 실시간으로 대기-해양 이산화탄소 분압을 모니터링 하고 있음
- O 쿠로시오-오야시오 확장역에서 해양 탄소 플럭스 연구는 일본연구자들에 의해 수행된 바 있으나(Yamada et al., 2012), 경계역의 장주기 변동에 따른 해양 탄소 플럭스 변동과 그 조절인자 규명에 대한 연구는 부족한 실정임
- O 오야시오는 염분 및 수온이 낮고 영양염류의 농도와 플랑크톤의 일차생산력이 높은데, 이는 정어리나 멸치와 같은 중요한 수산자원의 먹이가 되는 동물플랑크톤의 생물량 증 가로 이어지는 것이 밝혀졌음
- 일본 연구자들은 북서태평양 아열대해역과 아한대해역의 생태계 구조 및 기능을 비교하기 위해 동경 155°를 따라 남북으로 위치한 정점에서 식물플랑크톤 생물량 및 일차생산력, 질소고정속도를 측정하여, 생물량과 생산력은 아한대해역에서, 질소고정속도는 아열대해역에서 높은 것으로 보고함
- 동경 155 ~ 165°에 남북으로 위치한 정점에서 미생물 군집을 비교하여, 두 해역에서 활발하게 성장하는 미생물의 계통이 달라, 유기물 플럭스에 차이가 날 수 있음을 발견함
- O 동경 155°를 따라 남북으로 위치한 정점에서 침강입자 내 종속 영양세균의 생산속도를 측정하였음. 아한대 해역에서 높은 침강속도, 낮은 생산속도가 관측되었음(Yamada et al., 2012). 이는 수온과 같은 해황이 북서태평양 탄소 플럭스에 미치는 영향이 크다는 것을 의미함
- O 3-D 해양생태모델을 이용하여 지구 온난화가 북서태평양 spring bloom에 미치는 잠재적 영향에 대한 규명을 시도함(Hashioka et al., 2011). 이산화탄소가 두 배 상승할 때, 봄철 bloom 시기는 산업화 이전에 비해 10-20일 빨라지고, 식물플랑크톤 생물량은 아한대해 역에서 20-40% 감소하는 반면, 쿠로시오 확장역에서 20-40% 증가할 것이라 예상하였음
- O 미국 NASA에서는 2022년 PACE 위성을 발사하여 export production을 연구하기 위한 EXPORTS (EXport Processes in the Ocean from RemoTe Sensing) 프로그램 계획
- O 과거 Ocean Drilling Program (ODP) Leg 198 에서 Shatsky 해저고원의 정상부 및 사면에서 시추를 완료하였으나, 해당 시료는 주로 Shatsky 해저고원의 형성 기작 또는 해저고원의 형성과 후기 백악기의 해양 무산소사건 (Oceanic Anoxic Events; OAE)과의 상호연관성을 규명하는 연구에 이용되고 있음(Sager and Han, 1993; Dumitrescu & Brassell, 2006)
- O Shatsky 해저고원에서 진행되고 있는 빙하기-간빙기 규모의 기후변화와 해양환경 상관성 연구는 일본에서 자체적으로 획득한 주상시료를 이용해 진행되었으며, 빙하기에 아한대

순환류가 남하하고 아열대순환류가 축소된 증거를 지화학 지시자로서 제시하였고(Harada et al., 2004) 이러한 영향이 쿠로시오 확장역의 생산성을 증가시켰을 가능성을 제안함 (Amo and Minagawa, 2003)

- O 해당 지역에서 ODP, IODP 등 국제 지각시추프로그램을 두 번 시도했으나 모두 샤츠키 해저고원의 분출과 그에 따른 기후변화 등에 집중되었고, 해당 지역의 고기후적 중요성 에 비해 진행된 연구가 매우 적음(Shipboard Scientific Party, 2002; Expedition 324 scientists, 2010). 따라서 본 연구과제는 신생대 제 4기 동안 쿠로시오확장역의 변화에 집중한 참신 한 연구결과를 도출하리라 기대됨.
- O Holbrook et al. (2003)이 최초로 탄성파 탐사 자료를 이용하여 북태평양 수층을 영상화 한 이후 탄성파 해양학 (Seismic Oceanography)이 해양 모니터링 기술 중 하나로 발전하 고 있음.
- O 이 후 태평양, 대서양, 남극해 지중해 등 세계 각지에서 수층의 분포와 형태를 가시화하 고 혼합 특성을 규명하는 연구가 수행되고 있음 (Sheen et al., 2012; Carniel et al., 2012; Fortin et al., 2017).
- 쿠로시오 해류가 분포하는 해역에서도 탄성파 해양학을 적용한 연구가 2000년대 후반부 터 수행되기 시작하였음 (Nakamura et al., 2006).
- 최근에는 탄성파 해양학 자료를 이용한 단순한 자료 처리뿐만 아니라 탄성파 해양학에 적합한 자료 취득, 처리 및 해석 방법에 대한 연구도 수행 되는 등 (Sheen et al., 2009; Helen et al., 2013; Tang et al., 2016) 해양 관측의 한 분야로 자리 잡고 있음.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과





제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 연구해역 탐사

1. 현장 조사

한국해양과학기술원의 '쿠로시오 확장역 물질순환의 변동 특성 연구'사업에서는 쿠로시오 확장역의 순환계 변동성, 하위생태계 구조·생산성 및 생지화학 물질(C, N) 순환 특성 연구를 수행하기 위해 한국해양과학기술원의 종합해양연구선 이사부호 (R/V ISABU)를 이용하여 2017년과 2018년 2차년에 걸쳐 관측을 수행하였다. 각 연도별 탐사의 목적은, 2017년도에는 쿠로시오 확장역 물질순환 기초 자료 획득과 계류시스템 설치, 2018년도에는 쿠로시오 확장역 물질순환 이해를 위한 해양 생물군집 구조와 수층 화학특성 기초 자료 획득이다. 1~2차년도 연구목적을 달성하기 위해 계류시스템을 설치를 통한 변동성조사, 정점 별 생태계 생지화학 자료 획득 및 수층구조와 해양 혼합 특성 조사, 그리고 자이언트 피스톤 코어 퇴적물 시료를 획득을 통한 고기후 조사를 수행하였다.

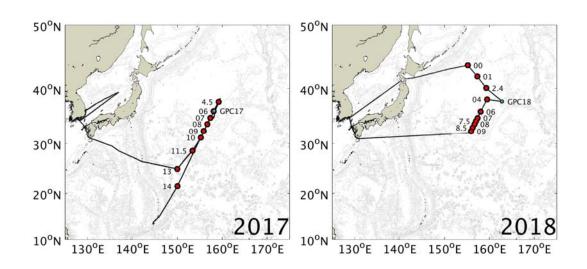


그림 3-1-1-1. 연도별 탐사 경로 및 정점.



표 3-1-1-1. 연도별 정점 위치 정보

	2017			2017 2018		
No.	정점	위도	경도	정점	위도	경도
1	04.5	37° 43.92'N	159° 11.40'E	00	43° 52.36'N	155° 09.53'E
2	06(SO)	36° 03.86'N	158° 03.60'E	01	42° 03.00'N	157° 17.96'E
3	07	34° 50.76'N	157° 20.29'E	2.4	40° 06.27'N	159° 17.46'E
4	08	33° 41.89'N	156° 39.68'E	04	38° 09.10'N	159° 28.97'E
5	09	32° 23.35'N	155° 52.16'E	06	35° 58.08'N	158° 02.35'E
6	10	31° 10.14'N	155° 14.41'E	07	34° 49.25'N	157° 19.52'E
7	11.5	28° 36.08'N	153° 21.30'E	7.5	34° 15.50'N	156° 59.60'E
8	13	25° 00.00'N	150° 00.00'E	08	33° 41.74'N	156° 39.68'E
9	14	21° 29.38'N	150° 00.34'E	8.5	33° 01.47'N	156° 16.85'E
10	GPC17	36° 07.64'N	158° 13.09'E	09	32° 21.20'N	155° 54.10'E
11	-	-	-	GPC18	37° 46.99'N	162° 46.50'E

표 3-1-1-2. 연도별 탐사 내용

	세부	내용
	2017	2018
기간	10. 17 ~ 11. 13 (총 28일)	07. 30 ~ 08. 20 (총 22일)
정점수	10	11
물리 관측	 쿠로시오 확장역 변동성 조사: Sediment trap 2개, 해류계 3대 이상으로 구성된 계류선과 PIES 설치. 정점 별 수층 특성조사: CTD, LADCP를 활용한 해수 물성 관측. 항행 중 수층 특성조사: UCTD와 SADCP를 활용한 해수 물성 직접 관측 중층 해류 특성 조사: ARGO float 투하 	 구로시오 확장역 변동성 조사: 2017년 설치한 계류선과 PIES 회수 후 재설치 정점 별 수층 특성조사: CTD, LADCP를 활용한 해수 물성 관측. 항행 중 수층 특성조사: UCTD와 SADCP를 활용한 해수 물성 직접 관측 표충 해류 특성 조사: Surface drift buoy 투하
해양 하위생태계	- 하위생태계 구조 및 먹이망 특성: 식물플랑 크톤-세균-동물플랑크톤 생물량 및 생산력, 안정동위원소를 이용한 먹이망 구조 특성 - 질소 및 탄소 순환 연구: 신생산, 질소고 정율 측정 및 FRRF 연속 측정을 통한 해역별 물질생산 특성 연구 - 생물다양성 연구: 세균, 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 다양성 특성을 DNA, RNA 및 형태적 특성을 이용하여 분석	- 하위생태계 구조 및 먹이망 특성: 식물플랑 크톤-세균-동물플랑크톤 생물량 및 생산력, 안정동위원소를 이용한 먹이망 구조 특성 - 질소 및 탄소 순환 연구: 신생산, 질소고 정율 측정 및 FRRF 연속 측정을 통한 해역별 물질생산 특성 연구 - 생물다양성 연구: 세균, 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 다양성 특성을 DNA, RNA 및 형태적 특성을 이용하여 분석
화학특성	- 용존 영양염시료 획득 및 분석 - 해수 내 부유물질 시료 획득 - 해수 내 입자성유기탄소 시료 획득 - 침강 입자 포집기(sediment trap) 계류	- 용존 영양염시료 획득 및 분석 - 해수 내 부유물질 및 입자성 유기탄소 시료 획득
고기후	 GPC, pilot core 각 1개, MC 5개, Grab 시료 1개 획득 Pilot core 및 GPC 일부구간 절개, 기재, 사진촬영, X-radiograph, XRF, 대자율 scanning 	- GPC와 MC 시료 각각 1개씩 획득
해양혼합 및 미세수층 구조	 수층구조 영상화를 위한 탄성파 탐사(약 132.3 km) 연직미세구조관측 장비(VMP500)을 이용하여 상층(약 0~400 m)의 난류 구조 직접 관측 	- 연직미세구조관측 장비(VMP500)을 이용 하여 상층(약 0~400 m)의 난류 구조 직 접 관측



표 3-1-1-3. 2017년 탐사 일정

2017: 10월 17일 ~ 11월 13일 (총 28일)

순번	일자 (UTC)	작업 내역
1	2017/10/17	광양항 출항
2	2017/10/19	태풍 "란" 영향으로 피항 (포항으로 이동)
3	2017/10/20	이동 항해 중 동해에서 장비테스트(Seismic Oceanography, CTD, UCTD)
4	2017/10/21	포항 입항, 급유 후 광양항으로 출항.
5	2017/10/22	광양항 입항 후 23일 재 출항
6	2017/10/27	13정점 도착, 작업(CTD, MOCNESS, 식물, 동물NET, 광학, VMP, MC) 수행
7	2017/10/28	13정점 작업 수행 후 이동
8	2017/10/30	11.5정점 도착, 작업(CTD, MOCNESS, 식물, 동물NET, 광학, VMP, MC) 수 행 후 이동
9	2017/10/31	10정점 도착, 작업(CTD, 식물, 동물NET, 광학, VMP, MC) 수행
10	2017/11/01	10정점 작업 수행 후 이동, 8정점 도착, 작업(VMP, CTD, 식물, 동물NET, MOCNESS, 계류, SO테스트) 수행
11	2017/11/02	10정점 작업 수행 후 GPC 작업 정점 이동, 작업(Line Survey, MC, GPC) 수행 후 이동
12	2017/11/03	06정점 도착, 작업(CTD, 식물, 동물NET, 광학, MOCNESS, VMP, Drifter, ARGO) 수행 후 이동
13	2017/11/04	04정점 도착, 악천후로 CTD대신 XCTD작업 수행 후 이동, 4.5정점 도착, 작업(CTD, VMP, MOCNESS, 식물NET, 광학) 수행 후 이동
14	2017/11/05	06C정점 도착, 작업(VMP, CTD, SO, XBT, XCTD) 수행
15	2017/11/06	06C정점 작업 수행 후 이동, 07정점 도착, 작업(CTD, VMP, 식물, 동물NET, 광학, PIES) 수행 후 이동, 이동 항해 중 UCTD 작업 수행
16	2017/11/07	UCTD 작업 수행 후 이동, 09정점 도착, 작업(VMP, CTD, 식물, 동물NET, 광학, MC, PIES) 수행
17	2017/11/08	09정점 작업 수행 후 이동, 이동 항해 중 UCTD 작업 및 XBT 수행.
18	2017/11/10	14정점 도착, 작업(VMP, 식물, 동물NET, 광학, CTD) 수행, 계획 정점작업 종료
19	2017/11/13	괌 도착. 항차종료, 하선



표 3-1-1-4. 2018년 탐사 일정

2018: 7월 30일 ~ 8월 20일 (총 22일)

순번	일자 (UTC)	작업 내역
1	2018/07/30	장목 출항
2	2018/08/03	00 정점 도착, 작업(CTD(Full), Net(식물,광학), CTD(200 m), VMP, MOCNESS, CTD(200 m)) 수행 후 이동
3	2018/08/04	01 정점 도착, 작업(CTD(Full), Net(식물,광학), CTD(200 m), VMP, MOCNESS) 수행 후 이동
4	2018/08/05	2.4 정점 도착, 작업(CTD(Full), Net(식물,광학), CTD(200 m), VMP, MOCNESS, CTD(200 m)) 수행 후 이동
5	2018/08/06	GPC18 정점 도착, 작업(XBT(T-5), Line survey, MC, CTD(Full), Net(식물), VMP, GPC) 수행 후 이동
6	2018/08/07	04 정점 도착, 작업(CTD(Full), Net(식물,광학), CTD(200 m), VMP, MOCNESS, CTD(200 m)) 수행 후 이동
7	2018/08/08	05 정점 도착, XCTD 수행 후 이동, 06 정점 도착, 작업(CTD(Full), Net(식물, 광학), CTD(200 m), VMP, MOCNESS) 수행 후 이동
8	2018/08/09	07 정점 도착, 작업(CTD(Full), Drifter(2기), PIES-R(회수), PIES-D(투하), VMP, CTD(Full), Net(식물,광학), CTD(200 m), MOCNESS) 수행 후 이동
9	2018/08/10	08 정점 도착, 작업(Mooring-R(회수), CTD(Full), Net(식물,광학), CTD(200 m), VMP, MOCNESS, CTD(200 m), Mooring-D(투하)) 수행
10	2018/08/11	08 작업(Mooring-D(투하)) 수행 후 이동
11	2018/08/12	08.5 정점 도착, 작업(VMP, PIES-D(투하), CTD(Full), Drifter(3기)) 수행 후 이동
12	2018/08/13	7.5 정점 도착, 작업(PIES-D(투하), CTD(Full), VMP) 수행 후 이동
13	2018/08/14	09 정점 도착, 작업(UCTD(4회), CTD, PIES-R(회수), PIES-D(투하), CTD(Full), Net(광학,식물), CTD(200 m), MOCNESS, VMP, Drifter(2기)) 수행 후 이동
14	2018/08/20	장목 입항

2. 계류 시스템

가. 장기 계류 시스템 및 설치

쿠로시오 확장역에서 해류와 해저지형의 작용에 의한 생태계, 물질 순환 등의 해양 환경이 변화가 심한 Shatsky rise에서 장기 해류와 침강탄소 플릭스 변동을 이해하기 위하여 Shatsky rise의 서쪽 해역 위도 33°43.20′N, 경도 156°33.54′E의 수심 5650 m에 심해에 적합한 "I" 형 태로 2017년 11월 2일에 장기 유속 관측을 위한 계류 시스템을 설치하였다. 계류 시스템은 수심 630 m에 75 kHz ADCP를 상향으로 설치하여 수심 600 m부터 16 m 간격으로 표층 근처까

지의 해류를 관측하고, 단층 유속계는 침강입자 플럭스 채집기(sediment trap)가 설치된 914 m 와 4,030 m 각각의 10 m 하층과 수심 2,060 m에 총 3대를 설치하였다. 해류는 30분 간격으로 관측하였고, 침강입자 플럭스 채집기는 주요시기에 따라 한 달 또는 10일 간격으로 입자 퇴적 물을 획득하도록 설정하여 설치하였다. PIES(Pressure Inverted Echo Sounder)의 기준 유속과 PIES에 설치된 유속계와의 자료 비교를 위해 해저 150 m 위에 300 kHz ADCP를 하향으로 하 여 바닥층의 유속을, ADCP의 하단 50 m 아래에 수온·염분 관측 장비인 Sea-Bird사의 37IM을 계류선에 부착하여 10분 간격으로 수온과 염분을 관측하였다. 관측을 마친 후에는 계류선에 부착된 모든 장비를 안전하게 회수하기 위하여 미국 Benthos사의 심해용(12,000 m) 음파분리기 (AR-865 : Acoustic Release Transponder) 2대를 계류선 최하단에 병렬로 부착하였다(Fig. 3-1-2-1, Table 3-1-2-1). 계류에 사용된 계류선은 6.8-8 mm의 와이어 로프와 10 mm SuperMax 로프 를 혼합하여 사용하였다. 해류가 강하여 계류선의 회전성이 커질 수 있는 수심층과 체적이 커 밀림(Drag) 계수가 높아지는 관측 장비가 설치된 수심층에는 계류선 꼬임에 의한 절단 위험성 을 최소화하기 위해 SuperMax 로프를, 유속이 약하거나 관측 장비가 설치되지 않은 수심층에 는 6.5-8.0 mm 와이어 로프를 사용하였다. 계류 시스템 연결부에 사용되는 강철 재질의 슬링링 (sling ring), 샤클(shackle), 체인(chain)은 용융 도금하여 해수에 의해 부식되어 계류선이 절단되 는 것을 방지하였다. 그리고 어느 부분이 절단되더라도 장비가 가라앉지 않고 직립 상태를 유 지할 수 있도록 25.4 kg의 부력을 가지는 17" 유리 부이 45개를 고루 배치하였다. 최상부와 최하층부에는 5톤용 스위블(swivel)을, 계류선 중간 부분에 유속 관측 장비가 연결되는 위치에 는 3톤 스위블을 사용하여 계류선의 꼬임 현상을 방지하였다.

계류 설치 작업은 2017년 11월 2일 9시에 시작하여 3시간 동안 작업을 실시하여 12시에 종료되었다. 설치 계획은 목표 위치(5,485 m)에서 남서쪽으로 3.5 km 떨어진 거리에서 1~2 km/h의 속도로 북동쪽으로 이동하면서 목표 수심에 계류 시스템을 설치하려고 하였으나, 계류 작업 초기 해양 환경(바람과 해류)에 따른 선박의 진행 방향을 잘못 설정하면서 계획된 위치로 이동하지 못하고 북서 방향으로 이동하면서 계류 작업을 진행하였다(Fig. 3-1-1-2). 계획했던 수심보다 160 m 가량 깊은 수심 5,650 m에 계류 시스템이 위치하게 되었고, 장비들의 설정 수심 오차를 최소화하기 위해 계류선 하단에 SuperMax 50 m를 추가하여 설치하였다.



표 3-1-2-1. 계류 시스템 관측 정점 및 정보

KUROSHIO EXTENSION: 5485 m, GMT: 2017/11/01 23:03 ~ 2018/08/10 02:18

LT: 2017/11/02 09:03 33° 41.604'N, 156° 34.879'E (5492 m) → 2017/11/02 12:14 33° 43.201'N, 156° 33.539'E (5580 m) 2018/08/10 02:16 33° 43.337'N, 156° 33.810'E (ENABLE 5452 m)

EQUIPMENT	S/N	MEASURING TIME (GMT)	DEPTH	SAMPLE INTERVAL / PROGRAM
75kHz ADCP	16911	2017/11/01 10:30 2018/08/10 00:00	620 m	30 min / 16 m
RCM-SEAGUARD	19	2017/10/29 05:00 2018/08/10 00:00	924 m	30 min / SD CARD
RCM-11	615	2017/10/29 04:00 2018/08/10 00:00	2,059 m	30 min / DSU2990E
RCM-SEAGUARD	180	2017/10/29 05:30 2018/08/10 00:00	4,040 m	30 min / SD CARD
300 kHz ADCP	16770	2017/11/01 09:00 2018/08/10 00:00	5,476 m	10 min / 4 m
SEABIRD-37IM	7127	2017/10/31 06:00 2018/08/10 00:00	5,528 m	10 min / SEATEAM V2
ACOUSTIC RELEASE	41085	2017/11/01 22:00 2018/08/10 02:16	5,530 m	RX:10.5 KHZ TX:12.0 KHZ ENABLE : H RELEASE : C
RELEASE 865A	51724	2017/11/01 22:00 2018/08/10 02:16	5,530 m	RX:10.50 KHZ TX:12.00 KHZ ENABLE : F RELEASE : G

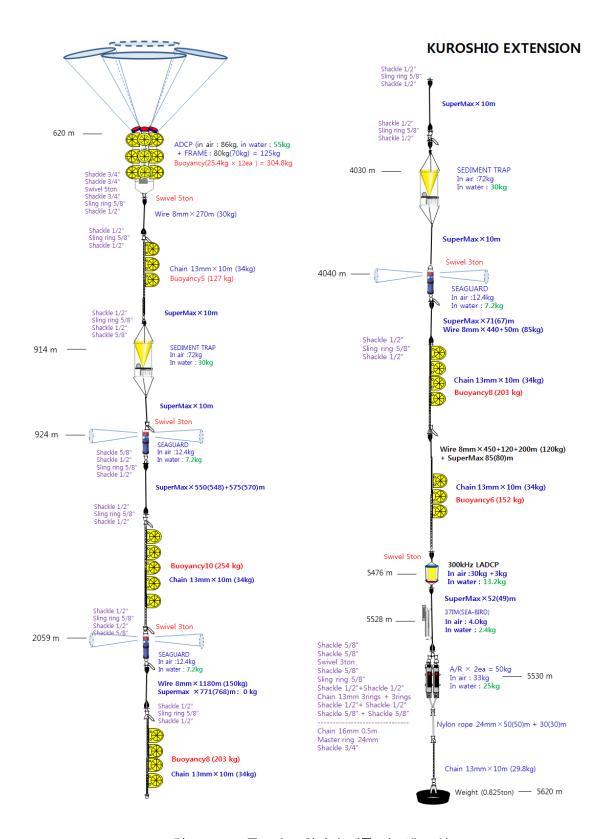


그림 3-1-2-1. 쿠로시오 확장역 계류 시스템 모식도

나. 계류 시스템 회수와 재설치

계류 시스템 회수는 2018년 8월 10일 11시에 계류 시스템 투하 정점 주변 위도 33°43.20´N, 경도 156°33.55′E에서 계류 시스템에 설치된 음향분리기와 선박의 하이드로폰(hydrophone)과의 통신을 통해 계류 시스템 존재 유무와 선박과의 거리를 확인하였다. 데크유닛(deck unit)에 표 시된 음향분리기와 선박의 거리는 5495 m로 선박 주변 반경에 계류 시스템이 위치하여 상승 시 선박과의 충돌 위험성이 높아, 북동쪽으로 600 m 가량 이동 후 위도 33°43.40'N, 경도 156°33.87'E에서 음향분리기에 분리 신호를 주어 무게추와 계류 시스템을 분리하였다. 계류 시 스템의 부양 속도는 0.6 m/s로 천천히 상승하여, 20분 후 75 kHz ADCP가 설치된 최상부를 발 견하였다. 계류선의 위치를 확인하기 위하여 900 m에 설치된 부이들이 부양하기를 기다렸지만 올라오지 않아. 계류선이 선박에 걸리지 않도록 천천히 접근하여 회수 작업을 실시하였다 (Tabel 3-1-2-2). 선박은 바람 방향을 따라서 계류선이 일자 형태로 펴질 수 있도록 4시간동안 동쪽으로 5 km를 이동하면서 상층부터 순차적으로 장비와 계류선을 회수하였다. 일반적으로 계류 시스템 설계 시 부력부는 계류선과 장비 무게를 고려하여 관측 장비들이 표층으로 부양 하도록 설계하지만, 이번 회수 시에는 최상층 75 kHz ADCP의 부력부만 표층으로 부양하였다. 주요 계류선으로 사용된 SuperMax 로프를 중성부력으로 계산하였지만, 실제 해양에서 음의 부력을 가졌고, 4,000 m 이하에 부착된 17" 유리 부이들 중 5개(127 kg)가 깨지면서 계류 시 스템의 부력이 약해졌다. 그리하여 하층 회수 시에는 부력이 부족하여 계류선에 장력이 있는 상태로 회수 작업을 수행하며 모든 장비를 회수하였다.

2018년 8월 10일 회수된 관측 장비는 2일간 자료 다운로드와 유지보수 기간을 걸쳐 해류 관측 장비들과 침강입자 플럭스 채집기를 2017년 설치된 수심과 최대한 같도록 목표 수심 5500 m ~ 5550 m로 정하여 계류 재설치 위치를 설정하였다. 회수 시 부족했던 부력은 계류 시 스템에 영향을 주지 않는 범위 내에서 17" 유리 부이를 2017년보다 상층에 5개(127 kg), 하 층에는 3개(76 kg)을 추가하여 부력 손실 시에도 문제가 생기지 않도록 하였다. 2017년 11월 3 일 계류 작업은 바람과 해류를 고려하여 선박이 밀리는 방향에서 3.5 km 정도 떨어진 지점에 서 선박이 계류선을 끌면서 계류선의 장력을 유지한 채 계류 작업을 수행하였지만, 2018년 8 월 12일 계류 설치 당일 해류와 바람이 강하여 선박이 계류선을 끄면서 가는 방식이 아닌 계 류선이 해류와 바람에 의해 밀리면서 꼬이지 않을 정도의 장력만을 유지한 채 선박의 이동 속도를 조절하면서 투하 위치에서 1 km 떨어진 위도 33°42.92'N, 경도 156°34.50'E에서 계류 설치 작업을 시작하였다(Fig. 3-1-2-2). 총 작업 시간은 2시간 40분 동안 4900 m의 계류선에 관측 장비들을 설치하여 위도 33°43.00'N, 경도 156°33.94'E 지점에서 무게추를 바닥으로 투하 하였다. 기상 상황과 시간 절약을 고려하여 삼각측량을 하지 않고 계류선과 선박이 밀리는 상 태에서 하이드로폰을 내려 음향분리기와의 거리를 측정하여 최종 계류 위치를 산출하였다. 계 류 설치 위치는 위도 33° 42.88'N, 경도 156° 34.75'E의 수심 5534 m로 계류 재설치 시작 지점 에서 동쪽으로 400 m 가량 떨어진 곳에 위치하게 되었다.

표 3-1-2-2. 계류 회수 작업 일정 및 항목.

TIME(UTC)	WORK	비고
2018/08/10 01:13	A/R ENABLE	33°43.2185'N 156°33.5821'E
		선박과 A/R과의 거리 5495 m
2018/08/10 02:16	A/R ENABLE	33°43.3377'N 156°33.8107'E 선박과 A/R과의 거리 5452 m
2019/09/10 02:16	A /D. DEL FACE	선박과 A/R과의 거리 5424 m
2018/08/10 02:16	A/R RELEASE	상승속도 : 0.6 m/s
2018/08/10 02:38	FINDING 75 kHz ADCP	2번째 부이가 표층에 떠오르지 않
		아 대기 후 회수 작업 시작
2018/08/10 03:30	ADCP on deck	
		회수 시 계류선의 흐름 방향을 확
2018/08/10 03:48	17" Glass buoy × 5 EA	인할 수 있는 2번째 부력부의 부
		력이 부족하였음.
2018/08/10 03:54	SEDIMENT TRAP	
2018/08/10 04:00	RCM S/N 19	RCM Seaguard S/N 19
2018/08/10 04:21	17" Glass buoy × 10 EA	
2018/08/10 04:28	RCM S/N 615	RCM 11 S/N 615
2018/08/10 04:53	17" Glass buoy × 8 EA	
2018/08/10 04:58	SEDIMENT TRAP	
2018/08/10 05:03	RCM S/N 180	RCM seaguard S/N 180
2018/08/10 05:17	17" Glass buoy × 8 EA	상층 3개의 부이 깨짐
2018/08/10 05:54	17" Glass buoy × 6 EA	상층 2~3 부이 깨짐
2018/08/10 05:54	300 kHz ADCP + 37IM	S/N 16770
2018/08/10 06:05	A/R	S/N 41085, S/N 51724

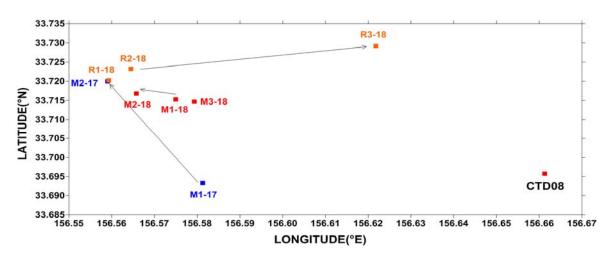


그림 3-1-2-2. 계류 설치와 회수 시 선박의 이동과 위치 (2017년 설치, 2018년 회수 및 재설치)

다. 침강입자 플럭스 채집기(Sediment Trap)

침강입자 플럭스 채집기는 해양 내부에서 만들어지거나 대기로부터 유입되는 입자들이 응 집되면서 비중이 커져 해저로 침강하는 입자들을 포집하는 장비이다. 빈영양 해역에서의 침강 탄소 플럭스가 해양에 미치는 영향과 수층별 변동을 연구하기 위해 쿠로시오 확장역의 위도 33°43.20´N, 경도 156°33.54´E의 중층 900 m와 심층 4,000 m에 침강입자 플럭스 채집기를 설치 하였다. 침강입자 플럭스 채집기는 McLane사의 Mark78H-21을 사용하여 높이 120 cm와 직경 91 cm 깔때기를 통과한 침강입자를 21개의 500㎖ 플라스틱 병으로 획득하였다. 수집 기간은 21개로 구별하여 대기로부터 유입양이 많은 봄 황사철에는 10일 간격으로, 다른 기간은 30일 간격으로 채집기 하단에 위치한 모터를 사용하여 시료 병에 장착된 회전판을 돌려 기간을 구 별하여 수집하였다.

퇴적물 변화에 가장 큰 영향을 미치는 해류 영향을 고려하기 위해 침강입자 플럭스 채집기 하단 10 m에 단층 유속계를 설치하여 30분 간격으로 변화하는 유속을 관측하였다. 강한 해류 의 영향으로 채집기가 기울지 않도록 채집기가 설치되는 계류선 상단에는 200 kg 이상의 부 력을 주어 계류선이 최대한 기울지 않도록 하였다. 부력을 담당하는 17″ 유리 부이가 부착되 는 용융도금된 강철 체인에 의한 퇴적물 오염을 최소화하기 위해 채집기 상단에는 SuperMax 로프를 사용하였다. 그리고 채집기(높이 164 cm, 직경 91 cm)의 체적이 커 계류선 회전을 발생 할 수 있어 채집기와 계류선 연결부에는 3톤 스위블을 사용하여 계류선 꼬임에 의한 절단을 방지하였다.

침강입자 플럭스 채집기 2대는 2018년 8월 10일에 회수하여 9개월간 21개 기간으로 구별된 중층과 심층의 퇴적물 시료를 획득하였다. 획득된 시료는 밀봉한 상태로 보관이 되었고, 재설 치를 위해 붕산나트륨(sodium borate)로 중화된 약 5% 포르말린 용액을 넣은 21개의 시료 병 을 채집기에 장착하고 채집 기간을 설정하였다. 장비의 배터리 교체 및 유지 보수 후 2018년 8월 12일 계류 시스템의 중층 수심 900 m와 저층 수심 4,000 m에 설치되었다.

라. PIES(Pressure Inverted Echo Sounder)

PIES는 정밀하게 제작된 직경 17" 유리 반구를 합친 것으로 상부에는 12 kHz 음파 송수신 기가, 하단 유리 반구에는 PIES의 시스템, 배터리, 음향 분리모듈이 부착된다. 두 반구를 합쳐 누수가 발생하지 않도록 내부진공 상태를 유지하도록 PIES를 밀봉해 주어야 한다. 설치 전 관 측 간격과 관측 수심에 따라 음파 간섭이 생기지 않도록 lock out 시간과 음파 강도를 설정하 여 강철 스탠드에 분리모듈을 고정하여 관측 정점에 투하하여 해저 바닥에 설치한다. PIES의 자체 부력은 18kg 정도로 하강 시 스탠드 상단에 설치되어 스탠드가 뒤집어지지 않고 바닥에 안착하는 역할과 회수 시 자체 부력으로 표층까지 떠오르게 한다. 해저 유속이 강한 경우 스 탠드가 넘어지는 경우가 있어 스탠드 하단의 무게를 추가하여 넘어지지 않도록 하고, 관측 정

점의 해저 경사가 클 경우 안착 시 스탠드가 넘어지는 경우가 발생하여 평탄한 위치를 선택하여야 한다.

PIES는 해저 바닥에 설치되어 바닥의 수압(bottom pressure : Pbot)과 해저에서 표층까지 12 kHz의 음파 도달 시간(travel time : τ)을 측정한다. 고정 위치에서 관측된 Pbot는 위성에서 관측한 SSH와 비교·검증하는 자료로 사용되고, 관측된 음파 도달 시간 τ 는 과거 해당 해역에서 얻어진 수온/염분 물성자료를 이용하여 τ 에 따른 물성분포표(GEM, Gravest Empirical Model)를 만든 후 관측 기간 동안의 연직 수온과 염분의 시간변동을 역산하여 해류의 흐름을 추정한다.

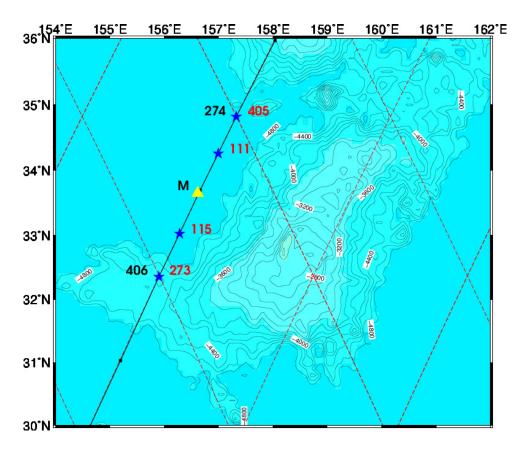


그림 3-1-2-3. Pressure Inverted Echo Sounder 관측 정점.

2017년 11월 6일과 7일, 계류 시스템을 기준으로 위성 Jason Track을 따라 남북 140 km 간격으로 위도 34°50.77′N, 경도 157°20.30′E의 수심 5,126 m 정점에 PIES(S/N 274)와 위도 32°23.32′N, 경도 155°52.10′E의 수심 4,553 m에 PIES의 상부 50 m에 단층 유속 관측 장비가 연결된 C-PIES(S/N 406)를 설치하여 10분 간격으로 Pbot와 τ 을 관측하였다(Fig. 3-1-2-3, Table 3-1-2-3). 음파 도달 시간 측정은 10분 기준으로 15~16초 간격으로 4회 관측하여 평균된 τ 를 구한다. PIES 설치 정점에서는 설치 후와 회수 전 τ 에 따른 물성분포표의 기준을 구하기 위해 전체 수심에 대한 CTD 관측을 하였고 PIES 장비의 관측 시간 지연을 구하기 위해 회수

전 TRAX4 프로그램을 사용하여 12 kHz의 음향 신호를 관측하였다. CTD 관측과 관측 시간 틀어짐 확인 후 각 PIES의 음향 분리 모듈에 RELEAS 분리 신호를 주어 TRAX4 프로그램을 이용하여 PIES의 움직임을 확인하고 위치를 추적하여 표층에 부상할 시간과 위치를 계산하여 주변 해역을 수색하면서 PIES를 회수 하였다. PIES에는 라디오 비콘과 라이트가 설치되어 있 어 일정 범위 내에서는 수색이 가능하지만, 해황이 좋지 않거나 표층 부상 예상 시간과 위치 를 잘못 계산할 경우 PIES를 찾지 못하는 경우가 많다. 그리하여 PIES가 스탠드에서 분리되는 시간과 상승 속도를 정확하게 계산하는 것이 중요하다. 이번 회수 작업에서 PIES 2대 모두 선 박에서 크게 벗어나지 않는 범위에서 표층으로 부상하여 어렵지 않게 회수 할 수 있었다. 회 수가 된 PIES는 컴퓨터와 연결하여 RELEASE 모드를 정지 시키고 정확한 시간 틀어짐을 확 인하여야 한다. PIES(S/N 274)는 -46초, C-PIES(S/N 406)는 -89초의 시간 틀어짐이 있었다.

2018년 탐사에서는 중층 계류 시스템과 각 PIES의 중간 위치에 1대씩 추가하여 총 4대를 설치하여 정밀한 해양 변화를 관측하도록 하였다(Table 3-1-2-4). 2017년에 설치된 2대 중 1대 는 재사용하고 새로 가져온 C-PIES 3대를 사용하였다. 재사용되는 관측 장비 PIES(S/N 274)는 현장에서 PIES를 분리하여 배터리 교체와 음향 신호 강도 실험을 걸친 후 관측에 사용하였다. PIES 내부에서 관측하는 Pbot와 τ 는 10분 간격으로, C-PIES에 연결된 단층 유속계는 30분 간 격으로 관측을 하도록 설정하였다.

표 3-1-2-3. 2017년 PIES 설치 및 기기 정보.

Station Name	C07	C09
PIES Serial Num.	273	406
Measuring Variables	P_{bot} , τ	P _{bot} , τ, U
Location	34° 50.7140'N 157° 20.3687'E	32° 23.3646'N 155° 52.0430'E
Moored Depth	5,126 m	4,553 m
Surfaced Time (GMT)	2017/11/06 20:09	2017/11/07 23:16
Recovered Time(GMT)	2018/08/09 05:31	2018/08/14 08:53



표 3-1-2-4. 2018년 PIES 설치 및 기기 정보

Station Name	C07	C08.5
PIES Serial Num.	405	115
Measuring Variables	P _{bot} , τ, U	P _{bot} , τ, U
Location	34° 49.2948′N	33° 01.4700′N
	157° 19.6059′E	156° 16.8540′E
Moored Depth	5,145 m	5,126 m
Surfaced Time (GMT)	2018/08/09 10:08	2018/08/12 12:06
Recovered Time(GMT)	-	-
Station Name	C07.5	C09
PIES Serial Num.	111	273
Measuring Variables	P _{bot} , τ, U	P _{bot} , τ
Location	34° 15.5999′N	32° 23.3210′N
	157° 02.6870′E	155° 52.1015´E
Moored Depth	5,235 m	4,553 m
Surfaced Time (GMT)	2018/08/13 04:42	2018/08/14 10:20
Recovered Time(GMT)	-	-

제2절 쿠로시오 확장역 물리 특성 관측과 분석

1. 항행 중 표충 및 수충 특성조사

TSG (Thermosalinograph)는 항행 중 해수펌프를 통해 선박내로 공급되는 표층 부근 해수의 물성을 연속적으로 관측하는 Seabird사의 장비로, 정해진 시간에 따라 수온과 염분을 기록한 다. 항행 중 관측한 수온과 염분을 연도별 탐사 경로와 함께 나타내었다.

가. 수온

본 연구의 2차례에 걸친 항차에서는, 선박의 남북방향 이동 범위가 1,000 km 이상으로 다양 한 기후대를 지났으며 표층 수온에서는 계절별-위도별 특징이 뚜렷하게 잘 나타났다. 먼저 2017년에는 동해를 포함한 대한민국 근해에서는 20°C 전후의 수온이 관측되었지만, 남쪽의 외해로 나가서 13번 정점에 도달하기까지 위도가 낮아질수록 수온은 점차 증가하였다. 가장 북쪽에 위치한 정점 4.5에 도달하기까지 수온은 다시 점차 낮아져 대한민국 근해와 유사한 20°C 가량의 수온에 도달하였지만 정점 6, 9, 14가 위치한 남쪽으로 이동할수록 수온은 점차 증가하여 최종적으로 도달한 괌 부근해역에서는 30°C 가량의 수온이 관측되었다. 2018년에는 7월 말에 항해를 시작하였으며 대한민국 근해의 온도는 2017년도와 비교하였을 때 약 5°C 가 량 높다. 선박이 동해를 가로지르는 동안에도 수온은 약 25°C 전후의 분포를 보이지만 쓰가 루해협을 벗어나 오야시오 해류가 남하하는 북위 40도보다 북쪽으로 진행할수록 수온은 급격 하게 낮아진다. 첫 번째 관측 점인 정점 00에 도달하였을 때, 수온은 약 12℃로 관측기간 중 가장 낮다. 북위 40도보다 남쪽해역으로 갈수록 수온은 점차 증가하여 북위 32도 부근에 이르 렀을 때 수온은 약 30°C에 이르러 가장 높았다.

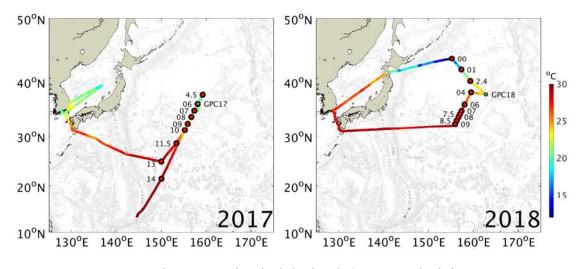


그림 3-2-1-1. 연도별 탐사 경로의 수온 분포 및 정점.



나. 염분

염분의 분포는 수온과 마찬가지로 지역인 요인과 계절적인 요인이 나타난다. 2017년과 2018년에는 대한민국 부근해역 특히 동해 남부해역에서 높은 수온과 함께 낮은 염분이 관측되었는데, 이는 가을과 여름철에 관측되는 대마난류 표층수에 의한 영향으로 보인다. Park (1979)와 Yang et al. (1991)에 따르면 대마난류 표층수는 20°C이상의 수온과 33.8이하의 염분의 범위로, 2개 항차에서 관측한 대한민국 부근 해역의 범위와 유사하다. 2017년에는 태평양에서 위도가 북으로 갈수록 낮아지는 수온과 함께 염분도 낮아졌다. 또한 2018년에도 쓰가루 해협에서 벗어나 태평양으로 진입 후 수온이 급격하게 낮아질 때 염분 또한 급격하게 낮아졌고, 남쪽으로 진행할수록 염분은 다시 증가하였다.

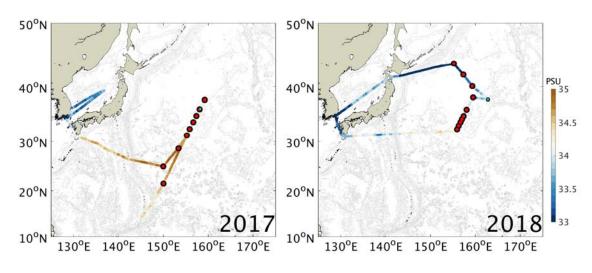


그림 3-2-1-2. 연도별 탐사 경로의 염분 분포 및 정점.

다. 유속 관측

SADCP(Ship-mounted Acoustic Doppler Current Profiler)는 선저에 부착된 음파유속계로 항해 중 지속적으로 해류를 관측한다. SADCP의 측정 주파수에 따라서 음파의 투과율 및 분해능이 달라지는데 고주파일수록 투과율이 줄어들어 측정 깊이가 줄어들지만 분해능이 증가하여 더세밀하고 정확한 유속을 측정 할 수 있다. 이사부호에는 150kHz와 38kHz의 SADCP가 설치되어 있으나, 두 번의 탐사 중 기계적인 결함으로 38kHz의 SADCP관측만이 이루어졌다. 이 관측을 통해 2017년에는 수심 46~1,500 m에 걸쳐 10분마다 수직적으로 24 m 간격의 자료를 얻었으며, 2018년에는 수심 39~1,500 m에 걸쳐 10분마다 수직적으로 16 m 간격의 자료를 얻었다. 항해 중 관측한 유속을 연도별 탐사경로와 함께 나타내었다.

2017년과 2018년 두해 모두 일본 남동쪽과 쿠로시오 확장역에서 상층에 약 1 m/s의 강한 흐름을 갖는 쿠로시오해류가 잘 관측되었다. 2018년에는 일본 동쪽에서 동쪽으로 갈수록 남북으로 해류의 방향이 변하는데 이는 쿠로시오의 사행에 의한 것이다. 일본 남동쪽에서 쿠로시

오의 해류의 세기는 2018년이 2017년보다 강하게 관측된다. 이는 여름철의 쿠로시오 해류의 세기가 가을철의 해류의 세기보다 크다는 기존연구결과(Sekine and Kutsuwada. 1994, Book et al. 2002)와 일치한다.

두연도 모두 표충부터 수심 약 1,500 m까지 같은 방향의 유속이 관측되었다. 하지만 SADCP 관측 수심이 관측정점보다 얕기 때문에 수충 전체에서 균질한 크기의 barotrophic해류가 흐르는지는 판단하기가 어렵다. 이러한 한계를 보완하기 위해 정점관측시 후에 언급할 Lowered-ADCP 관측을 실시하였다. 유속의 수직적인 속도차이는 물성혼합에 중요한 역할을 하는데 2018년이 2017년에 비해 전 해역에서 수직유속차이가 약하게 나타났다.

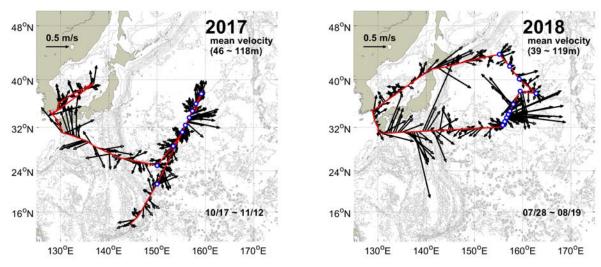


그림 3-2-1-3. 연도별 탐사경로의 상층 유속분포 및 정점.

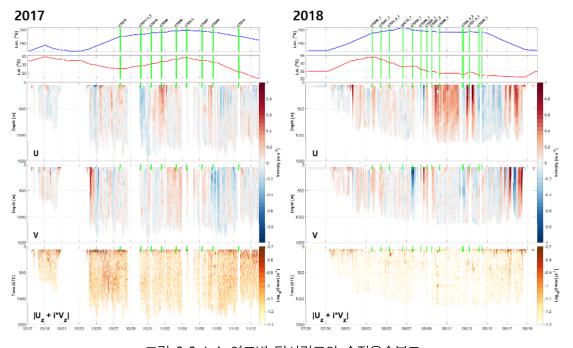


그림 3-2-1-4. 연도별 탐사경로의 수직유속분포.



2. 해류의 장기 변동 특성

가. 해류 분포

최상층에 위치한 75 kHz ADCP는 원래 계획했던 수심 510 m보다 110 m 가량 깊은 수심 620 m에 설치되었다. 해류에 의한 영향으로 평균 관측 수심은 633 m로 설치 수심보다 13 m 깊은 수심에서 ±13 m 범위에서 상하 이동을 하면서 해류를 관측하였다. 해류가 강한 시기 부력부와 계류선이 기울면서 순간적으로 최대 700 m까지 하강하여 관측을 하는 시기도 있었다. 계류선 중간에 연결된 단층 유속계도 계류선이 기울면서 관측 수심 변동이 있었다. 수심 924 m에 설치된 RCM 19는 설치 수심보다 13 m 깊은 수심에서 ±13 m 범위에서 해류를 관측하였고 해류가 강한 시기 최대 999 m까지 계류선이 기울어져 하강하여 관측하였다. 수심 2,059 m에 설치된 RCM 615의 평균 관측 수심은 2,066 m로 ±9 m 범위에서 최대 2,111 m까지, 4,040 m에 설치된 RCM 180은 ±3 m 범위에서 최대 4,067 m까지 기울면서 관측하였다. 최하층에서 유속을 관측한 300 kHz ADCP는 5,476 m에 설치되고 ±1.5 m 범위 내에서 유속을 관측하였으나, 부력부 파손과 강한 유속에 의한 계류선 위치 변동 등의 이유로 2018년 5월 11일 관측 수심이 16 m 정도 깊어지면서 수심 변동 오차가 커졌다. 각 시기별 ADCP에 기록된 수심을 기준하여 수심 변동에 의한 자료를 보정하여 1차 관측 자료를 생성하였고, 해류 관측 장비의 내부의 플럭스게이트 나침계(fluxgate compass)의 진북과 자북 오차에서 발생하는 -2.3°의 각도를 보정하여 최종적으로 관측 자료를 생성하였다.

쿠로시오 확장역의 해류는 난수성 아열대수와 북쪽의 냉수성 해수 사이에서 복잡하게 사행 (meandering)하면서 동쪽으로 빠르게 이동하는 특성을 보인다. 계류 관측 정점은 쿠로시오 확 장역 경로(Kuroshio Extension Path)에 위치하면서 동향하는 흐름이 주를 이루고, 경로의 중심 축에 있을 때는 상층에서 수심 200 m까지 100 ~ 180 cm/s의 강한 해류가 관측된다. 경로 축이 북상하여 축에서 벗어나 남쪽에 위치할 경우 서쪽으로 이동하는 소용돌이에 의해 서향하는 흐름이 존재하는데 이때 상층에서 수심 100 m까지 50 - 80 cm/s의 서향하는 흐름이 관측된다. 전체 시기 수심 72 m에서 수심 600 m까지는 균일한 해류 분포를 보이고 수심에 따라 해류 흐 름이 약해지지만 방향성의 변동은 적다(그림 3-2-2-1). 관측 시기 평균 유속은 상층 72 m에서 동서성분은 25.79 cm/s, 남북성분은 −20.59 cm/s로 수심 1 m에 ±0.3 cm/s 정도로 균질하게 감소 하여, 수심 600 m에서의 동서성분은 9.18 cm/s이고 남북성분은 -4.76 cm/s로 관측 수심 내에서 는 남동향하는 흐름이 주를 이룬다. 단층 유속계에서 관측한 중층 수심 937 m은 75 kHz ADCP에서 관측한 유속 분포와 달리 동서성분은 -3.95±7.44 cm/s, 남북성분은 3.98±6.93 cm/s로 북서향하는 흐름이 주를 이룬다. 최대 유속은 동서성분과 남북성분에서 ±30 cm/s 범위에서 분 포한다. 단층 유속계로 관측한 중층의 수심 2,066 m의 동서성분은 0.32±3.49 cm/s, 남북성분은 -0.64±3.26 cm/s이고, 하층의 수심 4,040 m의 동서성분은 0.14±2.62 cm/s, 남북성분은 -0.15±3.32 cm/s로 평균 유속 분포에서는 하층 유속이 중층 성분의 1/3 정도 약하게 분포한다. 일평균 분

포에서 중층과 하층의 유속 분포는 유사하지만(그림 3-2-2-2), 평균 유속에서는 큰 차이를 보 인다. 중층은 남동향하는 해류의 흐름이 약하지만 일정하게 존재하고, 하층에서는 일평균 이 상의 회전성 흐름이 존재하면서 약한 평균 유속이 관측된다(그림 3-2-2-3). 바닥 근처에서 관 측한 300 kHz ADCP의 동서성분은 0.23±4.30 cm/s, 남북성분 0.38±3.46 cm/s로 해저 지형을 따 라 북동향하는 약한 흐름이 일정하게 분포하면서 수심 4,040 m의 평균 유속보다 흐름이 강하 다(그림 3-2-2-4). 수심 2,066 m에서 바닥 근처까지 관측한 최대 유속 분포는 15 cm/s 내외로 큰 차이를 보이지 않지만, 평균 유속 분포의 차이는 각 수심별로 존재하는 약하지만 일정한 흐름에 의해 정해진다. 전 수심층에서 조석 성분 S_2 와 M_2 의 12시간과 12.42시간의 주기가 나 타나고, 준관성주기(near-inertial oscillations)범위의 18-24h 사이의 변동성이 강하게 나타나면서 일변화가 뚜렷하게 나타난다. 쿠로시오 확장역 축과 소용돌이 변화에 의한 영향을 많이 받는 상층에서는 3일 이상의 중규모 형태의 변동이 복잡하게 나타난다(그림 3-2-2-5).

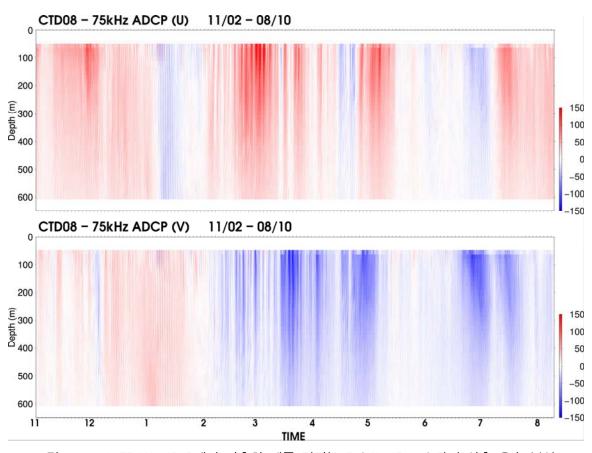


그림 3-2-2-1. 75 kHz ADCP에서 관측한 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)의 상층 유속 분석.



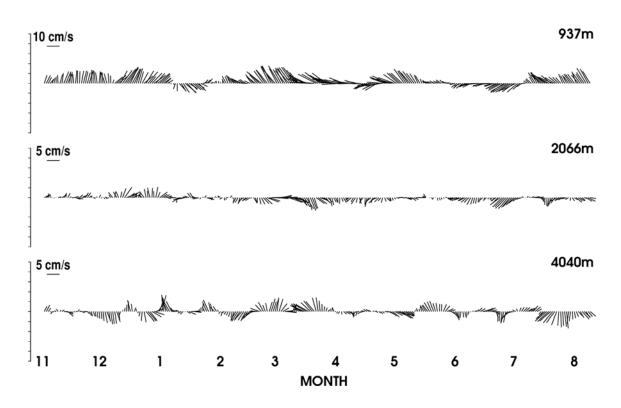


그림 3-2-2-2. 단층 유속계에서 관측한 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)의 900 m, 2,000 m, 44,000 m의 일평균 유속의 벡터 분포.

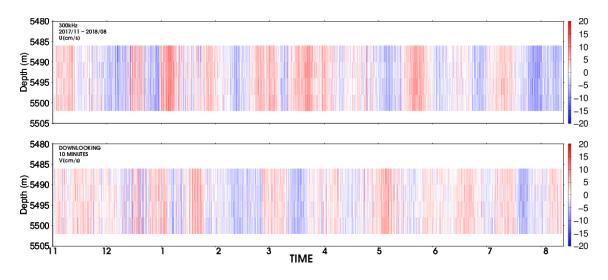
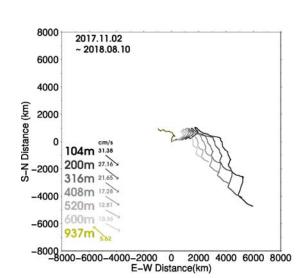


그림 3-2-2-3. 300 kHz ADCP에서 관측한 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)의 바닥 근처의 유속 분석.



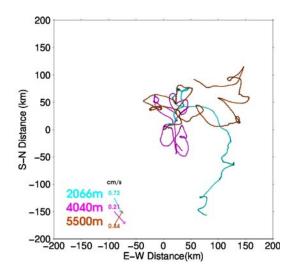


그림 3-2-2-4. 계류 정점에서 30분 간격으로 관측한 수층별 Progressive vector diagrams 분포.

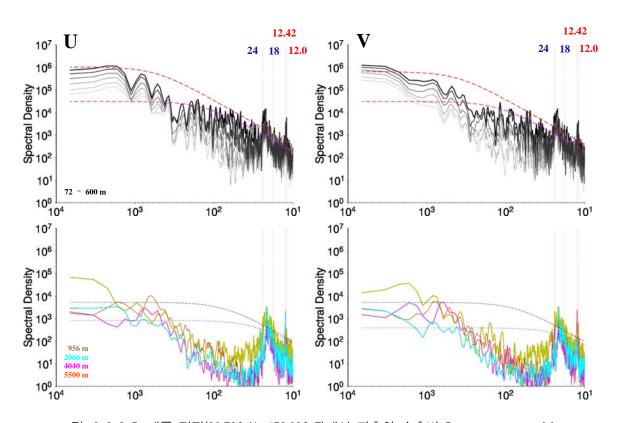


그림. 3-2-2-5. 계류 정점(33.72°N, 156.62°E)에서 관측한 수층별 Power spectrum 분포. 동서성분(왼쪽)과 남북성분(오른쪽)



나. PIES (Pressure Inverted Echo Sounder)를 이용한 변동성 관측

(1) PIES 자료처리

CO7, CO9 정점에서 2017년에 계류 2018년에 회수한 두 대의 PIES자료를 University of Rhode Island에서 제시하는 방법(Kennelly et al., 2007)을 적용하여 처리하였다. τ 는 조석, 기계 정밀도 감소 등에 영향을 받지 않기 때문에 10분 간격의 측정자료에서 뛰는값과 3일 이하의 단진동 운동을 제거한 후 12시간 간격의 자료를 얻었다. Pbot은 조석, 시간에 따른 센서 보정값 변화에 영향을 받아 처리과정에서 이 현상들에 의한 변화값을 제거해 주는 것이 중요하다. 보정값 변화에 의한 값은 조석에 의한 압력변화와 비교했을 때 상대적으로 매우 작아서 지역에서큰 영향을 미치는 일주기 조석(O1, K1)과 반일주기 조석(M2, S2)을 제거한 후 시간에 따른 보정값 변화현상을 제거한다. 보정값 이상을 제거 후에 조석에 의한 압력변화를 더 세밀하게 제거하기 위해서 전에 제거했던 조석값을 더한 후 다시 조석효과(O1, K1, Q1, P1, M2, K2, N2, S2)를 제거하였다. 이렇게 보정값과 조석에 의한 이상값을 처리한 후 τ 와 마찬가지로 3일 이하의 단진동 운동을 제거한후 12시간 간격의 자료를 얻었다. 조석의 영향이 적은 심해에서 바닥으로부터 50 m 떨어진 유속을 측정하는 C-PIES의 경우 τ 와 마찬가지로 조석에 의한 값변화가 적어 30분 간격의 측정자료에서 튀는값과 3일 이하의 단진동 운동을 제거한 후 12시간 간격의 자료를 얻었다.

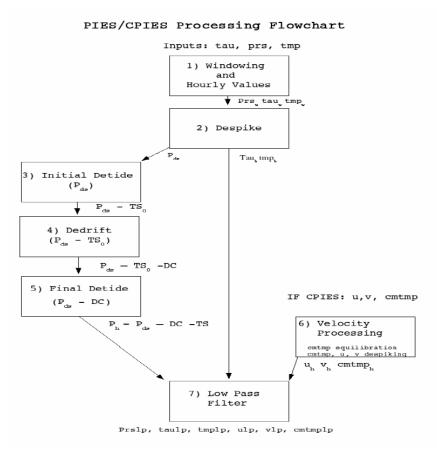


그림 3-2-2-6. PIES 자료처리 모식도 (Kennelly et al., 2007)

0,

(2) GEM 만들기

물성분포표(GEM)은 관측지역에서 τ 에 따른 수직 수온/염분 분포표로써 PIES에서 측정한 τ 을 온도 및 염분 프로파일로 전환하는데 사용하며, 과거에 얻은 수온/염분 프로파일을 이용하여 만든다. GEM을 만들기 위해 쿠로시오 확장역 남쪽 경계에 해당하는 경도 153-161℃ 위도 30-38°N에서 18년(2000-2018) 동안 관측된 EN4(Good et al. 2013) 프로파일 자료를 사용하였다. GEM이 설정구역을 잘 대편하기 위해서는 관측 프로파일이 일정시간, 일정 장소에서만 측정되지 않고 고르게 분포하여야한다. EN4 자료 중 해당 지역에서 18년 동안 총 9012개의 수직 수온/염분 프로파일러가 관측되었고 이중 수심 1800dbar를 넘는 6149개의 프로파일을 사용하였다. 이 프로파일들은 시공간적으로 고르게 분포하기 때문에 이 자료를 이용해 생성한 GEM이 이 지역을 τ 에 따른 수직 수온/염분 분포를 잘 대변한다. GEM을 만드는 과정에서 계절에 따른 상층의 수온/염분분포에 의한 오차를 줄이기 위해서 Donohue et al. (2010)의 방법을 따라 상층 200dbar에서의 계절성을 제외하고 GEM을 만들었다. 이렇게 얻어진 GEM에서 τ 가 높은 곳에서 수온/염분이 낮게 나타나며, 표층, 수온약층에 해당하는 6-16℃ 등온선 및 34 등염분선을 따라서 GEM의 오류값이 크게 나다난다.

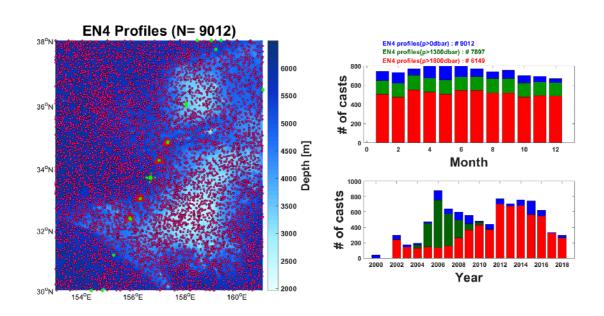


그림 3-2-2-7. EN4 프로파일의 시공간적 분포



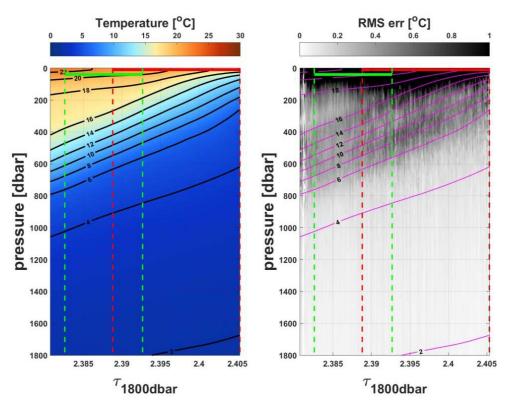


그림 3-2-2-8. 수온 물성분포표(Temperature GEM) 및 오차값. 초록, 빨강색 선은 각각 C09, C07에서 측정된 τ 의 범위를 나타낸다.

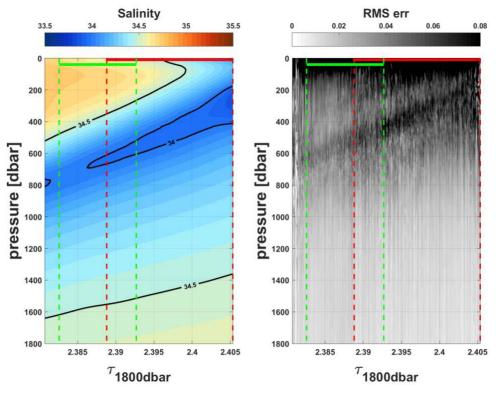
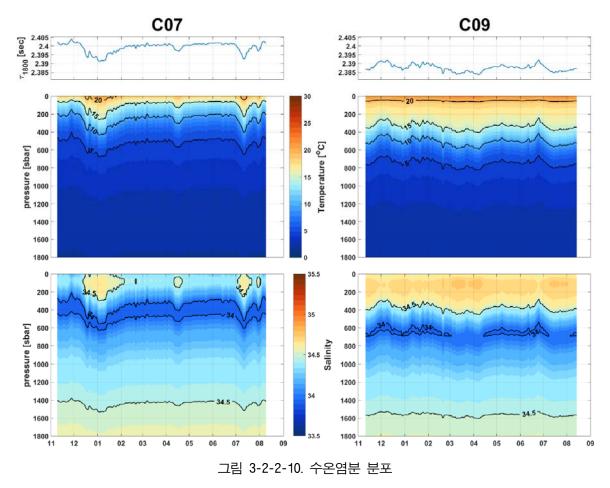


그림 3-2-2-9. 염분 물성분포표(Salinity GEM) 및 오차값. 초록, 빨강색 선은 각각 C09, C07에서 측정된 r의 범위

(3) 수직 수온/염분 분포

PIES에서 측정한 τ 를 GEM에 적용하여 시간에 따른 수직 수온/염분 분포를 얻었다. C07, C09 두 정점에서 단진동의 현상이 공통적으로 나타나고 북쪽에 위치한 C07정점이 남쪽에 위치한 C09정점보다 연중 표층의 온도가 낮고 수온약층의 깊이가 얕다. C07에서는 2018년 1월, 4월, 7월 상층 100dbar지역에 고온고염의 해수가 관측되었다. 2018년 1월부터 4월 동안 C07에서는 수온약층의 깊이가 얕아지고 C09에서는 수온약층의 깊이가 깊어진다. 즉 이 기간 동안에 두정점사이의 밀도차에 의한 프런트가 강화된다.



3. 수온 염분 분포 특성

가. 단면 분포 특성

쿠로시오 확장역에서 수평, 수직적인 해수의 특성을 이해하기 위해 2017년과 2018년에 각정점에서 SeaBird사 SBE 9+ CTD (Conductivity-Temperature Depth)를 이용한 관측을 수행하였다. 해당 관측에서 전 수심 층에 대한 위도 별 수온, 염분을 단면을 획득하였으며, 각 연도의수심 0~1,000 m에서의 연직 단면을 나타냈다.

먼저 2017년에는 쿠로시오 확장역에서 위도 북위 21.5도부터 37.5도 사이를 관측하였다. 정점 09와 정점 14사이 200~400 m 수심에는 아열대 모드수 (Subtropical Mode Water, STMW)의 특성을 가지는 해수가 존재한다. 성층이 약하고 수온 17°C-염분 34.8 의 특징은 Qui et al. (2006)에서 관측한 아열대 모드수의 범위와 일치한다. 또한 정점 09보다 북쪽 정점에서는 아열대 모드수에 해당하는 온도와 염분이 보다 얕은 수심으로 연결되어있다. 아열대 모드수보다 깊은 수심에서는 염분 최소층이 나타나는데, 정점 08보다 북쪽 정점에서는 300~500 m 사이, 남쪽의 정점에서는 500 m 보다 깊은 수심에 있다.

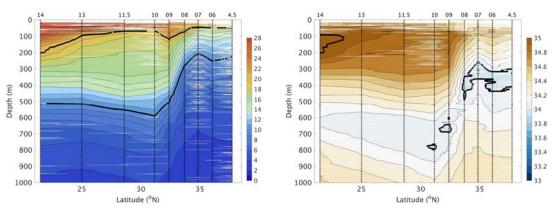


그림 3-2-3-1. 2017년 (1차년도) CTD로부터 획득한 수온(좌) 및 염분(우)의 관측 단면

2018년에는 위도의 범위가 북위 32도부터 44도로, 2017년 관측과 비교하였을 때 남쪽 영역은 줄어들고 북쪽 영역이 확대되었다. 정점 08과 09사이에서는 2017년 관측과 마찬가지로 아열대 모드수에 해당하는 수온과 염분의 분포가 200~300 m 수심에서 관측되었다. 정점 7에서는 등수온선과 등염분선이 다른 주변 정점과 비교하였을 때 더 얕은 수심에 존재한다. 해당정점의 현상은 2017년에도 유사하며, 지형적 요인 혹은 와류의 영향 등 다양하게 추측되지만더 다양한 자료로 분석할 필요가 있다. 정점 6에서 정점 0까지는 등수온과 등염분선이 북쪽을향해서 기울어진 형태다. 정점 0부근에서는 남쪽 정점과 비교하였을 때 수온의 성층이 약하고전 영역 중 염분이 가장 낮으며 전체 섹션에 걸쳐 염분이 관입하는 형태를 보인다.

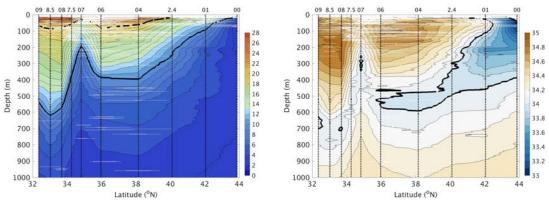


그림 3-2-3-2. 2018년 (2차년도) CTD로부터 획득한 수온(좌) 및 염분(우)의 관측 단면

0,

나. T-S diagram

앞선 단면 위치에서의 전체 수온-염분, 용존산소 자료를 이용하여 T-S diagram을 작성하였다. 용존 산소의 경우 CTD 장비의 SBE43로부터 획득한 자료를 사용하였다. 밀도 단면에도 잘 나타나듯이 관측을 수행한 해역에는 서로 다른 물리적 특성을 보이는 다양한 수괴 (water mass)들이 존재하며(Yasuda 2003; Yasuda 2004), 이는 2차례 관측 프로파일을 이용한 T-S diagram에서도 잘 나타난다.

일반적으로 각 프로파일에서 상층은 가장 낮은 밀도 나타내고 저층으로 갈수록 높은 밀도 의 특징을 보인다. 2018년의 남-북의 관측범위는 2017년보다 더 넓으며, 상층에서 수온의 범위는 유사하지만 염분의 범위가 2018년에 훨씬 크다. 하지만 최상층 밀도의 범위는 2017년에 21.5~24, 2018년에는 22~24.5으로 유사하다.

최상층 아래 구조에서, 2017년에는 밀도가 25.5보다 큰 경우 대부분의 정점에서 구조가 유사하다. 하지만 2018년에는 가장 북쪽에 위치한 00 정점은 상층뿐 아니라 중-저층에서도 다른 정점과는 확연히 구조가 다르다. 2017년과 2018년의 일부 정점에서는 앞서 단면에서 언급하였던 24.8-25.7 밀도 범위와 약 17℃ 수온 및 34.8 염분을 가지는 아열대 모드수 (Subtropical Mode Water, STMW)의 특징이 나타난다. 2018년의 북쪽에 위치한 00정점과 01정점을 제외한 나머지 모든 정점의 25.5보다 높은 밀도에서는 공통적인 수괴의 특징이 나타난다. 26.0-26.7 밀도 범위에는 중앙 모드수 (Central Mode Water, CMW), 밀도 26.8과 더불어 저염의 특징을 보이는 북태평양 중층수 (North Pacific Intermediate Water, NPIW), 1.2~2°C 수온과 낮은 산소가나타나는 북태평양 심층수 (North Pacific Deep Water, NPDW) 그리고 가장 저층에는 0.1-2°C의 수온과 34.62-34.73 염분 범위의 순환 심층수 (Circumpolar Deep Water CDW)의 특징도 관측되었다.

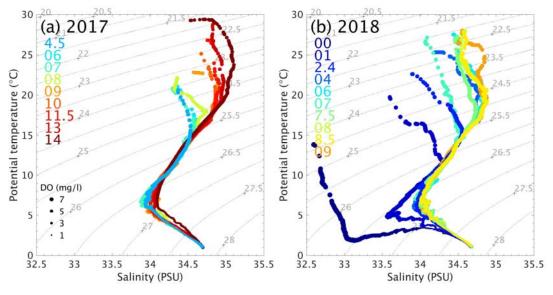


그림 3-2-3-3. (a) 2017년도와 (b) 2018년도 관측한 수온-염분 관계도



다. 중규모 수층구조 조사

쿠로시오 확장역 지역은 소용돌이 및 쿠로시오 사행으로 중규모 수층구조가 잘 발달한다. 2018년 관측 당시 이러한 중규모의 수평적 수층구조를 조사하기 위해서 UCTD (Underway Conductivity Temperature Depth) 관측을 실시하였다. UCTD는 선박 이동시 해수의 연직 물성을 관측하기 위한 장비이다. 추가적으로 운용하는 이동식 윈치를 사용하여 UCTD 센서 프로브를 낙하시키고 회수하기를 반복하여 연속적인 연직 단면을 획득할 수 있다.

정점 7.5에서 8.5로 이동 간 총 51번의 캐스팅을 수행, 자료를 획득하였다. UCTD 관측 중에는 선박의 속도를 약 5-7 knot 로 유지하며 센서 프로브를 수중으로 투하 후 약 4분간 낙하하여 약 400 m 까지 도달하도록 하였고, 이후 원치를 이용하여 약 10여분 후 해수면으로 회수하였다. UCTD은 정점관측에 사용하는 CTD와 다르게 pump가 없어 하강속도에 따라 센서를 통과하는 해수의 양이 다르다. 따라서 자료처리를 하는데 있어서 하강속도가 고려되어야하고, 이를 고려한 Ullman and Hebert(2014) 방법을 사용하여 UCTD 관측자료를 처리하였다.

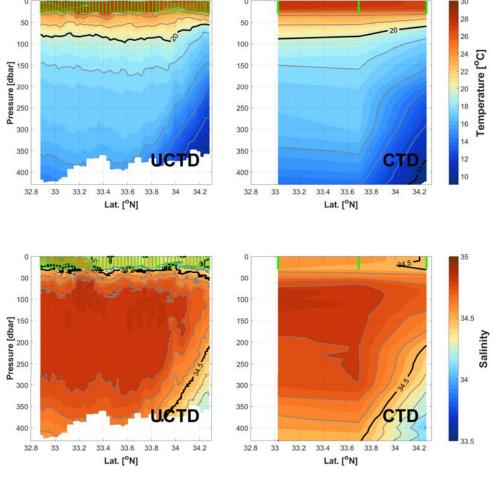


그림 3-2-3-4. UCTD(좌)와 CTD(우) 온도(상) 및 염분(하) 자료비교.

UCTD관측과 전통적인 정점관측을 비교해보면 UCTD가 CTD에 비해 중규모의 현상을 잘보여준다. UCTD 등온선과 등염분선에서 소규모의 진동이 나타나는데 이는 기존의 정점관측에서는 알 수 없었던 소중규모의 변동 때문이다. 20℃ 이상의 등온선이 파형의 형태를 갖지만, CTD관측에서는 등온선이 직선의 형태이다. 이는 기존의 관측이 중규모의 물리현상을 관측하지 못하기 때문이다. 34~34.2°N 약 150 m~400 m 수심에서 수온과 염분의 프런트 두 관측방법에서 나타난다. UCTD 염분분포를 보면 34.5 이상의 고염의 물이 수괴의 형태로 모여 있는 것이 관측되었고 이러한 두 수괴의 경계에서 프런트가 생성되었다. 정점관측은 정점간의시간차이가 많이 나더라도 연속적이라고 가정을 하는데 UCTD는 배가 이동하면서 연속적으로 관측을 함으로 이러한 문제를 해결할 수 있다. 기존관측에서 관측되지 않는 25 m 염분경계층이 UCTD 관측에서 나타나는 것이 그 증거이다.

라. LADCP (Lowered Acoustic Doppler Currents Profiler)

쿠로시오 확장역 수직유속분포를 이해하기 위해 2017년과 2018년에 각 정점에서 CTD frame 에 ADCP를 장착하여 CTD관측과 동시에 LADCP관측을 수행하였다. 전 수층 CTD관측과 함께 고주파수의 ADCP관측을 시행함으로써 전수심에 걸친 고해상도의 유속자료를 측정하였다. 두해 모두 전 정점에서 LADCP관측을 실시하였으나, 2017년에는 CTD frame의 용적이 크고 무게가 가벼워 대부분의 정점에서 CTD frame의 평균 기울기가 10°이상이고 기울기의 변화평균이 5°이상이여서 LADCP의 자료가 좋지 못하였다(그림 3-2-3-15). 2018년에는 전해의 문제를 계선하기 위해 CTD frame을 36개의 채수병이 달리는 것에서 24개의 채수병이 달리는 것으로 교체하였고, 추가로 제작한 무게추를 frame에 장착하였다. 그 결과 모든 정점에서 frame의 기울기가 5°이하이고 기울기의 변화도 2017년과 비교하여 매우 줄어들었다. 2018년에 관측을 통해얻은 자료는 Thurnherr (2010)방법을 이용하여 전층에 걸친 2 m간격의 유속을 계산하였다.

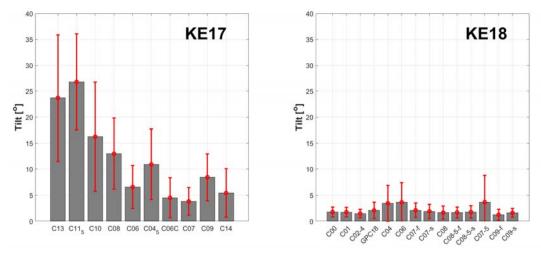


그림 3-2-3-5. 정점별 CTD frame의 평균 기울기 및 표준편차 (좌) 2017년 (우) 2018년

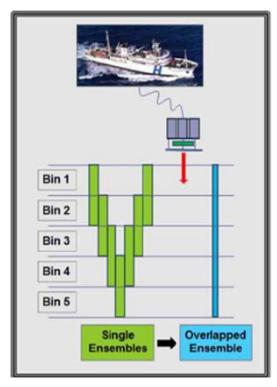


그림 3-2-3-6. LADCP 자료처리 모식도.





그림 3-2-3-7. 2017년 LADCP 운용모습(좌). 2018년 LADCP 운용모습(우).

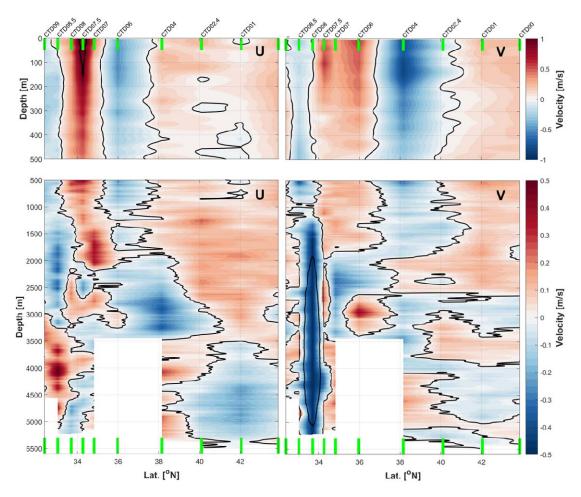


그림 3-2-3-8. 2018년 LADCP로부터 획득한 유속 관측단면, (좌)동서유속 (우)남북유속

2018년에는 넓은 공간에서 장기간의 관측일정으로 처음 정점과 마지막 정점간의 시공간차이가 20일/1,000 km 이상 났으며 관측당시 날씨 때문에 관측이 순차적으로 수행되지 못했다. 유속은 물성보다 시공간적으로 단주기의 변동을 많이 포함 하고 있기 때문에 2018년에 얻은 LADCP 유속단면도로는 CTD 물성단면도와는 다르게 수직공간분포를 해석하는데 한계가 있다. 동서유속분포에서 CTD07.5정점을 기준으로 약 1 m/s의 강한 동북향류가 흐르는데 이는 SADCP와 비교해 보았을 때 쿠로시오해류임을 알 수 있다. 쿠로시오 해류는 수심이 깊어질수록 약해지지만 약 2,000 m까지 0.5 m/s로 깊고 강하게 흐른다. CTD08정점 약 1,500~5,000 m에서 0.5 m/s이상의 남향류가 관측되었는데 관측유속의 오차값이 관측값보다 크게 나오기 때문에 실제 해류가 아니다.



4. ARGO float과 표충 부표를 이용한 자동 관측

가. Argo float

(1) 아고플로트 관측

아고플로트(Argo float)는 별도 추진 시스템 없이 중성부력을 가지며 해류를 따라 이동하는 장비이다. 일반적으로 해수 중층(1,000 m)을 떠다니다가 일정 간격으로 부력을 조정하며 떠올라 위치와 획득한 자료를 인공위성을 통해 전송한다. 해류의 흐름을 따라 이동하기 때문에 전송 간격동안 이동한 거리를 바탕으로 직접 이동한 해류를 측정할 수 있다. 북서태평양의 수온·염분 및 해류의 이동을 관측하기 위해 아고플로트 2기 S/N 2901779는 5일, S/N 2901780는 3일 간격으로 대기 수심(park pressure) 1,000 m에서 대기 후 설정 수심(Profile pressure) 2,000 m까지 내려간 후 천천히 상승하면서 수온·염분을 관측하였다. 탐사 해역 중 유속이 강한 위도 36°05.47N, 경도 158°03.50 E와 위도 36°06.11N, 경도 158°04.01 E에 2기의 아고플로트를 2017년 11월 3일 11시 14분과 11시 26분에 각각 투하하였다. 심층에서는 100 db 간격으로 상층으로 올라오면서 관측 간격을 정밀하게 관측하도록 설정하였다(표 3-2-4-1). 3일 간격으로 관측을 한 S/N 2901780은 2018년 7월 25일 91번째 프로파일링까지 관측을 수행하였다. 5일 간격으로 관측하는 S/N 2901779는 현재까지 관측 중이다(그림 3-2-4-1).

표 3-2-4-1. Argo 플로트의 주요 사항과 관측 설정.

Column	Value	Value	
WMO ID	2901779	2901780	
Argos number	41616	41618	
Launch date	2017/11/03	2017/11/03	
Launch latitude	36.09	36.1	
Launch longitude	158.06	158.07	
CTD senser	SBE-41	SBE-41	
Control board	APF9A-943	APF11-1717	
Park time (days)	4.04	2.04	
Ascent time (hours)	9	9	
Surface time (hours)	6	6	
Park pressure (db)	1000	1000	
Profile pressure (db)	2000	2000	
Cycle(day)	5	3	
WMO ID	Pressure (db)	Interval (db)	
	1000 ~ 2000	100	
2901779	800 ~ 1000	25	
	200 ~ 800	20	
2901780	10 ~ 200	10	
	0 ~ 10	5	



(2) Argos 메시지 처리

아고플로트에서 인공위성으로 전송된 데이터는 ArgosServer에서 다운로드 받을 수 있다. 다운로드 받은 원본 자료는 아고플로트의 아고스 번호(Argos Number), 메시지의 길이, 위성 정보, 시간, 위·경도 등이 저장된 헤더와 Argos 데이터 메시지로 구분된다. 기본적으로 데이터 메시지는 다수의 블록으로 나뉘어져 있고, 각각의 블록은 31바이트의 16진수 메시지로 구성된다. 그러나 이번에 투하된 2기는 컨트롤 보드 버전이 각각 APF-9A와 APF-11로 각 블록과 메시지가 나타내는 파라미터가 달랐다. 이를 위해 두 아고플로트의 자료 처리시스템을 구분하여 구축하였다. 메시지 변환은 우선 블록단위로 순환중복검사(CRC: Cyclic redundancy Check)를 수행하여 데이터 오류 여부를 확인하였다. 순환중복검사는 통신을 통해 데이터를 주고받을 때생길 수 있는 통신 잡음에 대비하여 데이터가 오류 없이 수신되었는지 확인하는 방법이다. 오류가 없는 블록에 대해 각각의 바이트를 10진수로 변환하였고, 마지막 블록까지 변환이 끝나면 수온, 염분, 압력 값에 대해 실시간 품질관리를 거쳐 NetCDF 파일을 생성하였다(표 3-2-4-2).

표 3-2-4-2. Argo 플로트 실시간 관측 자료 검증과 처리 방법.

TEST	설 명			
1. platform identification	ARGO PTT number WMO ID 상응 검사			
2. Deepest pressure test	Deepest pressure < profile pressure × 1.1			
3. Impossible date test	profile date의 Julian date 범위 검사 17167 <= JULD < UTC date			
4. Impossible location test	-90 =< Latitude =< 90, -180 =< Longitude =< 180			
5. position on land test	profile position이 육지인지 전 세계 2분 격자 topography bathymetry 파일과 비교			
6. Impossible speed test	float drift speed =< 3 m/s			
7. Global range test	수온, 염분, 압력 범위 확인 pressure > -5dbar -2.5°C =< tempature =< 40°C 2PSU=< Salinity =<41 PSU			
8. Pressure increasing test	pressure 값이 순차적으로 증가하는지 검사			
9. spike test	test value = v2-(v3+v1)/2 - (v3-v1)/2 • Temperature test value가 500dbar 미만에서 6°C 미만 test value가 500dbar 이상에서 2°C 미만 • Salinity test value가 500dbar 미만에서 0.9 PSU 미만 test value가 500dbar 이상에서 0.3 PSU 미만			
9. Gradient test	test value = v2-(v3+v1)/2 • Temperature test value가 500dbar 미만에서 9°C 미만 test value가 500dbar 이상에서 3°C 미만			

TEST	설 명	
	• Salinity test value가 500dbar 미만에서 1.5PSU 미만 test value가 500dbar 이상에서 0.5PSU 미만	
10. Digit rollover test	 Temperature 인접한 압력과의 온도차이가 10℃ 미만 Salinity 인접한 압력과의 염분차이가 5PSU 미만 	
11. Stuck value test	한 프로파일에서 수온, 염분 값의 동일 여부 검사	
12. Density inversion test	• potential density (from top to bottom) 인접한 압력과의 밀도차가 0.03kg/㎡ 미만	
13. Gross sensor drift test	수온·염분 센서 drift 검사(이전 관측 자료와 비교)	
14. Frozen profile test	Argo float 연속된 같은 프로파일 생산 여부 검사	

(3) Argo float 관측 결과

2017년 11월 3일에 투하한 2기의 아고플로트는 초기 동일하게 북동쪽으로 이동하다 2017년 11월 19일(위도 36°51°N, 경도 159°00°E) 이후부터 서로 다른 경로로 이동한다. 5일 간격으로 관측한 S/N 2901779는 반시계 방향으로 2018년 1월 28일(위도 37°08°N, 경도 157°27°E)까지 서쪽으로 이동한다. 겨울철 수온이 낮은 시기 위도 37°N부터 위도 33°30°N까지 반시계 방향으로 크게 회전하면서 남쪽으로 이동하면서 2018년 3월 9일(위도 33°34°N, 경도 157°00°E) Shatsky rise 서쪽 해역에 도착한다. 이후 사면을 따라 2018년 4월 초 Shatsky rise을 통과 한 후 2018년 5월 말까지 남동쪽으로 이동한다. 현재까지 Shatsky rise 남동쪽에서 회전 운동을 하면서 천천히 서쪽으로 이동하고 있다. 반면 3일 간격으로 관측하는 S/N 2901780은 2017년 11월 20일 시계방향으로 80 km 반경의 해역을 회전하면서 1달가량 늦은 2018년 1월 중순부터 북서쪽으로 이동한다.

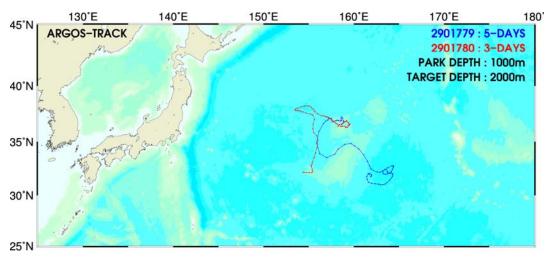


그림 3-2-4-1. 쿠로시오 확장역에 투하된 Argo 플로트 이동 궤적과 관측 위치.

0,

수온이 낮은 시기 위도 37°N의 북쪽 해역에 위치하였고, 2018년 4월 위도 38°15′N, 경도 150°E까지 이동 후 2018년 7월 말, 위도 32°10′N, 경도 154°20′E까지 남쪽으로 이동하였다. 2 기의 아고플로트는 관측 주기 차이로 인해 쿠로시오 확장역 내에서의 시·공간적인 해수의 특성을 관측하였다. 관측 해역의 표층 수온은 2월에 13.6℃로 위도 37°N에서 가장 낮고, 8월 말위도 32°N에서 28.2℃로 가장 높다. 2기의 아고플로트에서 관측한 수심별 수온·염분 분포를보면 표층에서는 계절별 수온 전선의 남북 이동에 의해 공간보다는 계절적인 수온 변동이 뚜렷하고 표층 염분은 해황 환경에 의한 변동이 커 시·공간적인 변동이 표층 수온보다는 뚜렷하지 않다. 수심 100 m 이하의 수온·염분은 계절적인 변동성보다는 공간적인 특성이 뚜렷하여, 수심별로 위도 35°N를 기준으로 북쪽 해역에서는 저온·저염이, 남쪽 해역에서는 고온·고염의 해수가 분포한다(표 3·2·4·2). 위도 35°N의 남쪽 해역의 34.5 psu 이상의 고염분수는 표층에서 수심 300 m까지 분포하고 34 psu 이하의 저염분수는 600 ~ 700 m에 분포한다. 위도 35°N의 북쪽 해역은 관측 초기 수심 50 ~ 120 m와 일부 표층에서만 34.75 psu 이상의 염분수가 관측되고, 저염분수는 350 ~ 500 m에 분포한다(그림 3·2·4·3).

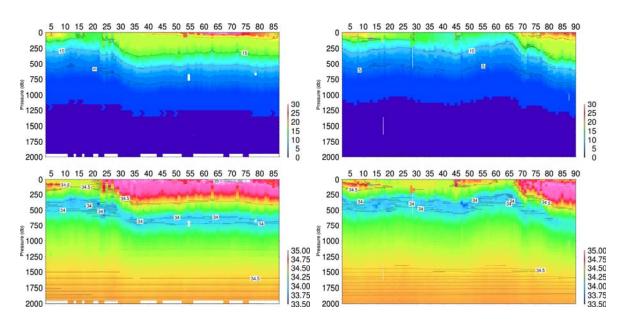


그림 3-2-4-2 Argo 플로트에서 관측한 수온과 염분 분포. 2901780(왼쪽)과 2901779(오른쪽).

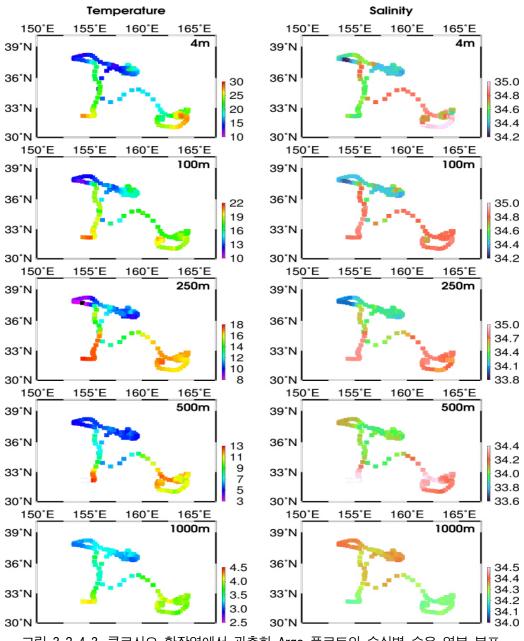


그림 3-2-4-3. 쿠로시오 확장역에서 관측한 Argo 플로트의 수심별 수온 염분 분포.

나. 표층 해류 특성 조사

쿠로시오 확장역의 표층 해류 특성을 조사하기 위해 표층이나 일정한 깊이에서 떠다니는 부표를 이용하여 해수의 움직임을 추적하는 라그랑지안 측정법인 SVP(Surface Velocity Program) drifter를 사용하였다. 이 drifter는 표층 해류에 따라 이동하면서 일정 기간 동안의 위치 정보를 수집하여 표층 해류를 관측하는 장비로, 미국 해양대기청(NOAA)의 AOML에서 수행하고 있는 Global Drifter Programs의 일환으로 2018년 8월, 5개 정점에서 11개의 drifter를 투하하였다. 본 장비는 미국에서 개발한 장비로 표층에 떠 있는 인공위성 통신부 drifter와, 표층 해류를 따라 이동하기 위해 수심 15 m 깊이에 6.44 m 길이의 나일론 재질의 원형 drogue로 구성된다.

1			N.	
	r	7	В.	
V	ь	d	γ.	_

No.	Time (UTC)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	S/N
1	08/09/18, 04:14	34° 49.241870'	157° 19.488655'	65433170
2	08/09/18, 04:17	34° 49.395389'	157° 19.504818'	65433190
3	08/12/18, 03:02	33° 42.802166'	156° 35.027555'	65385690
4	08/12/18, 03:03	33° 42.688703'	156° 35.023983'	65480860
5	08/12/18, 03:04	33° 42.572877'	156° 34.984602'	65480870
6	08/12/18, 18:39	33° 01.597033'	156° 16.909132'	65431350
7	08/12/18, 18:40	33° 01.677731'	156° 16.953017'	65432430
8	08/13/18, 10:17	34° 17.018127'	157° 02.770838'	65339940
9	08/13/18, 10:17	34° 16.988328'	157° 02.747297'	65339650

표 3-2-4-3. Ocean Current Drifter 투하 정보.

08/14/18, 18:04

08/14/18, 18:05

10 11

아래 그림은 5개의 정점에서 투하한 surface drifter의 투하 일자부터 2018년 12월 31일까지의 이동궤적이다. 각 정점에서 투하한 drifter들은 투하 시점에서 일정기간동안 유사한 한 경로를 보이다가 시간이 지남에 따라 분리되어 다른 경로로 흘러간다.

155° 51.638099'

155° 51.585239'

65339630

65339580

32° 23.592060'

32° 23.523214'

가장 북쪽 정점에서 투하한 2개의 drifter는 위도 40°N-경도 156°E 부근까지 유사한 경로로 이동하였고, 그 이후에 1기의 신호가 불안정하긴 하였지만 다른 1기의 drifter의 궤도와는 다소 멀어졌다. 가장 북쪽에서 투하한 drifter를 제외한 나머지 정점에서 출발한 drifter들은 위도 31°N-경도 162°E 부근의 와류에 의해 일정기간동안 갇혀 있다가 밖으로 벗어났다. 그리고 와류에서 벗어난 drifter들은 중 일부는 서쪽, 일부는 동쪽 등 다양한 방향으로 이동하였다.

해류가 강한 지역에서 drifter는 해류에 의한 이동이 두드러지게 나타나지만, 해류가 약한 지역에서는 관성류에 의한 시계방향의 회전성 이동이 두드러진다. Drifter가 위치한 위도에 따라다른 관성 주기에 의해 회전운동을 하며 이동하였다.

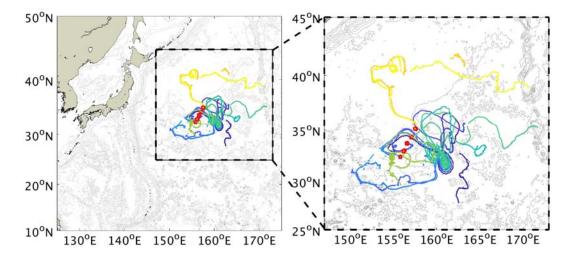


그림 3-2-4-4. 투하한 Surface drifter로부터 획득한 2018년 12월 31일까지의 이동 궤적.



5. 인공위성, 수치모델 자료 등을 활용한 변동 특성 연구

계류 시스템을 비롯한 본 연구의 현장 관측 대부분은 쿠로시오 확장역의 하류 해역에 위치한 Shatsky Rise 주변에서 수행되었다. 기존에 현장 관측이 거의 없었던 해역에서 얻은 중요한 자료이지만, 시공간적인 제한성이 있기 때문에 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Simple Ocean Data Assimilation (SODA)를 비롯한 인공위성 자료, 수치모델 재분석장 등을 함께 활용하여 쿠로시오 확장역의 해양환경 변동성을 분석하였다(그림 3-2-5-1).

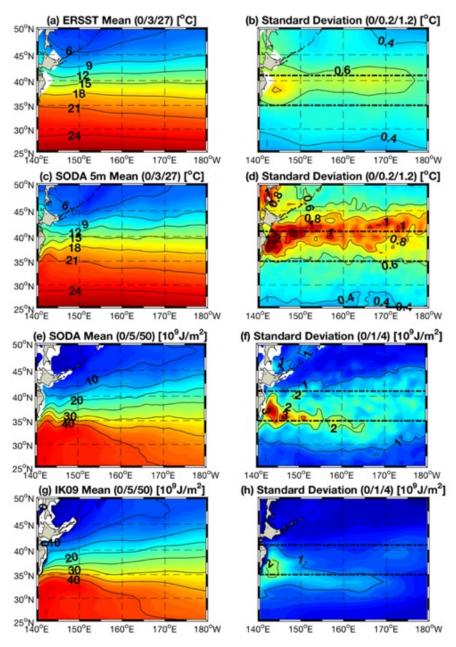


그림 3-2-5-1. 북서태평양 쿠로시오 확장역 상층 온도와 상층 700 m 열용량의 45년(1964-2008년) 평균과 표준편차.

가. 쿠로시오 확장역 상류 해역과 Shatsky Rise 주변의 물리적 특성 비교

Shatsky Rise 주변은 쿠로시오 확장역의 상류보다 동쪽에 위치한 하류 해역에 해당된다. 그림 3-2-5-2의 평균장에서 알 수 있듯이 수온과 염분의 남북 차이가 상류역보다 약하고, 동쪽으로의 유속(쿠로시오 제트의 세기)도 약하게 나타난다. 또한 Shatsky Rise를 비롯한 지형의 영향으로 쿠로시오 제트가 남북으로 갈라지는 형태를 보인다.

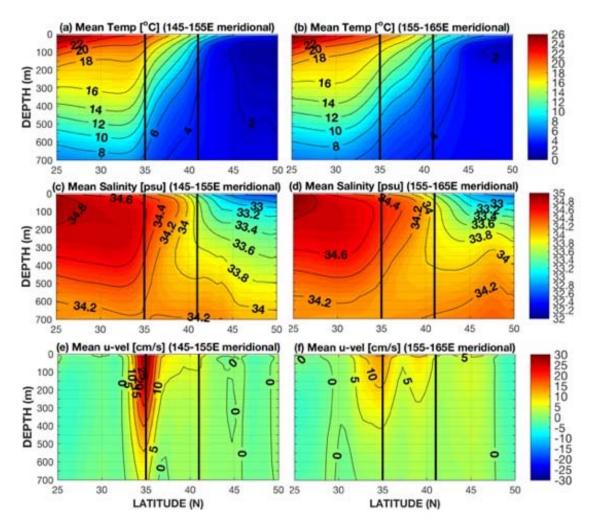


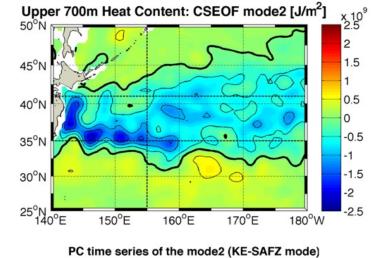
그림 3-2-5-2. 쿠로시오 확장역 상류 해역(동경 145-155도, 왼쪽 패널)과 하류 해역(동경 155-165도, 오른쪽 패널)의 수온, 염분, 유속 남북방향 수직 단면 비교.



나. 쿠로시오 확장역 해양 상층부 열용량의 시공간 변동성 분석

쿠로시오 확장역 해양 상층부 700 m의 열용량을 계산하여 그 시공간 변동성을 분석하였다. 북위 약 35도에 위치한 Kuroshio Extension 제트와 북위 약 41도에 분포하는 Subarctic Frontal Zone을 중심으로 남북 방향 수온과 염분 차이가 크게 나타나는 것처럼, 열용량의 남북 방향 차이도 해당 위도대에서 크게 나타나며, 시간 변동성도 크게 나타남을 알 수 있었다.

경년-수십년 주기에서는 Kuroshio Extension 제트와 Subarctic Frontal Zone의 열용량이 전반적으로 함께 증가하거나 함께 감소하는 Kuroshio Extension-Subarctic Frontal Zone (KE-SAFZ) 모드와(그림 3-2-5-3), Kuroshio Extension 제트를 중심으로 남북 방향 열용량이 각각 증가하거나 감소하는 Kuroshio Extension (KE) 모드가 존재함을 보였다(그림 3-2-5-4). KE-SAFZ 모드에 따르면 1970년대에 비해 1980년대의 열용량이 전반적으로 감소했다는 것을 알 수 있으며, KE 모드에 따르면 1990년대와 2000년대 초반에 비해 1990년대 후반과 2000년대 후반의 열용량 남북 차이가 강해졌음을 알 수 있다.



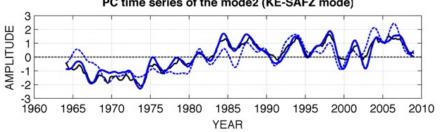


그림 3-2-5-3. 쿠로시오 확장역 상층 700 m 열용량 변동의 Kuroshio Extension-Subarctic Frontal Zone (KE-SAFZ) 모드

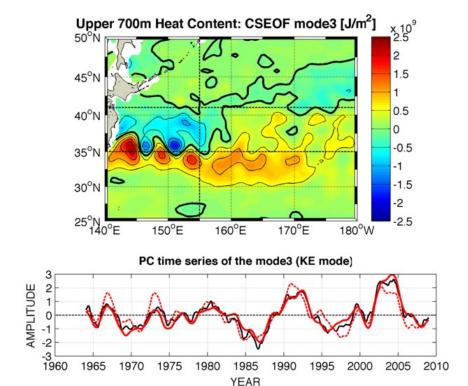


그림 3-2-5-4. 쿠로시오 확장역 상층 700 m 열용량 변동의 Kuroshio Extension (KE) 모드

다. 해양 상층부 열용량의 장기 변동성과 관련된 해양-대기장 분석

KE-SAFZ 모드와 KE 모드 변동에 따른 쿠로시오 확장역 상류역과 하류역의 수온, 염분, 유속 이상치를 분석함으로써 상층부 열용량의 장기변동성과 관련된 해양 환경 변동을 살펴보았다. 그 결과 KE-SAFZ 모드의 PC time series가 양의 부호일 때, 즉 열용량이 전반적으로 감소했을 때는 KE와 SAFZ가 함께 남쪽으로 이동한 상태를 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 또한 KE 모드의 PC time series가 양의 부호일 때, 즉 쿠로시오 제트 남쪽의 열용량이 증가하고 북쪽의 열용량이 감소함으로써 열용량의 남북방향 차이가 강해질 때는 KE의 세기가 강해졌을때를 나타낸다는 것을 알 수 있었으며, 이러한 KE 모드는 SAFZ와 관계 없이 KE의 세기가 강해지거나 약해지는 것을 반영한다.

이러한 변동과 관련된 대기장 변동을 이해하기 위해 그림 3-2-5-5, 그림 3-2-5-6와 같이 KE-SAFZ 모드, KE 모드의 시간 변동성과 해면 기압, 바람장 사이의 시간차 상관관계를 계산하였고, 이에 따른 해수면고도와의 상관관계도 분석하였다. KE-SAFZ 모드에 따라 KE와 SAFZ가 함께 남쪽으로 이동하기 약 1년전쯤 동태평양에서 음의 해면기압장이 발생하며, 이와 관련하여 KE-SAFZ 위도에서 음의 wind stress curl이 발생한다. 이는 음의 해수면고도 이상치를 만들어내며, 이것이 KE와 SAFZ의 남쪽 방향 이동과 관련되는 것으로 보인다. 이러한 대기-해양변동 시간차는 이전에 알려졌던 것에 비해 상대적으로 짧은 편이다. 반면에 KE 모드에 따라

KE가 강해지기 약 3년전쯤에 동태평양에서 양의 해면기압장이 발생하며, 이와 관련하여 KE 위도에서 음의 wind stress curl이 발생한다. 이는 음의 해수면고도 이상치를 만들어내며, 이것 이 서쪽으로 전파하면서 KE의 세기를 강화시키는 것으로 생각된다. 이는 기존에 잘 알려졌던 jet trapped Rossby wave의 전파 특성과 잘 일치하는 것이다(Sasaki et al. 2013).

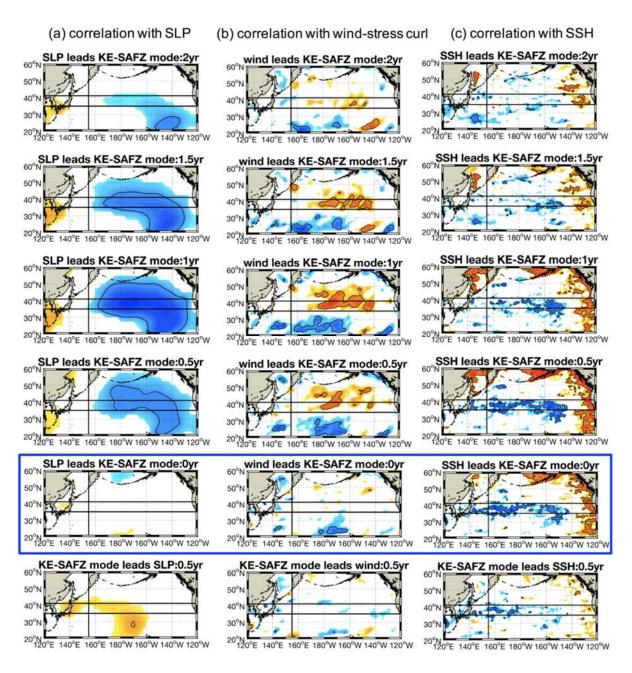


그림 3-2-5-5. KE-SAFZ 모드와 관련된 (a) 해면기압, (b) 바람장, (c) 해면고도의 시간차 상관관계.



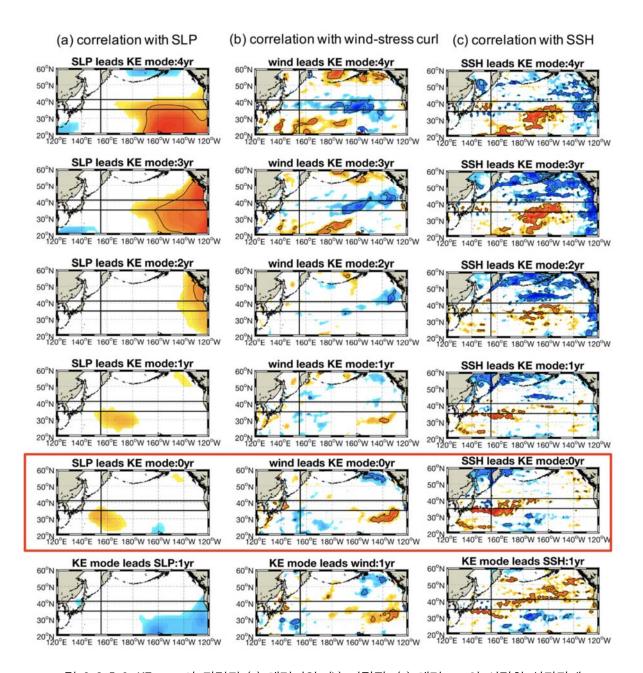


그림 3-2-5-6. KE 모드와 관련된 (a) 해면기압, (b) 바람장, (c) 해면고도의 시간차 상관관계.

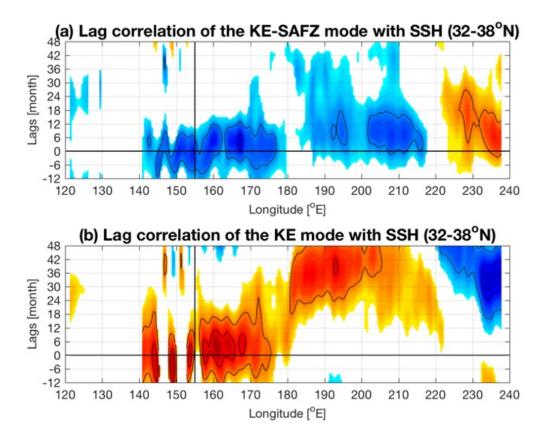


그림 3-2-5-7. KE-SAFZ mode와(위) KE mode와(아래) 관련된 해면고도.

0,

제3절 하위 생태계 구조 및 C-export 조사와 정량화

1. 생태계 생지화학 기초자료 획득

가. 쿠로시오 확장역 해역에서의 용존 영양염 분포

(1) 2017년 쿠로시오 확장역 해역에서의 용존 영양염 분포

정점 4.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.5, 14에서 표층부터 저층까지 각 수심별로 채수하여 영양염 시료를 획득하였으며, 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염을 현장에서 영양염 자동 분석기 (Bran luebbe, QuAAtro 5ch)를 이용하여 분석하였다.

암모니아는 정점 4.5의 수심 65 m 에서 $0.140~\mu$ M의 농도를 보였으며, 다른 정점의 모든 수심에서는 ND를 나타냈다. 유광대(수심 200~m 이내)에서 영양염의 분포는 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염 모두 고갈되어 있었으며, 규산염은 $2~\mu$ M이하의 농도값을 나타냈다.

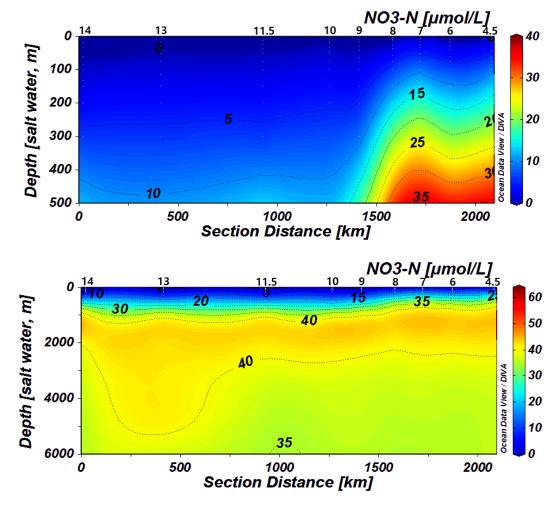


그림 3-3-1-1. 2017년 쿠로시오 확장역 질산염 수직분포.

질산염은 전선역으로 보이는 정점 7, 8, 9에서는 수심 35 ~ 65 m 까지 고갈되어 있으며, 저위도 warmpool 해역으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 고갈된 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있다.

정점 4.5, 6, 7, 8, 9에서 표층보다 상대적으로 저온, 저염분의 저층 수괴가 수심 150 m 부근 까지 올라와 있으며, 질산염의 농도 분포도 수괴의 특성을 반영하고 있으며, 정점 10에서 수괴가 하강하여 저위도 정점들의 500 m 이하 수심에서 질산염 농도가 10 μ M이상으로 분포하고 있다.

인산염은 전선역으로 보이는 정점 7, 9에서는 수심 35~65 m 까지 고갈되어 있으며, 정점 8 에서는 수심 57 m까지 $0.02~\mu$ M 이하로 존재하고 있으며, 위도 warmpool 해역으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 고갈된 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있으며, 정점 4.5, 6, 7, 8, 9에서 표층보다 상대적으로 저온, 저염분의 저층 수괴가 수심 150~m 부근까지 올라와 있으며, 인산염의 농도 분포도 수괴의 특성을 반영하고 있다. 정점 10에서 수괴가 하강하여 저위도 정점들의 500~m 이하 수심에서 인산염 농도가 $1~\mu$ M이상으로 분포하고 있다.

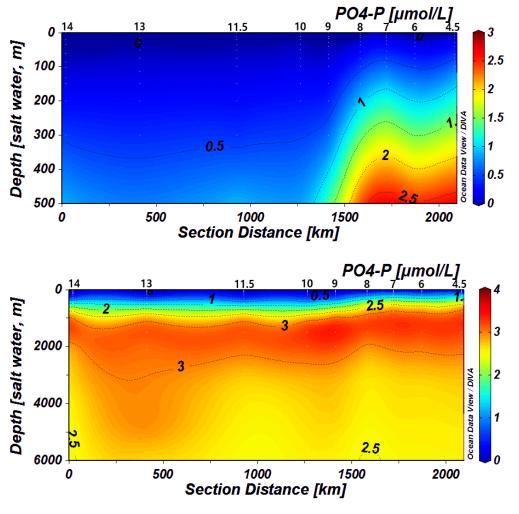


그림 3-3-1-2. 2017년 쿠로시오 확장역 인산염 수직분포.

규산염은 전선역으로 보이는 정점 7, 8, 9에서는 수심 35 ~ 65 m 까지 2 μ M 이하로 분포하고 있으며, 저위도 warmpool 해역으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 2 μ M 이하로 존재하는 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있으며, 정점 4.5, 6, 7, 8, 9에서 표층보다 상대적으로 저온, 저염분의 저층 수괴가 수심 150 m 부근까지 올라와 있으며, 규산염의 농도 분포도 수괴의 특성을 반영하고 있다. 정점 10에서 수괴가 하강하여 저위도 정점들의 500 m 이하 수심에서 규산염 농도가 15 μ M이상으로 분포하고 있다.

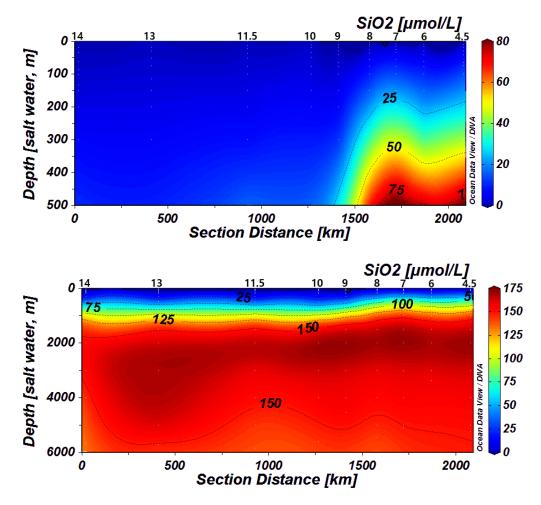


그림 3-3-1-3. 2017년 쿠로시오 확장역 규산염 수직분포.

NP ratio는 전선역으로 보이는 정점 7, 8, 9에서는 수심 35~65 m 까지 0~0.7의 범위를 나타내고 있으며, 질소계열 영양염이 제한요소로 작용하고 있고, 저위도의 정점 11.5, 13, 14의 수 온약층인 수심 100~150 m에서 NP ratio는 5~8의 범위를 나타내고 있으며, 200 m 이하의 저층에서는 NP ratio는 12.9~16.1의 범위를 보이고 있다.



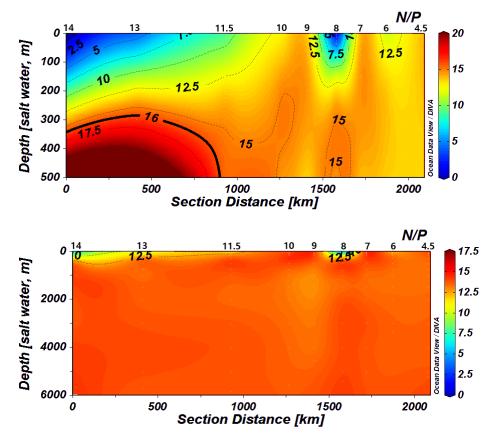


그림 3-3-1-4. 2017년 쿠로시오 확장역 N/P 수직분포.

(2) 2018년 쿠로시오 확장역 해역에서의 용존 영양염 분포

정점 0, 1.1, 2.4, 4, 6, 7, 8, 9에서 표층부터 저층까지 각 수심별로 채수하여 영양염 시료를 획득하였고, 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염을 현장에서 영양염 자동 분석기 (Bran luebbe, QuAAtro 5ch)를 이용하여 분석하였다.

암모니아는 정점 0의 표층~65 m 에서 0.73~1.63 μ M의 농도를 보였으며, 다른 정점의 모든 수심에서는 ND를 나타냈다.

정점 0에서는 상대적으로 저온의 표층에서 질소계 영영염(암모니아, 아질산염, 질산염)이 수심 50 m까지 존재하고 있으며, 인산염은 1.2 μ M이하의 농도값을 나타내고 있고, 규산염은 수심 15 m까지 3 μ M이하의 농도값을 보였다.

정점 1.1부터 정점 2.4에서는 표층에서 수심 30~m 까지 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염모두 고갈되어 있었으며, 규산염은 $3~\mu M$ 이하의 농도값을 나타냈다.

정점 2.4에서 저위도로 갈수록 표층에서 수심 70 m 까지 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염 모두 고갈되어 있었으며, 규산염은 3 μ M이하의 농도를 나타냈다.

질산염은 정점 0에서 표층에서 6 μ M 정도의 농도값을 나타내고 있으며 저위정점 1.1과 2.4으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 표층에서 고갈되며, 고갈된 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있다. 전선역으로 보이는 정점 7에서는 수심 35 m 까지 고갈되어 있으며, 저위도 warmpool

0,

해역으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 고갈된 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있다.

정점 7에서 표충보다 상대적으로 저온, 저염분의 저충 수괴가 수심 150 m 부근까지 올라와 있으며, 질산염의 농도 분포도 수괴의 특성을 반영하고 있고, 정점 8에서 수괴가 하강하여 저위도 정점들의 $500~\mathrm{m}$ 이하 수심에서 질산염 농도가 15 $\mu\mathrm{M}$ 이상으로 분포하고 있다.

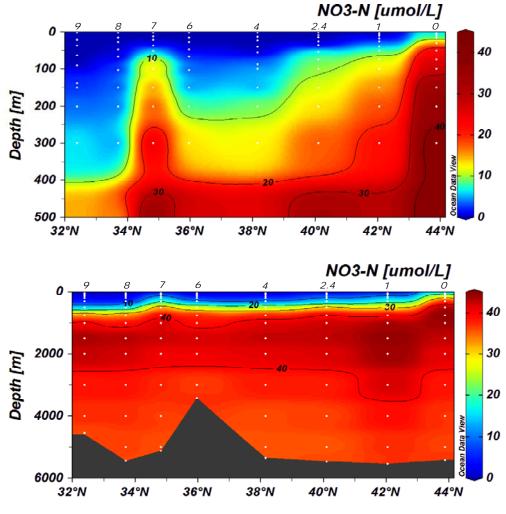


그림 3-3-1-5. 2018년 쿠로시오 확장역 질산염 수직분포.

인산염은 정점 0에서 표층에서 0.25 μ M 정도의 농도값을 나타내고 있으며 정점 1.1과 2.4로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 표층에서 고갈되며, 고갈된 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있다. 전선역으로 보이는 정점 7에서는 수심 35 m 까지 고갈되어 있으며, 저위도 warmpool해역으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 고갈된 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있다.

정점 7에서 표층보다 상대적으로 저온, 저염분의 저층 수괴가 수심 150 m 부근까지 올라와 있으며, 인산염의 농도 분포도 수괴의 특성을 반영하고 있으며, 정점 8에서 수괴가 하강하여 저위도 정점들의 $500~\mathrm{m}$ 이하 수심에서 인산염 농도가 2 $\mu\mathrm{M}$ 이상으로 분포하고 있다.



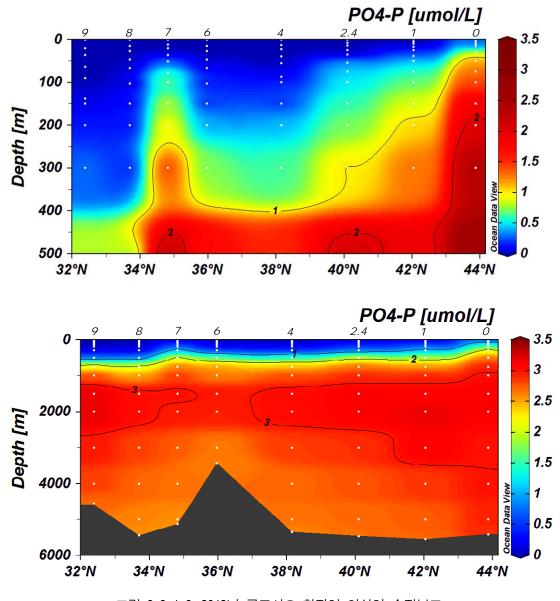


그림 3-3-1-6. 2018년 쿠로시오 확장역 인산염 수직분포.

규산염은 정점 0에서 표층에서 $3~\mu$ M 정도의 농도값을 나타내고 있으며 정점 1.1과 2.4로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 표층에서 $2~\mu$ M 이하로 존재하고 있고, 전선역으로 보이는 정점 7에서는 수심 35~m 까지 $3.5~\mu$ M 이하로 분포하고 있으며, 저위도 warmpool 해역으로 갈수록 SCM 층이 깊어지며 $3.5~\mu$ M 이하로 존재하는 수심도 같이 깊어지는 경향을 나타내고 있다.

정점 7에서 표층보다 상대적으로 저온, 저염분의 저층 수괴가 수심 150 m 부근까지 올라와 있으며, 규산염의 농도 분포도 수괴의 특성을 반영하고 있고, 정점 8에서 수괴가 하강하여 저위도 정점들의 500 m 이하 수심에서 규산염 농도가 20 μ M이상으로 분포하고 있다.



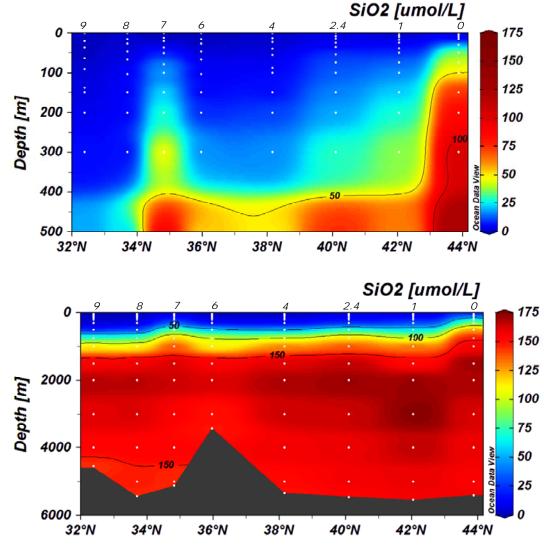


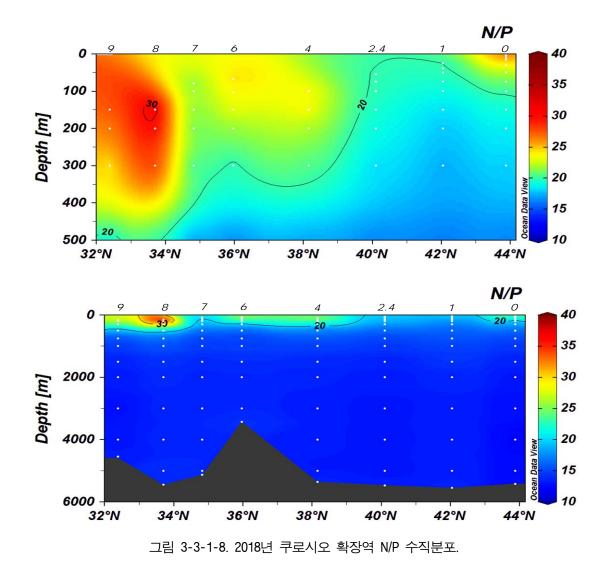
그림 3-3-1-7. 2018년 쿠로시오 확장역 규산염 수직분포.

NP ratio는 정점 0에서 표충부터 수심 75 m까지 20~28의 범위를 나타내고 있으며, 인계열 영양염이 상대적으로 낮게 존재하고 있음을 나타낸다.

정점 1.1, 2.4의 수온약층인 수심 70~150 m에서 NP ratio는 19~20의 범위를 나타내고 있으며, 200 m 이하 저층에서 NP ratio는 12.7~18.6의 범위를 보이고 있고, 정점 2.4, 4, 6에서 수심 54~200 m까지 20~26의 범위를 나타내고 있으며, 인계열 영양염이 상대적으로 낮게 존재하고 있음을 나타낸다.

전선역으로 보이는 정점 7에서는 수온약층인 수심 50~150 m에서 NP ratio는 19~20의 범위를 보이고 있어 상대적으로 저층의 수괴가 상층으로 올라온 특성을 나타내고 있고, 정점 2.4 아 래 저위도 지역의 500 m 이하 저층에서 NP ratio는 13.4~18.4의 범위를 보이고 있다.





(3) 2017년도 경계역 수괴 특성 파악

2017년도에 분석한 영양염 자료와 수온, 염분, 밀도(sigma-T) 등의 자료를 이용하여 주성분 분석(Principal Component Analysis)을 수행하여 수괴 특성을 파악하였으며, PCA에 사용된 분석 항목은 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염, NP ratio, SiP ratio, 수온, 염분, Sigma-T 이었다.

주성분 도출결과 제1주성분은 전체 분산에 대해 50.4%의 기여율을 보이고 있으며, 질산염, 인산염, 규산염, Sigma-T와 높은 양의 상관관계(r>0.938)를 나타내고 있고 수온과 높은 음의 상관관계(r=-0.986)를 보이고 있으며, 제2주성분은 전체 분산에 대해 21.6%의 기여율을 보이고 있으며, SiP ratio와 높은 양의 상관관계(r=0.939)를 나타내고 있고 NP ratio와 높은 음의 상관관계(r=-0.816)를 보이고 있다.



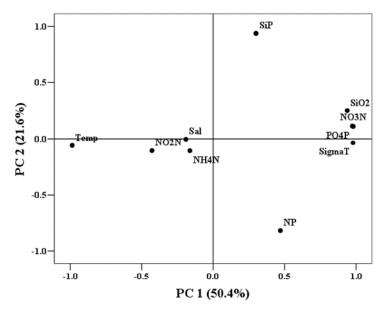


그림 3-3-1-9. 주성분 도출표.

인자부하량에 따른 각정점의 인자점수 분포에 따라 Group I, Group II, Group III으로 구분되어 지는데, Group I은 전선형성지역 표충(KE-8, 0~37 m)으로, 수온과 Si/P에 의한 환경요인을 나타내고 있으며, Group II는 전선역 남쪽 중층 (KE-9~KE-14, 200~750 m)으로 아질산염, 염분, N/P에 의한 환경요인을 보이고 있고, Group III은 저층수(수심 1,000 m 이하)로 NO3-N, PO4-P, Si, N/P, Sigma-T와 같은 환경요인에 의해 수괴 특성이 나타났다.

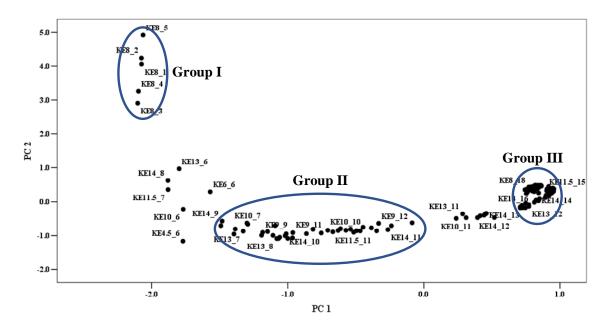


그림 3-3-1-10. 인자부하량에 따른 각정점의 인자점수 분포.



2. 쿠로시오 확장역의 하위생태계 구조 및 특성

가. 쿠로시오 확장역의 동/식물플랑크톤 생체량 및 군집 구조 특성

(1) 쿠로시오 확장역 유광대 내의 식물플랑크톤 엽록소 a 분포 특성

2017년 10월 유광대 내의 엽록소 a 평균 농도는 0.22±0.15 mg Chl-a m³이며, 가장 높은 엽록소 농도는 0.55 mg Chl-a m³으로 정점 8의 표층에서 나타났다(Fig. 3-2-11). 유광층 하부에서 DCM층을 형성하는 다른 정점들과는 달리. 정점 7, 8, 9에서는 유광층 전체에서 상대적으로 높은 엽록소 농도를 보였으며, 저위도보다는 고위도에서 높은 엽록소 농도를 보였다. 3 μm 이하의 초미소식물플랑크톤 엽록소의 평균 농도는 0.14± 0.08 mg Chl-a m³으로 전체 엽록소 농도의 67±15%로 높은 비율을 보였다. 가장 높은 3 μm 이하의 엽록소 농도 또한 정점 8에서 나타났지만, 전체 엽록소 농도에서 차지하는 비율은 낮았다. 2017년 10월 유광대 내의엽록소 a 평균 농도는 0.22±0.15 mg Chl-a m³이며, 가장 높은 엽록소 농도는 0.55 mg Chl-a m³으로 정점 8의 표층에서 나타났다(Fig. 3-3-2-1). 유광층 하부에서 DCM층을 형성하는 다른 정점들과는 달리. 정점 7, 8, 9에서는 유광층 전체에서 상대적으로 높은 엽록소 농도를 보였으며, 저위도보다는 고위도에서 높은 엽록소 농도를 보였다. 3 μm 이하의 초미소식물플랑크톤엽록소의 평균 농도는 0.14± 0.08 mg Chl-a m³으로 전체 엽록소 농도의 67±15%로 높은 비율을 보였다. 가장 높은 3 μm 이하의 엽록소 농도 또한 정점 8에서 나타났지만, 전체 엽록소 농도에서 차지하는 비율은 낮았다.

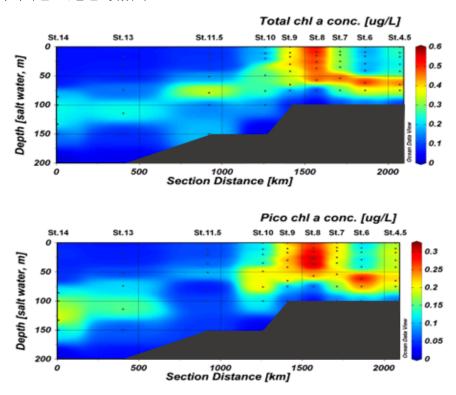


그림 3-3-2-1. 2017년 전체(상), 피코(하) 사이즈 염록소 수직분포.

0,

2018년 8월 유광대 내의 식물플랑크톤 생체량은 2017년보다 시·공간적으로 큰 변화를 보이는데, 이는 고온·고염수의 쿠로시오 해역으로 저위도 해역에 집중된 2017년과 달리, 북위 32°N부터 44°N까지 범위로 고위도의 오야시오 해역이 조사해역에 포함되었기 때문이다(Fig. 3-3-2-2).

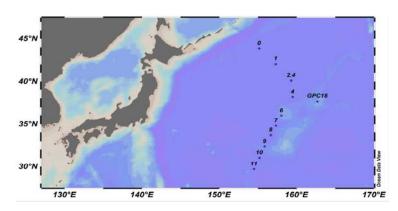


그림 3-3-2-2. 2018년 정점도.

엽록소 a의 평균 농도는 0.29 ± 0.37 mg Chl-a m⁻³이며, 가장 높은 엽록소 농도는 정점 0의 16 m 에서 1.71 mg Chl-a m⁻³로 나타났다(Fig. 3-3-2-3). 또한 고위도에 위치한 정점으로 갈수록 식물플랑크톤 생체량의 증가 경향을 나타냈다. 3 μ m 이하의 엽록소 농도 또한 정점 0과 고위도 해역에서 높은 값을 보였으나, 전체 엽록소 a 농도에 대한 비율은 고위도 해역(55 $\pm20\%$)보다 저위도 해역의 정점($64\pm12\%$)에서 높은 기여도를 보였다. 특징적으로, 주위의 정점들에 대해 상대적으로 저온/저염의 수괴 용승이 관측되었던 정점 7의 경우, 다른 저위도과 달리 3 μ m 이하의 엽록소 기여도($55\pm13\%$)가 낮게 나타났다.

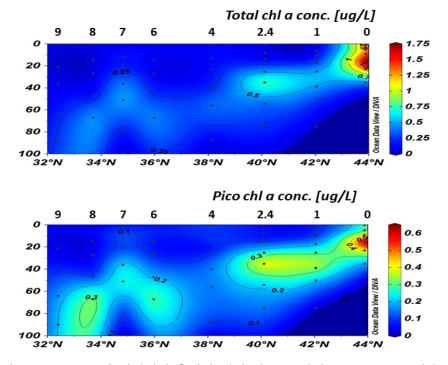


그림 3-3-2-3. 2017년 항차에서 측정된 전체 및 pico 사이즈 chlorophyll a의 농도.



두 번의 조사기간 동안 고위도에서 높은 생물량이 나타나는 것을 제외하면 오야시오 해류와 쿠로시오 해류가 만나는 전선역과 중규모 소용돌이에 의해 용승이 발생하는 정점 7과 8부근에서 상대적으로 높은 생물량이 나타나는 것을 관측 할 수 있었다.

(2) 쿠로시오 확장역의 동물플랑크톤 생물량 및 우점종 분포

2017년 10월과 2018년 8월 쿠로시오 확장역에서 동물플랑크톤 평균 생물량은 각각 6.0±4.6 mg C m³, 6.5±5.5 mg C m³로 나타났다(Fig. 3-3-2-4). 2017년은 전선역이 나타났던 정점 8에서 가장 높은 생물량(14.8 mg C m³)을 보였으며, 저위도에 위치한 열대역에서는 동물플랑크톤 생물량이 감소하고, 상대적으로 크기가 작은 2 mm 이하의 동물플랑크톤의 비율이 증가하였다. 2018년의 경우, 고위도의 오야시오 해역으로 갈수록 상대적으로 높은 생물량과 크기가 큰 동물플랑크톤이 우점 하였으며, 저위도 해역으로 갈수록 생물량이 낮아지고 크기가 작은 동물플랑크톤이 우점 하는 경향을 보였다. 특히, 정점 7에서는 5 mm 이상의 동물플랑크톤 생물량이 가장 높은 비율로 나타났는데 이는 고위도의 오야시오해역에서 5 mm 이상의 동물플랑크톤 비율보다 높은 수치로 위 결과에 대한 다양한 생지화학적인 변수와 생물량 간의 비교를 통한 추가 분석이 필요하다.

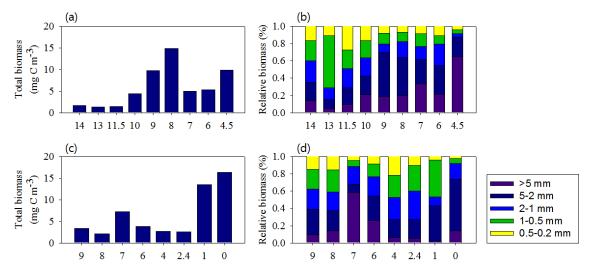


그림 3-3-2-4. 2017년 항차에서 측정된 전체 및 pico 사이즈 chlorophyll a의 농도.

(3) 쿠로시오 확장역 유광대 내의 식물플랑크톤 주요 지시색소 분포

2017년과 2018년의 2회의 조사에서 HPLC를 이용한 주요 지시색소 측정을 통해 식물플랑크 톤 주요 군집의 생체량 분포 패턴을 파악하였다. 빈영양 수괴의 영향이 큰 저위도 해역의 정점들로 주로 구성된 2017년 10월의 경우, 전선이 형성되었던 8번과 9번 정점을 중심으로 수평적인 분포 패턴의 차이가 두드러졌던 반면(Fig. 3-3-2-5; Fig 3-3-2-6), 고위도의 오야시오 해역까지 조사가 수행된 2018년 8월에는 오히려 깊이에 따른 수직적인 분포 패턴이 더욱 눈에 띄었다(Fig. 3-3-2-7; Fig 3-3-2-8).



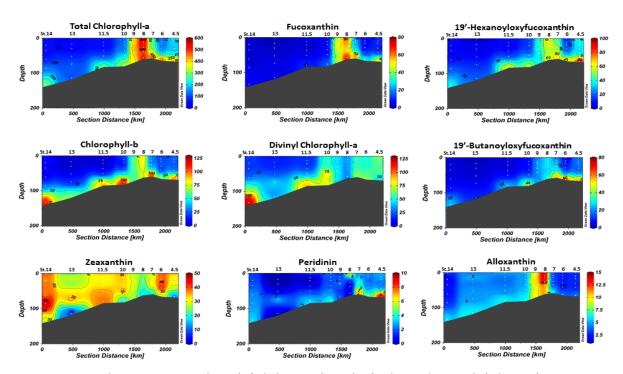


그림 3-3-2-5. 쿠로시오 확장역의 2017년 조사 간 식물플랑크톤 지시색소조성 (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19'-hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19'-but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin).

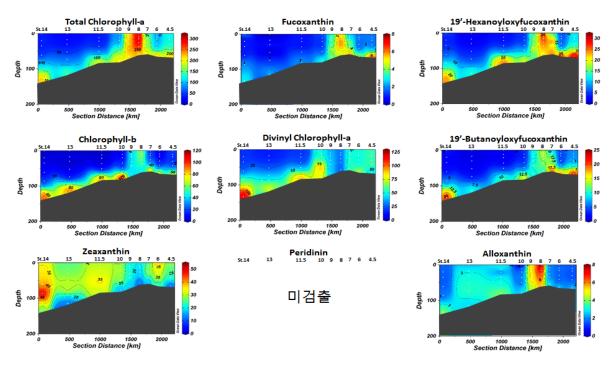


그림 3-3-2-6. 쿠로시오 확장역의 2017년 조사 간 pico 사이즈 식물플랑크톤의 지시색소조성 (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19'-hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19'-but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin).



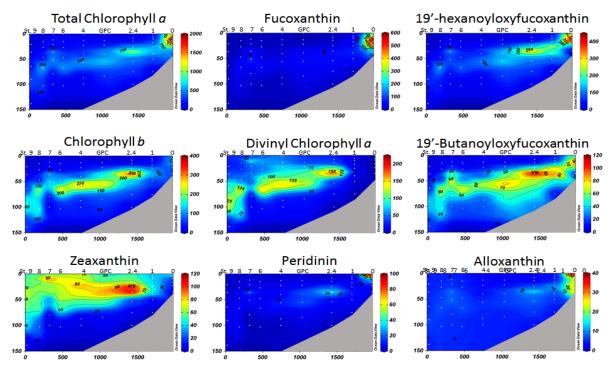


그림 3-3-2-7. 쿠로시오 확장역의 2018년 조사 간 식물플랑크톤 지시색소조성 (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19'-hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19'-but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin).

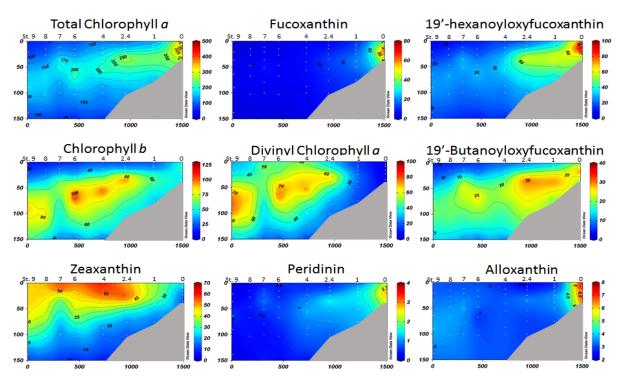


그림 3-3-2-8. 쿠로시오 확장역의 2018년 조사 간 pico 사이즈 식물플랑크톤의 지시색소조성 (ng m-3; chlorophyll-a, fucoxanthin, 19'-hex, chlorophyll-b, divinyl chlorophyll-a, 19'-but, zeaxanthin, peridinin, alloxanthin).

각각의 조사를 자세히 들여다보면, 2017년에는 전선역인 정점 8, 9에서 식물플랑크톤의 생체량 이 가장 높게 나타났으며, 이에 따라 각각 규조류(Bacillariophyceae), 착편모조류(Haptophyceae), 녹조 류(Chlorophyta), 그리고 은편모조류(Cryptophyceae)의 지시색소인 fucoxanthin, 19'-hexanoyloxyfucoxanthin (19'-hex), chlorophyll b, alloxanthin의 색소농도가 정점 8, 9에서 chlorophyll a의 농도와 함께 높 아지는 것을 파악할 수 있었다. 이는 전선역의 형성에 따른 심층수로부터 원활한 무기영양의 공급이 주된 원인으로 사료된다. 반면에 빈영양 환경에 대한 적응도가 높은 Prochlorococcus의 지시색소 divinyl chlorophyll a의 경우 다른 색소들과는 반대로 전선역에서 오히려 농도가 낮아 지는 현상이 관찰되었으며, 이에 따라 남조류(cyanobacteria) 전체의 농도를 대변하는 zeaxanthin 의 농도 또한 8, 9번 정점에서 상대적으로 감소하는 경향성을 나타내었다. 하지만 zeaxanthin의 감소 경향성은 단지 Prochlorococcus의 감소에 기인했을 뿐 남조류의 생체량에 대한 기여도가 큰 Synechococcus의 세포 수는 오히려 전선역에서 증가하였다. 반면 와편모조류(Dinophyceae)와 황록조류(Chrysophyceae)의 생체량을 나타내는 peridinin 과 19'-butanoyloxyfucoxanthin (19'-but) 의 농도는 정점 8, 9에서 크게 증가하지 않았다.

2018년에서는 난류역, 전선역, 전이역 간의 특성이 뚜렷한 2017년과는 달리, 쿠로시오와 오 야시오 해류의 영향에 따른 해역별(위도별) 수괴 특성 차이로 발생하는 생지화학적인 특성의 변화가 식물플랑크톤 주요 색소 분포를 결정한 것으로 보인다. 가장 고위도에 위치한 정점 0 에서 상대적으로 얕은 수심(16 m)에서 chlorophyll a 농도의 최대값이 나타났으며, 용승이 나타 난 정점 7을 제외하고 저위도로 갈수록 점점 더 깊어져 최남단 정점이었던 정점 9에서는 90 m의 수심에서 최댓값이 나타났다. 이러한 수직분포 특성은 깊이에 따른 무기영양의 공급과 광량의 차이에 의하여 나타난 결과로 보인다. 깊이에 따른 지시색소의 분포는 chlorophyll a농 도 분포의 경향과 유사하게 나타났지만 상대적으로 세포의 크기가 크고, 부영양한 환경을 선 호하는 규조류, 와편모조류, 은편모조류의 생체량은 저위도 해역으로 갈수록 급격히 감소하는 경향이 나타났다. 착편모조류와 황록조류 또한 급격한 감소는 보이지 않았지만, 정점 2 및 4 를 기점으로 고위도와 저위도에서의 분포 차이가 명확하게 나타났다. 반대로 녹조류와 남조류 는 오히려 정점 0에서는 생체량이 낮고, 정점 2 및 4에서 최대치를 나타내었다. 이는 이들이 상대적으로 빈영양 환경에 생존이 가능한 종이기 때문이기도 하지만, 일부는 낮은 수온에 대 한 적응도가 떨어지는 것을 원인으로 볼 수 있다. 정점 4보다 저위도의 해역에서는 전체적으 로 분류군별 생체량이 낮아지는 경향이 나타났다. 하지만 정점 7에서는 다른 저위도 해역의 정점들에 비하여 유광대 수심이 얕아지고, chlorophyll a 농도가 증가하였다. 이는 CTD 를 통 해 관측된 7번 정점의 해수 용승에 따라 fucoxanthin, peridinin, alloxanthin의 증가와 divinyl chlorophyll a, zeaxanthin, chlorophyll b의 감소가 함께 나타났다.

(4) Flowcytometry를 이용한 초미소식물플랑크톤 개체수

초미소식물플랑크톤의 군집 개체수는 2017년과 2018년에 중복되는 정점에서는 큰 차이를 나타내지 않았으며, 특히 중복 정점 중에서는 정점 7~9에서 상대적으로 많은 개체수를 확인할

.0

수 있었다. 2017년의 초미소식물플랑크톤 군집 중 *Cryptomonads*, nanoflagellates, picoeukaryotes 및 *Synechococcus*는 정점 8, 9에서 높게 관측되었으며, picoeukaryotes와 *Synechococcus*가 유사한 패턴을 나타내었다(Fig. 3-3-2-9). 고온/고염의 열대 저위도 해역에 높은 개체수로 분포하는 *Prochlorococcus*의 경우 많은 개체수를 나타내었으며, 특히 정점 11.5의 유광층 하부에서 가장 많은 개체수를 나타내었다.

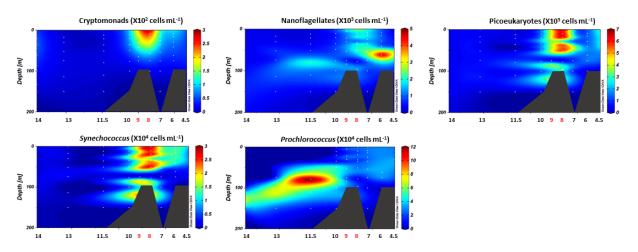


그림 3-3-2-9. 쿠로시오 확장역 2017년 조사 간 주요 식물플랑크톤 군집의 개체수 (<40 μ m, Cryptomonads, nanoflagellates, picoeukaryotes, Synechococcus and Prochlorococcus).

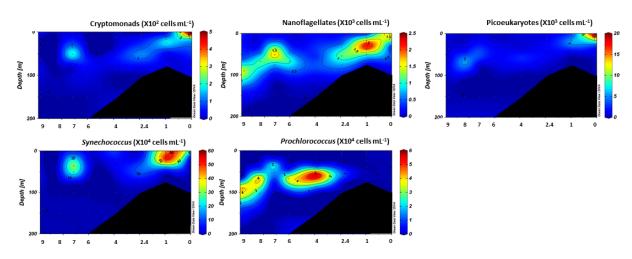


그림 3-3-2-10. 쿠로시오 확장역 2017년 조사 간 주요 식물플랑크톤 군집의 개체수 (<40 μ m, Cryptomonads, nanoflagellates, picoeukaryotes, Synechococcus and Prochlorococcus).

2018년의 초미소식물플랑크톤의 군집 개체수는 고위도의 오야시오 해역인 정점 0, 1에서 많은 수가 관측되었다(Fig. 3-3-2-10). 쿠로시오의 영향을 크게 받는 저위도의 정점들에서는 개체수가 적게 나타났지만, 그 중에서는 정점 7에서 상대적으로 많은 수를 나타내었다. 전 해역에서 *Cryptomonads* 와 picoeukaryotes가 유사한 패턴의 개체수 분포를 나타냈으며, 정점 0의 표층

0,

에서 각각 5.7×10^2 cells ml^{-1} , 3.8×10^4 cells ml^{-1} 로 가장 많은 개체수를 나타내었다. 또한, nanoflagellates와 Synechococcus가 유사한 패턴을 나타내었으며, 정점 1의 25 m에서 각각 4.9×10^3 cells ml^{-1} , 6.4×10^4 cells ml^{-1} 로 높은 개체수를 확인할 수 있었다. 이후 저위도로 갈수록 개체수가 감소하다 정점 7에서 다시 증가하였다. Prochlorococcus는 다른 분류군과는 반대로 쿠로시오 해역에서 많은 개체수가 측정되었고, 오야시오 해역에서는 거의 관찰되지 않았다. 정점 4의 56 m에서 1.4×10^5 cells ml^{-1} 로 가장 많은 개체수를 나타낸 지점을 기점으로 쿠로시오 해류의 영향을 받는 저위도 해역의 DCM층에서 높은 세포수가 관찰되었다. 다만, 저온/저염의 수괴 특성을 나타냈던 정점 7에서는 예외적으로 적은 세포 수가 나타났다.

(5) 쿠로시오 확장역에 출현하는 식물플랑크톤 종 분류 및 동정

2017년 10월 FlowCAM을 이용하여 관측한 결과, 전체 조사 정점에서 열대 및 아열대성 지표종들이 출현하였다. 주로 Rhizosolenia, Thalassiothrix, Thalassionema, Lioloma, Pseudoeunotia, Ceratium 속의 종들이 출현하였고, 정점 6에서 Chaetoceros, 정점 8에서 난수에 서식하는 Chaetoceros와 Bacteriastrum 속의 종들이 관찰되었다(Fig. 3-3-2-11).

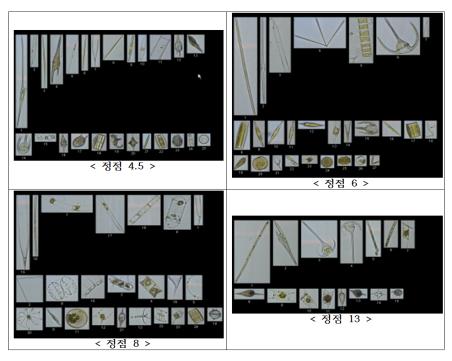


그림 3-3-2-11. 2017년 쿠로시오 확장역에서 FlowCAM을 활용하여 확인한 식물플랑크톤 형태학적 이미지 결과.

2018년 10월의 조사에서는 망목이 $20~\mu$ m인 식물플랑크톤 네트를 통해 채집한 규조류 cleaning을 이용하여 상각과 하각만을 남긴 식물플랑크톤을 현미경으로 관찰을 실시하였다. 그 결과 고위도에 위치한 저온/저염의 오야시오 해역에서는 냉수지표종인 Lioloma elongatum, Actiniscus pentasterias 등이 특징적으로 관찰 되었으나, 열대 및 아열대 해역의 지표종인

.C

Asteromphalus elegans, Chaetoceros lorenzianus도 함께 관찰되었다. Coscinodiscus marginatus와 같이 광온성의 생리적 특성을 지닌 종은 냉수대와 난류대를 가리지 않고 출현하였다. 고온, 고염의 쿠로시오 해류의 영향이 증가하는 저위도 지역의 경우, 열대 및 아열대 지표종의 출현이 증가하였는데, 규조류의 경우 Asteromphalus arachne, Bacteriastrum hyalinum, Chaetoceros messanensis, Fragilariopsis doliolus, Nitzschia 속과 Pseudo-nitzschia 속의 다양한 종들이 관찰되었고, 와편모조강에 속하는 Dinophysis, Ornithocercus 속의 종들이 관찰됨에 따라 냉수 지표종의 출현 빈도는 줄어들었다. 특징적으로 저위도 해역에 위치하고 있음에도 불구하고, 유광층하부에서 저온/저염 수괴의 용승에 따라 특징적인 물리적 특성을 보이는 정점 7은 총 23종의 식물플랑크톤 종이 출현하여 조사 정점 중 가장 많은 종이 관찰되었으며, 총 9개의 정점에서 총 46종의 규조류와 6종의 와편모조류의 출현을 확인하였다(Fig. 3-3-2-12; Fig. 3-3-2-13; Fig. 3-3-2-14). 이는 규조류가 우점 하는 것으로 이해될 수 있으나, 규조류의 형태적 분류 및 동정을 위해 사용하는 cleaning과정으로 인하여 와편모조강을 포함하는 다른 식물플랑크톤이 제거되었기 때문이며 분류 및 동정을 위하여 생시료의 분석과 전자현미경 등의 방법을 통한 더욱 정확한 분석을 추가적으로 진행할 계획이다.

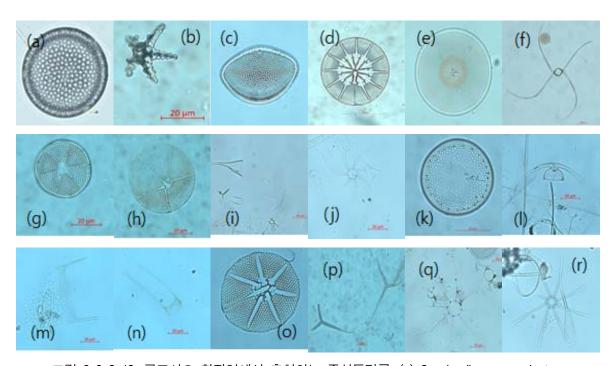


그림 3-3-2-12. 쿠로시오 확장역에서 출현하는 중심돌말류. (a) Coscinodiscus marginatus,

- (b) Actiniscus pentasterias, (c) Actinocyclus cuneiformis, (d) Asteromphalus elegans,
 - (e) Coscinodiscus granii, (f) Chaetoceros danicus, (g) Actinoptychus senarius,
 - (h) Asteromphalus arachne, (i) Rhizosolenia hebatata, (j) Bacteriastrum hyalinum,
- (k) Azpeitia barronii, (l) Chaetoceros peruvianus, (m) Hemiaulus sinensis, (n) Hemiaulus hauckii, (o) Asteromphalus roperianus, (p) Chaetoceros messanensis, (q) Bacteriastrum furcatum,

(r) Bacteriastrum comosum.

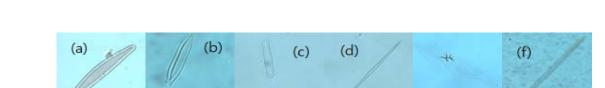


그림 3-3-2-13. Morphologic images of pennales in Kuroshio Extension. (a) Fragilariopsis doliolus, (b) Nitzschia sicula, (c) Nanoneis hasleae, (d) Thalassionema bacilare, (e) Pleurosigma directum, (f) Pseudo-nitzschia pungens.

(e)

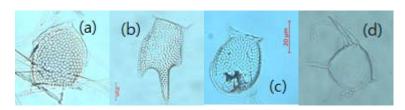


그림 3-3-2-14. 쿠로시오 확장역에서 출현하는 와편모조류 (a) Dinophysis acuta, (b) Dinophysis tripos, (c) Dinophysis acuminata, (d) Dinophysos schuettii.

(6) 분자생물학적 방법통한 식물플랑크톤/원핵생물 군집 조성 확인

원핵생물의 경우 2017년 및 2018년 모두 해양에서 우점하는 강인 Alphaprotebacteria, Betaproteobacteria, Deltaproteobacteria 및 Gammaproteobacteria가 속한 Proteobacteria문이 전 해역에서 우점 하였다. 또한 식물플랑크톤의 생체량이 높음에 따라 개체수가 증가하는 군집인 Flavobacteria가 2018년 저온/저염의 오야시오 해역인 정점 $0\sim2.4$ 의 유광층 해역 에서 최대 70%에 이를 정도로 높은 군집 조성을 나타내었으나, 그 외 해역에서는 매우 낮은 수준으로 존재하였다. 2017년도의 3 μ m 이하의 원핵생물은 3 μ m 이상의 원핵생물에 비하여 수심에 따른 군집변화가 뚜렷하게 나타났으나(Fig. 3-3-2-15; 표층: Alphaproteobacteria; 중층: Deltaproteobacteria; 저층: Gammaproteobacteria) 해역별 변화는 크게 나타나지 않았다. 이는 입자에 부착한 박테리 아로 여겨지는 3 μ m 이상의 박테리아 군집인 Gammaproteobacteria가 가장 우점 하였기 때문 이며, 이를 통해 자유생활형 박테리아의 조성과 차이를 보임을 알 수 있다.

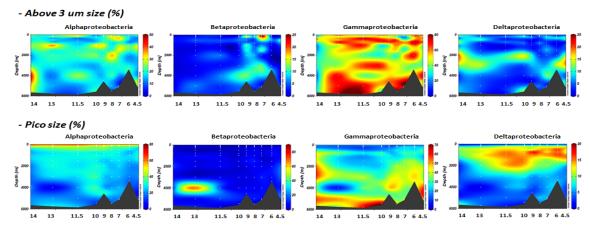


그림 3-3-2-15. 2017년 쿠로시오 확장역에서 Proteobacteria 군집의 분포 (Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria Deltaproteobacteria).

.0

2018년 쿠로시오 확장역에서 3 μ m 이상 및 이하 크기의 군집조성 모두 오야시오 해역인 고위도 지역에서 다른 해역에 비하여 Deltaproteobacteria의 상대적 기여도가 높았으며, 정점 2.4 전층 및 오야시오 해역을 제외한 대부분 해역의 저층에서 Gammaproteobacteria가 두드러지게 우점 하였다(Fig. 3-3-2-16). 이를 통하여 용승에 따른 부착성 박테리아의 우점을 시사 할수 있다. 3 μ m 크기 이하의 군집조성에서는 대부분의 해역 표층에서 Alphaproteobacteria가 우점 하였다. 앞서 정점 7에서 식물플랑크톤 색소량 및 진핵생물 개체수가 다른 정점과 차이가 크게 나타났으나, 원핵생물 군집은 정점 4 및 6에서 다소 차이를 보였다. 이 해역의 중층에서 Alphaproteobacteria가 높게 나타났으며, 표층에서 Alphaproteobacteria 보다 Gammaproteobacteria가 우점하였다.

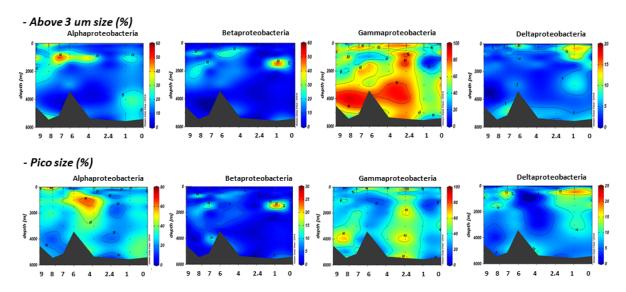


그림 3-3-2-16. 2018년 쿠로시오 확장역에서 Proteobacteria 군집의 분포 (Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria Deltaproteobacteria).

2017년의 남세균 군집 조성은 flow cytometry로 관측한 종조성과 유사한 모습을 확인할 수 있었다. 유광층에서는 전선역으로 판단되는 정점 7 및 8 해역에서 Synechococcus 보다 Prochlorococcus가 일시적으로 우점 하였으며, 전선역을 기준으로 북쪽 해역 및 정점 10에서 Synechococcus가 우점 하였다. 상대적으로 빈영양 해역인 남쪽 해역 및 대부분의 해역 중층에서 Prochlorococcus가 우점 하였다(Fig. 3-3-2-17).

3 μ m 이상 크기의 진핵생물은 전선역에서 Bacillariophyta, 전선역의 유광층 하부에서 Mamiellophyceae가 우점 하였으며, 그 외 대부분의 해역에서 Haptophyta가 우점 하였다. 3 μ m 이하 크기의 진핵생물은 전선역에서 Chlorophyta, Cryptophyta가 우점 하였으며, 그 외 대부분의 해역에서 Haptophyta가 우점 하였다(Fig. 3-3-2-18).

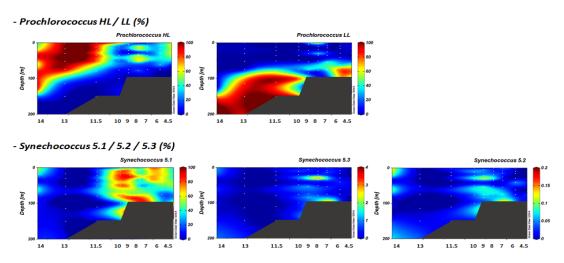


그림 3-3-2-17. 2017년 쿠로시오 확장역에서 초미세남세균 군집의 분포(Prochlorococcus high-light (HL), low-light (LL), Synechococcus 5.1, 5.2, 5.3)

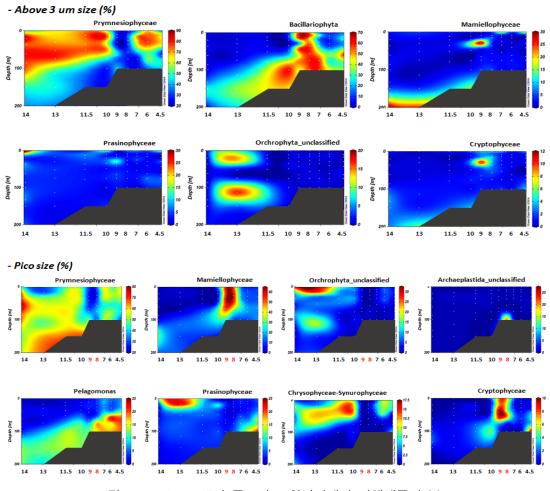


그림 3-3-2-18. 2017년 쿠로시오 확장역에서 진핵생물의 분포
(3 μ m 이상의 군집: Prymnesiophyceae, Bacillariophyta, Mamiellophyceae, Prasinophyceae, Orchrophyta_unclassified, Cryptophyceae; 3 μ m 이하의 초미소플랑크톤 군집: Prymnesiophyceae, Mamiellophyceae, Orchrophyta_unclassified, Archeplastida_unclassified, Pelagomonas, Prasinophyceae, Chrysophyceae-Synurophyceae, Cryptophyceae)



나. 일차생산력 및 탄소/질소 순환 특성

(1) 일차생산력 및 광합성 변수 분포

2018년 8월의 정점별 일간 일차생산력은 150.7~782.2 mg C m³ d¹로 오야시오 해류의 영향을 받는 해역에서 높고, 쿠로시오 해류의 영향을 받는 해역에서 낮았다(Fig. 3-3-2-19). 또한 저층의 용승현상이 일어난 정점 7에서는 식물플랑크톤 생물량의 증가에 따라 상대적으로 높은 일차생산이 나타났다. 대부분의 정점들이 chlorophyll a 값이 높은 DCM 층에서 생산력이 높게 나타난 수직 분포와는 달리, 생산력이 높았던 정점 0, 3 및 7에서는 표층에서 생산력이 가장 높고 유광층 하부로 갈수록 낮은 수직 분포를 보였다.

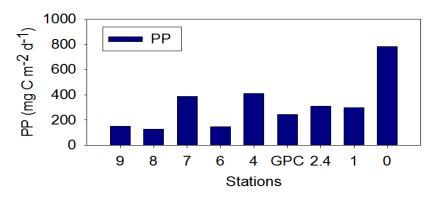


그림 3-3-2-19. 2018년 쿠로시오 확장역에서 정점별 일차생산력(mg C m-2 d-1) 결과.

더욱 세밀하게 다양한 수층에서 광화학적 광합성 변수를 측정하기 위한 In-situ FIRe의 결과는 Fig. 3-3-2-20에 도식화되어있다. 2017년 8월의 경우, 열대역과 전선역의 Fv/Fm 값(광합성효율 지시값)의 차이가 크게 나타났으며, 전선역에서 유광층 상부에서 높은 Fv/Fm 값이 나타난 것과는 달리 대부분의 정점들에서 유광층 하부의 생물량이 높은 수심에서 높은 Fv/Fm 값을 보였다. 2018년 8월은 대체적으로 유광층의 하부에서 Fv/Fm 값이 높게 나타나면서, 오야시오/쿠로시오 해역에 따른 위도 별 생물량/군집구조나 생산력과 다르게 증감하는 경향을 보였다. 이는 단편적으로 위도 별 정점의 광합성 효율에 차이가 크지 않으며, 일차생산력은 생물량에 좌우된다고 이해할 수 있으나, 더욱 심도 깊은 연구가 필요한 부분이다.

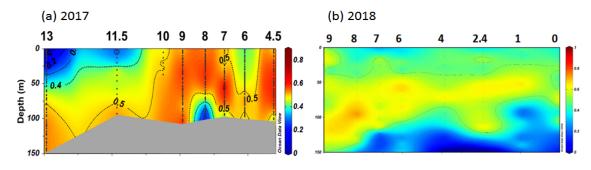


그림 3-3-2-20. T2017년, 2018년 쿠로시오 확장역에서 유광층 내의 광화학적 광합성 계수 Fv/Fm 변화.



(2) 박테리아 개체수 및 생산력

2017년 박테리아 개체수는 유광대 해역에서 약 8.0×10^5 cells ml^{-1} 로 높게 나타났으며, 특히 정점 7에서 10.1×10^5 cells ml^{-1} 로 가장 높게 측정이 되었다(Fig. 3-3-2-21). 수심 1,000 m 이내에서 박테리아의 개체수는 전선역의 북쪽에서 높아 상층으로부터의 유기물 공급(export production)이 클 가능성이 있다.

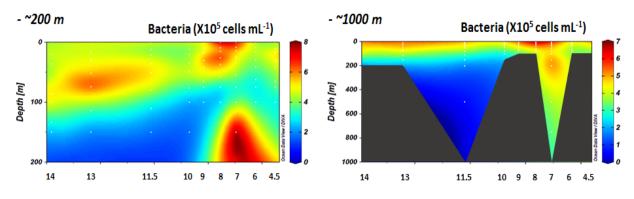


그림 3-3-2-21. 2017년 쿠로시오확장역에서의 Prokaryotic 생산양.

2018년의 경우, 오야시오 해역의 영향을 받는 고위도 정점 0~2.4의 표층에서 박테리아 개체수가 35.1×10⁵ cells ml⁻¹로 매우 높게 나타났으며, 유광대 해역에서 다른 정점보다 확연히 높게나타났다(Fig. 3-3-2-22).

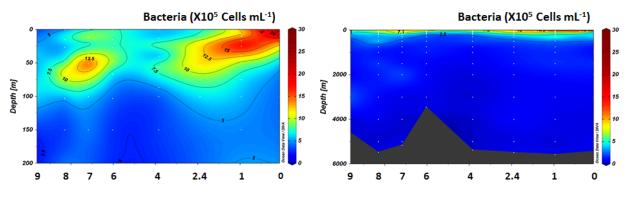


그림 3-3-2-22. 2018년 쿠로시오 확장역에서 정점별 박테리아 군집의 개체수.

2018년 쿠로시오확장역의 유광대내에서 적분한 박테리아 생산력은 고위도 해역인 정점 0에서 가장 높아 유기물 공급이 활발함을 시사하였다(Fig. 3-3-2-22). 정점 0에서 정점 4까지 일차생산력에 대한 박테리아 생산력의 비율이 12~17%로 낮게 나타난 반면, 저위도 정점에서는 50% 이상을 차지하여, 빈영양성 아열대해역에서 미생물 먹이망을 통한 에너지 흐름이 중요함을 시사하였다.



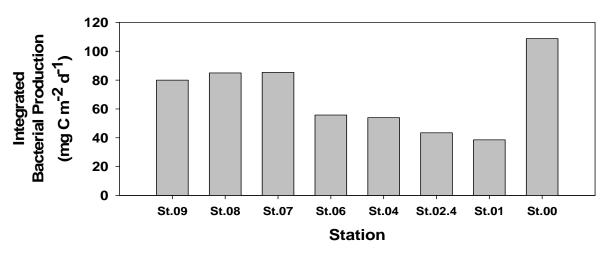


그림 3-3-2-23. 2018년 쿠로시오 확장역에서 정점별 박테리아 생산성.

(3) 쿠로시오 확장역의 신생산 및 재생산

2017년 10월 쿠로시오 확장역에서 질소 안정동위원소를 이용하여 신생산/재생산을 추정한 결과, 쿠로시오 확장역에서는 암모늄의 동화속도(ammonium uptake rates)가 가장 높게 나타났으며, 요소(urea uptake rates), 질산염(nitrate uptake rates) 동화속도, 질소고정속도(nitrogen fixation rates) 순으로 높게 나타났다(Fig. 3-3-2-23). 전선역이 위치한 정점 8에서 외부에서 기인 하는 영양염인 질산염 동화속도가 $60.4 \text{ mg NO}_3^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 열대역을 대표하는 정점 13에서 재순환되는 영양염인 암모늄과 요소의 동화속도가 각각 $265.0 \text{ mg NH}_4^{+1} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, $306.0 \text{ mg Urea m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보였다. 또한 일반적으로 저위도의 열대해역에서 우점 하는 질소고정자에 의한 대기 중 질소고정속도는 가장 저위도인 정점 13보다 정점 9에서 가장 높은 값($4.0 \text{ mg N}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)을 보였다.

대부분 저위도 해역에 위치한 정점들로 구성되어있는 2017년 10월의 경우, 빈영양의 쿠로시오 해류의 수괴 특성에 따라 평균 재생산이 91.1±0.1%이상으로 높게 나타났다. 하지만 전선역이 형성되는 정점 8에서 유광층 아래의 영양염이 풍부한 수괴가 유광층으로 유입되면서 신생산이 16.5% 까지 증가하는 결과를 나타냈으며, 대기 중의 질소 고정을 통해 빈영양의 대양역물질순환에 큰 영향을 줄 것으로 기대한 질소고정속도는 기대에 못 미치는 값을 조사기간 동안 나타냈다(Fig. 3-3-2-24). 하지만, 2017년에 측정한 암모늄, 질산염 및 요소의 동화율은 현장의 농도보다 월등히 높은 수준의 15N을 첨가하여 실험함으로써, 실제보다 과대평가되었음을유의할 필요가 있다. 2018년 조사에서는 kinetics 실험을 통해 이러한 문제점을 보완하고자 하였으며, 현재 자료는 분석 중에 있다.



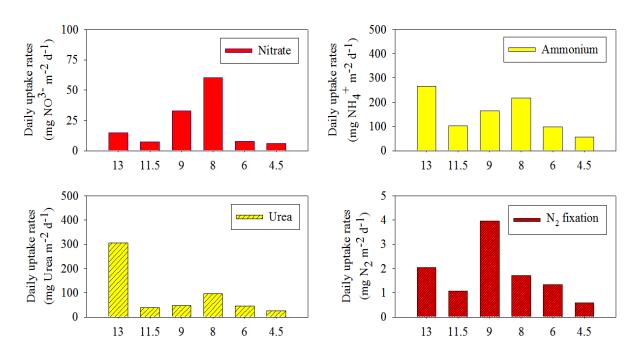


그림 3-3-2-24. 2017년 쿠로시오 확장역에서 정점별 유광층 내 질산염, 암모늄, 요소, 질소의 동화속도.

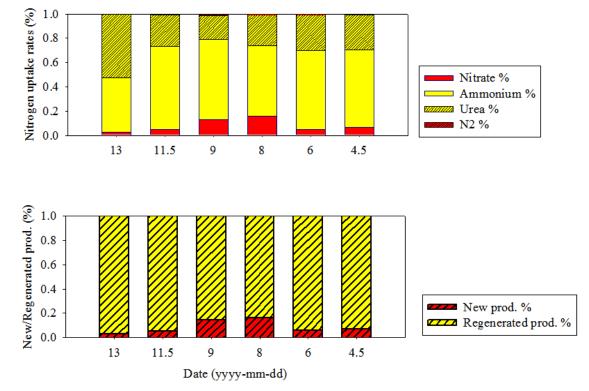


그림 3-3-2-25. 2017년 쿠로시오 확장역에서 질소동위원소별 동화속도 (위) 및 신생산/재생산 (아래) 결과.



(4) 안정동위원소를 이용한 먹이망 구조 연구

2017년 쿠로시오 확장역의 저위도 열대해역에서는 동물플랑크톤의 질소 안정동위원소 비가가장 낮은 값을 보였으며, 이는 열대해역에서 우점 하는 질소고정자로 기원한 유기물에 대한 의존도가 높음을 의미 한다(Fig. 3-3-2-26). 저위도 열대해역과 고위도의 전이역에서는 동물플랑크톤 크기에 따른 영양단계의 차이가 크지 않았던 반면, 전선역에서는 크기에 따른 영양단계의 증가가 관찰되었다. 또한 저위도 열대해역에서는 동물플랑크톤의 크기에 따른 먹이 선호도의 차이가 관찰되었다(Fig. 3-3-2-27). 위 결과를 토대로 2017년 쿠로시오 확장역의 먹이망조사 결과, 모든 정점에서 pico-, nano-size의 유기물은 중간단계 생물에게 이용된 후, 동물플랑크톤에 전달된 것으로 추측된다.

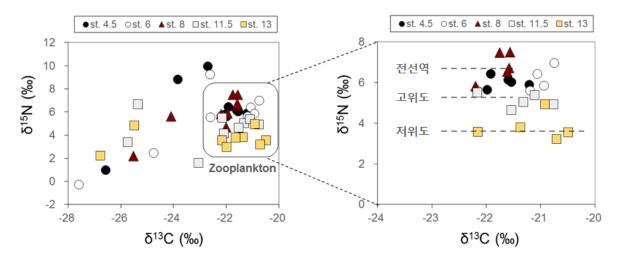


그림 3-3-2-26. 2017년 쿠로시오 확장역에서 안정동위원소를 이용한 정점별 생물의 먹이망 연구결과.

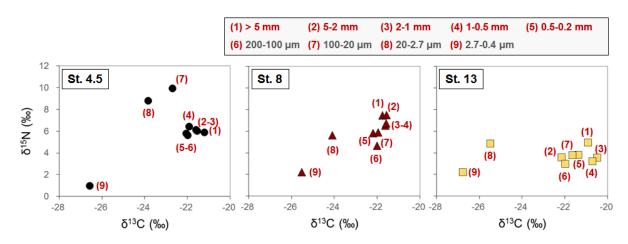


그림 3-3-2-27. 2017년 쿠로시오 확장역에서 안정동위원소를 이용한 크기별 생물의 먹이망 연구결과.

3. 침강 입자 플럭스

가. 서론

동아시아 사막에서 기인된 먼지(East Asian dust)는 주로 봄철에 편서풍의 영향으로 북서태평 양으로 이동된다(Lee et al., 2015). 동아시아 먼지는 질산염, 철과 같은 영양염을 포함한다. 이 에 동아시아 먼지는 북태평양에 유입되어 해양 일차생산성을 촉진시키는 것으로 알려져 있다 (Tan et al., 2013; Yoon et al., 2017). 북태평양 아열대 환류(North Pacifi Subtropical Gyre: 15°N to 35°N and 135°E to 135°W)해역 표층해수는 낮은 영양염 농도를 보인다(Dore et al., 2008; Karl and Letelier, 2008). 이에 이 해양에서 일차생산성은 동아시아 먼지 유입에 큰 영향을 받 는다(White et al., 2007). 북태평양 아열대 환류해역에서 봄철 황사시기에 인공위성으로 관찰된 일차생산성은 비황사시기에 비해 약 70% 높았다(Yoon et al., 2017). 이 증가된 일차 생산성은 해양 생물학적 탄소 펌프를 촉진시키는 것으로 알려져 있다. 하지만, 아직까지 동아시아 먼지 가 침강탄소 플럭스에 미치는 영향 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 북태평양 아열대 환류 해역에서 2017년 11월부터 2018년 8월까지 시계열 퇴적물 트랩을 설치하여 침강입자를 획득하였다. 특히 봄철 황사시기에 10일 간격으로 입자를 포집하였다. 이 연구의 목적은 빈영 양 해역에서 동아시아 먼지가 해양 생물 탄소 펌프에 미치는 영향을 평가함이다.

나. 연구방법

쿠로시오 확장역 주축(34°43.7531'N, 156°37.3075'E, 수심 5,536 m)에 위치한 정점 8에서 2017 년 11월부터 2018년 8월까지 시계열 퇴적물 트랩(McLane PARFLUX Mark 78H-21)을 수심 약 800 m와 4,000 m에 설치하였다(Fig. 3-3-3-1). 퇴적물 트랩의 침강입자 획득 주기는 월별, 혹은 10일 간격으로 설정하였다(Table 3-3-3-1). 퇴적물 트랩을 계류하기 전에 붕산나트륨(sodium borate)로 중화된 약 5% 포르말린 용액을 시료 병에 넣어 퇴적물 시료가 부패하지 않도록 하 였다. 침강입자 시료는 육안으로 관찰하여 1 mm 이상의 swimmer를 분리하였다(Figures 2-3-2 and 3). 이후 지화학 분석과 현미경 관찰을 위하여 McLANE사의 WSD-10(Wet Sample Divider-10) 을 이용하여 다섯 등분하였다. 다섯 등분한 시료 중 일부는 지화학 분석을 위하여 Milli-Q 증류 수로 세 번 이상 세척하였으며, 원심분리한 후에 동결건조 하였다. 건조된 퇴적물 시료의 무게를 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다. 총탄소(Total Carbon, TC) 함량과 총질소(Total Nitrogen, TN) 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba EA 1112 CNS elemental analyzer)를 이용하여 분석하였으며, 분석의 정밀도는 분석 시료들 사이에 약 10개의 표준시료를 사용하여 약 3%이하로 유지하였다. 무기탄소(Inorganic carbon, IC) 함량은 Coulometric 무기탄소 분석기(CM5014 model, UIC)를 이용 하여 측정하였으며, 분석의 정밀도는 약 1% 이하로 유지하였다. 입자상 유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC) 함량은 총탄소 함량에서 무기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 탄산칼슘(CaCO₃) 플 럭스는 무기탄소 농도에 탄산칼슘의 분자량 비(CaCO3/C)인 8.33을 곱하여 계산하였다.



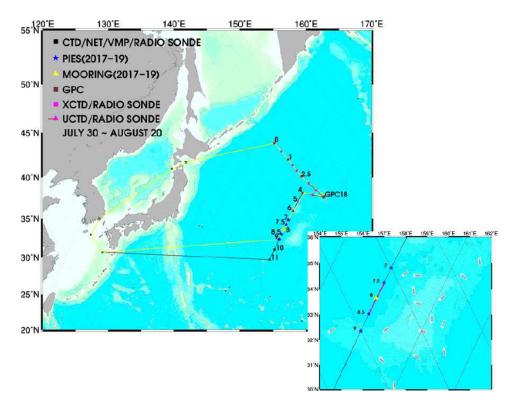


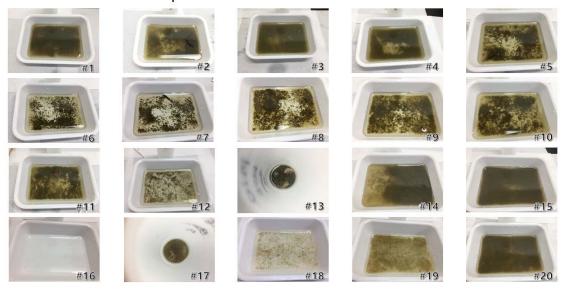
그림 3-3-3-1. 빈영양 북태평양 자이어에서의 관측 정점도.

표 3-3-3-1. 쿠로시오 확장역 계류선에서 퇴적물 채집 정보.

Bottle number	Open date (yyyy.mm.dd)	Duration (day)
1	2017. 11. 04. 01:00:00	27
2	2017. 12. 01. 01:00:00	31
3	2018. 01. 01. 01:00:00	31
4	2018. 02. 01. 01:00:00	10
5	2018. 02. 11. 01:00:00	10
6	2018. 02. 21. 01:00:00	8
7	2018. 03. 01. 01:00:00	10
8	2018. 03. 11. 01:00:00	10
9	2018. 03. 21. 01:00:00	11
10	2018. 04. 01. 01:00:00	10
11	2018. 04. 11. 01:00:00	10
12	2018. 04. 21. 01:00:00	10
13	2018. 05. 01. 01:00:00	10
14	2018. 05. 11. 01:00:00	10
15	2018. 05. 21. 01:00:00	11
16	2018. 06. 01. 01:00:00	10
17	2018. 06. 11. 01:00:00	10
18	2018. 06. 21. 01:00:00	10
19	2018. 07. 01. 01:00:00	31
20	2018. 08. 01. 01:00:00	31
21	2018. 09. 01. 01:00:00	30
22	2018. 10. 01. 01:00:00	



2017 KE-8 800m sample



2017 KE-8 800m swimmer

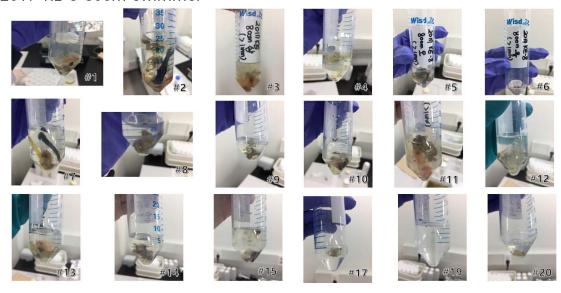
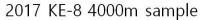


그림 3-3-3-2. 계류정점 수심 800 m에서 침강입자 채집기를 이용해 획득한 침전물.





2017 KE-8 4000m swimmer

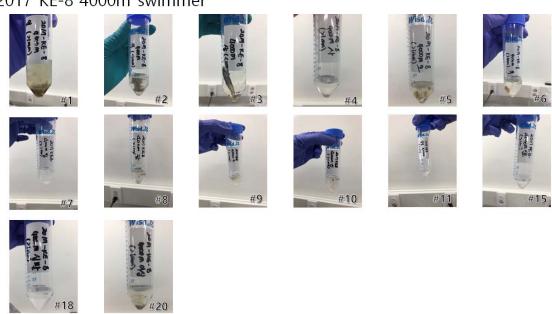


그림 3-3-3-3. 계류정점 수심 4,000 m에서 침강입자 채집기를 이용해 획득한 침전물.

2017년 11월부터 2018년 8월까지 수심 800 m와 4,000 m에서 관측된 침강입자 플럭스는 시기적 변동을 보였다(Fig. 3-3-3-2; Fig. 3-3-3-3).

0,

(1) 수심 800 m에서 측정된 침강입자 플럭스

총질량 플럭스(Total particle flux)는 0.5-248.1 mg m²day¹의 범위에서 변하였으며, 평균값은 88.0 mg m²day¹로 나타났다. 총질량 플럭스의 최대값(248.1 mg m²day¹)은 2018년 5월 중순 (5.11-5.20)에 나타났으며, 최소값(0.5 mg m²day¹)은 2018년 6월초(6.1-6.10)에 관측되었다(Fig. 3-3-3-4). 유기탄소(POC) 플럭스는 1.6-22.2 mg m²day¹의 변화범위를 보였으며, 2018년 5월 중 순(5.11-5.20)에 최대값(22.2 mg m²day¹)과 2018년 7월에 최소값(1.6 mg m²day¹)을 나타냈다 (Fig. 3-3-3-4). 탄산염(CaCO₃) 플럭스는 7.1-118.5 mg m²day¹의 범위에서 변화하였으며, 최고 탄산염 플럭스(118.5 mg m²day¹)는 2018년 2월초(2.1-2.10)에 관측되었고, 최소값(7.1 mg m²day¹)은 2018년 7월에 나타났다(Figure 2-3-4). 총질소(TN) 플럭스는 0.2-3.2 mg m²day¹의 변화 범위를 보였으며, 최대값(3.2 mg m²day¹)은 2018년 5월 중순(5.11-5.20)에 관측되었고, 최소 값(0.2 mg m²day¹)은 2018년 7월에 나타났다(Fig. 3-3-3-4).

(2) 수심 4,000 m에서 측정된 침강입자 플릭스

총질량 플럭스는 0.02-125 mg m²day¹의 범위에서 변하였으며, 평균값은 44.3 mg m²day¹로 나타났다(Fig. 3-3-3-4). 총질량 플럭스의 최대값(125 mg m²day¹)은 2018년 2월초(2.1-2.10)에 나타났으며, 최소값(0.02 mg m²day¹)은 2018년 7월에 관측되었다(Fig. 3-3-3-4). 탄산염 플럭스는 0.5-67 mg m²day¹의 범위에서 변화하였고, 최고 탄산염 플럭스(67 mg m²day¹)는 2018년 2월초(2.1-2.10)에 관측되었고, 최소값(0.5 mg m²day¹)은 2018년 4월 중순(4.11-4.20)에 나타났다 (Fig. 3-3-3-4).

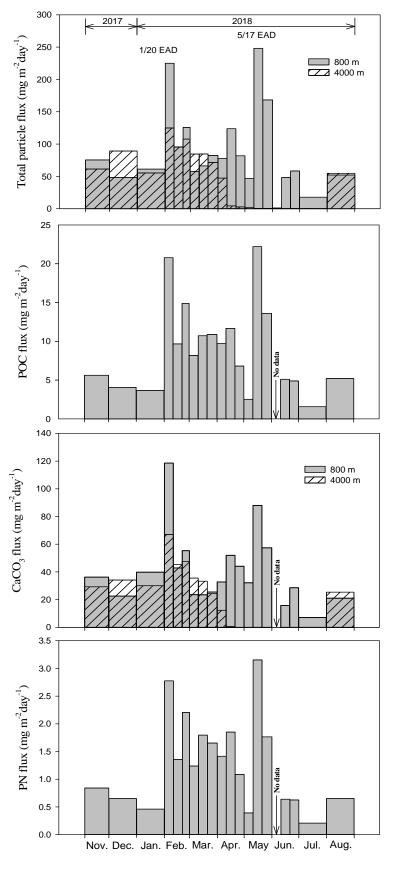


그림 3-3-3-4. 계류정점 800 m, 4,000 m에서의 입자 플럭스.

제4절 수층구조와 해양 혼합 특성

1. 미세난류구조 관측 및 해양 혼합

가. 혼합역에서 혼합특성 파악

쿠로시오 확장역에서 정량적인 연직 혼합을 파악하기 위해 2017년과 2018년 항해 중 정선 관측 연직 미세구조 관측장비(VMP-500, Vertical Micro Profiler-500, Rockland Scientific International Inc.)를 이용하여 관측을 수행하였다. VMP-500 장비는 미세구조 (수 mm)의 유속전단 구조를 관측한 후 등방성 가정 하에 난류를 직접적으로 관측하는 장비이다. 관측에 사용한 VMP-500 장비는 해수 내에서 약 0.6~0.7 m/s 속도로 자유낙하하며, 선박에 설치된 컴퓨터와 케이블로 연결되어 실시간 자료 획득이 가능하다. VMP-500 장비를 통해 얻을 수 있는 가장 기본적인 자료는 512 Hz의 유속 전단자료로, 이를 이용하여 난류에너지 소산율과 확산 계수를 계산할 수 있다. 난류에너지 소산률은 3차원적 등방성 가정 하에 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{15}{2}\nu \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} = \frac{15}{2}\nu \int_{k_1}^{k_2} \psi(k)dk$$

 ν 는 동점도, $\frac{\partial u}{\partial z}$ 는 연직방향의 유속전단, k는 파수, ψ 는 유속전단의 스펙트럼이다.

2017년에는 쿠로시오 확장역 해역의 총 9개 정점에서 연직미세구조 관측장비를 이용한 난 류 구조 관측 수행하였다. 모든 정점에서 표층부터 수심 약 400 m까지 유속전단 관측을 통한 난류 구조 직접 관측하였다. VMP-500은 선박에 연결된 케이블을 통해 운용되기 때문에, 상층 해류가 강한 해역에서는 장비가 해류에 의해 선박에서 멀리까지 이동한다. 따라서 모든 정점 에서 동일한 최대 수심을 관측할 수는 없다. 관측 결과, 정점 13을 제외한 나머지 모든 정점 의 상층에서 10^{-7} kg/m³ 이상의 비교적 강한 소산율이 관측되었다. 모든 관측 정점에서 소산율 인 표층이 가장 강하고, 수심 80~120 m까지 지속적으로 감소, 보다 깊은 층에서는 10^{-10} ~ 10^{-9} kg/m³ 의 범위다.



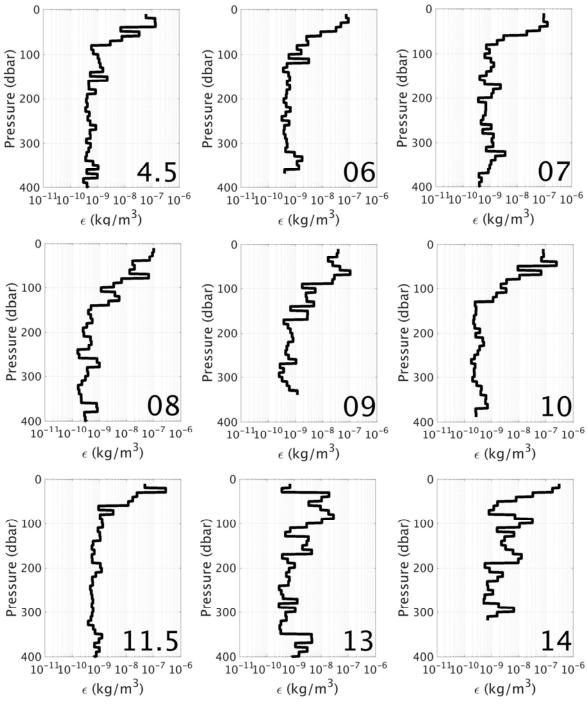


그림 3-4-1-1. 2017년 (1차년도) 정점 별 연직 난류 소산율 분포.

2018년에는 총 10개 정점에서 연직미세구조 관측장비를 이용한 난류 구조 관측 수행하였다. 2017년과 마찬가지로 표층부터 수심 약 400 m까지 유속전단 관측을 통한 난류 구조 직접 관측하였다. 2018년의 관측에서도 상층에 주로 강한 난류소산율이 나타나고, 하층에서는 약하다. 하지만 2017년 관측과 비교하였을 때, 100 m 보다 깊은 층에서의 범위 (10⁻¹⁰~10⁻⁹ kg/m³)는 유사하지만, 상층에서 난류 소산율은 정점 2.4, 8.5를 제외한 나머지 정점에서는 비교적 약하다.



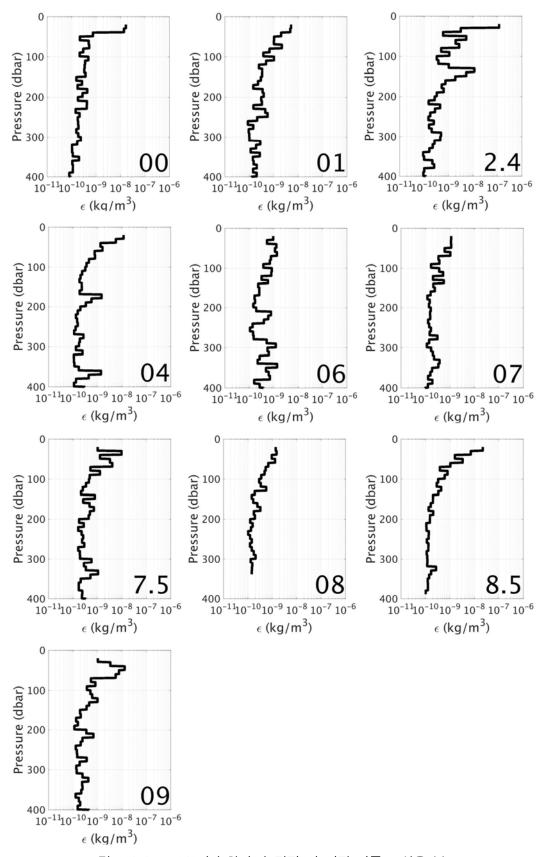


그림 3-4-1-2. 2018년 (2차년도) 정점 별 연직 난류 소산율 분포.



나. 직간접적 방법을 이용하여 대상해역의 해양혼합특성 규명-1

수층 내에서의 혼합 정도를 파악하기 위해 연직 확산 계수를 계산하였다. 연직 확산 계수를 추정하기 위해 Osborn (1980)과 Shih et al. (2005)에서 제안한 2가지 방법을 사용하였다. Osborn (1980)은 연직 확산계수가 소산율과 성층의 비율 그리고 혼합효율의 곱으로 나타내어 지는 식을 제안하였으며($K_z = \alpha \epsilon/N^2$, α 는 혼합효율=0.2, N^2 는 수층 안정도), 이는 가장 일반 적으로 사용되는 모수화 방법이다. Shih et al. (2005)는 실험결과에 기초하여 연직 확산계수가 난류 강도(ϵ/vN^2)에 따라 달라지는 모수화 방법을 제안하였다. 또한 Shih et al. (2005)의 연구에서 난류의 강도는 분자 확산영역 (ϵ/vN^2 <7), 중간 영역 ($7<\epsilon/vN^2>100$)으로 나누어지며, 난류 활동 영역에서는 $K_z=2v(\epsilon/vN^2)^{1/2}$ 와 같다.

본 연구에서는 직접 관측한 난류의 연직 확산 모수화 방법 뿐 아니라, 간접적으로 추정할수 있는 난류에 대한 연직 확산을 모수화 하였다. 간접적으로 난류를 추정할수 있는 방법 중대표적인 방법은 밀도구조를 이용하는 방법이다. Thorpe (1977)은 성층 해양에서 난류에 의해발생한 밀도 역전으로부터 그 규모를 계산하여 난류의 정도를 추정하는 방법인 Thorpe scale을 제안하였다. 본 연구에서는 각 연도별 정점의 밀도 프로파일에서 밀도 역전으로부터 계산한 Thorpe규모를 계산하였고, 앞서 언급한 2가지의 연직 확산 모수화 (Osborn 방법, Shih 방법)를 적용하여 직접 관측한 난류의 연직 확산 모수화 결과와 비교하였다.

2017년 총 9개 정점에서의 VMP-500과 CTD로부터 직간접적으로 계산한 연직확산 프로파일을 함께 나타냈다. 먼저 직접관측의 경우 Osborn방법과 Shih 방법보다 중에 상층에서는 Osborn 방법이 더 크게, 난류소산율이 낮은 중층 아래에서는 Shih 방법이 더 크다. 정점 6, 7, 9, 10, 14에서는 10^{-2} m²/s 이상의 강한 연직 확산이 나타났다. 난류 소산율과 마찬가지로 상층에서만 강한 연직 확산이 나타나고, 100 m 아래에서는 연직확산의 정도가 약하다.

CTD자료로부터 간접적으로 계산한 난류 확산 프로파일과 비교하였을 때, 정점 CTD의 밀도로부터 간접적으로 계산한 방법이 대부분의 정점의 상층에서 난류확산을 과대모의하며, 과대모의는 Osborn 방법을 사용하였을 때 더 크게 나타났다. Shih 방법을 사용하였을 때 절대 값의 범위나 경향성이 유사하다.

2018년 총 10개 정점에서의 VMP-500과 CTD로부터 직간접적으로 계산한 연직확산 프로파일을 함께 나타냈다. 먼저 직접관측의 경우 2017년도의 경우와는 다르게 Osborn방법과 Shih 방법보다 중에 전체 프로파일에 걸쳐 Shih 방법이 더 크게 나타났다. 하지만 난류 소산율과 마찬가지로 상층에서는 연직확산의 정도가 10^{-5} m²/s 정도로 높지 않다. 이는 2017년의 가을철 관측과는 다르게 쿠로시오 확장역의 해류의 범위가 변화하였고, 여름철 관측의 상층 성층의 영향이 크게 작용한 것으로 보인다.

2017년의 경우와 마찬가지로 CTD자료로부터 간접적으로 계산한 난류 확산 프로파일과 비교하였을 때, 정점 CTD의 밀도로부터 간접적으로 계산한 방법이 대부분의 정점의 상층에서 난류확산을 과대모의하였다. 그리고 과대모의는 Osborn (1980) 방법을 사용하였을 때 더 크게나타났다. Shih et al. (2005) 방법을 사용하였을 때 절대 값의 범위나 경향성이 유사하다.



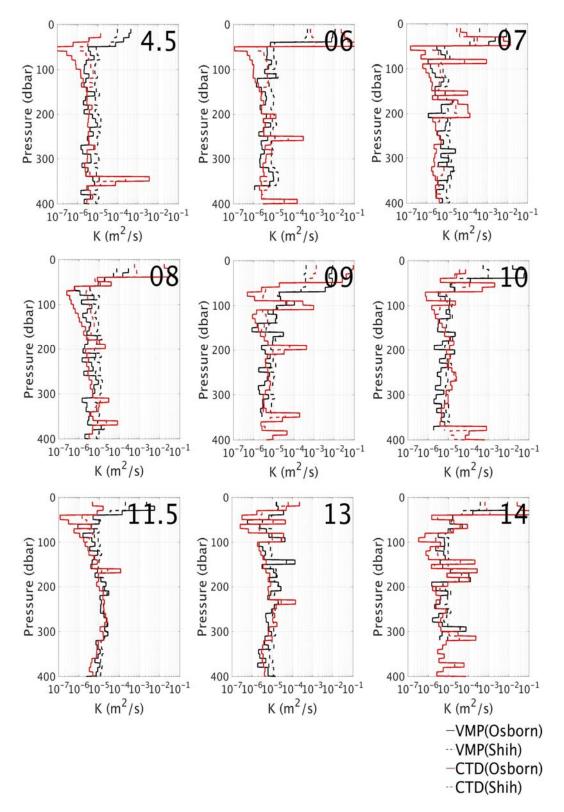


그림 3-4-1-3. 2017년 (1차년도) 정점 별 직접 관측 (검은색) 및 간접 추산 (붉은색) 연직 확산계수 분포. 실선과 점선은 각각 Osborn method와 Shih method에 의해 계산된 연직 확산 계수.

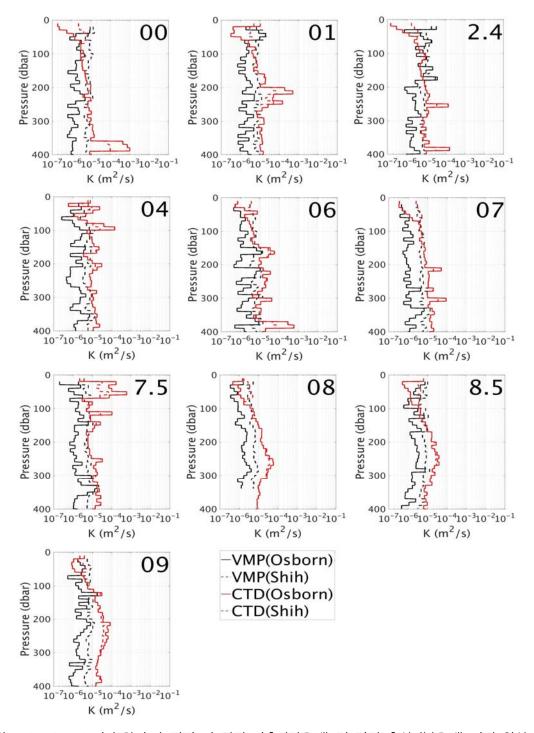


그림 3-4-1-4. 2018년 (2차년도) 정점 별 직접 관측 (검은색) 및 간접 추산 (붉은색) 연직 확산계수 분포. 실선과 점선은 각각 Osborn method와 Shih method에 의해 계산된 연직 확산 계수.

관측한 CTD 물성자료를 이용하여 간접적으로 혼합을 추산하는데 있어 중요한 점은 관측 자체에 의한 오차를 최소화 하는 것이다. 앞선 2개 년도의 직접관측 결과와의 비교에서, 2017년은 수층 내 확산계수의 절댓값은 유사하지만 대부분의 정점의 좁은 수심구간에서 급격하게 튀는 수치가 계산되었다. 반면에 2018년의 경우, 수층 내 확산계수의 절댓값이 다소 크게 계

산되었지만 튀는 수치는 많지 않다. 수층 내에서 튀는 확산수치를 만들어내는 요인은 수층 내 밀도의 급격한 변화이며, 이는 앞선 정점관측 LADCP 결과에서 보인 CTD frame의 기울기와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 간접 혼합 계산에는 정선 관측 CTD 자료 중 표층에서 저층으로 하강하며 획득한 자료를 사용한다. 2017년의 경우 정선 관측시 사용한 CTD frame이 깊은 수심으로 하강하면서 기울어진 정도가 전 정점 평균 10°이상이고 하강 중에도 계속적으 로 그 각도가 변하였다. 이로 인해 대부분의 정점에서 CTD의 자료 품질이 2018년과 비교하였 을 때 좋지 않다. 이와 같은 CTD frame의 기울기는, CTD로부터 획득한 물성 결과를 수 m 이 상의 연직 규모로 확인하고자 하는 경우에는 그 영향에 대한 문제가 크지 않을 수 있다. 하지 만 혼합을 추산하고자 하는 경우에는 보다 작은 물성 규모 (수십 cm 이하)로부터 계산을 수행 하는 만큼 기계나 관측오차에 대해 민감함을 보인다. 따라서 추후 정선 CTD자료로부터 얻은 밀도를 이용하여 혼합 정도를 추산하고자 하는 경우, 관측 전 시스템을 점검하고 CTD frame 의 하강 정도를 확인하는 것이 권고된다.

다. 직간접적 방법을 이용하여 대상해역의 해양혼합특성 규명-2

밀도구배에서 위치에너지가 운동에너지로 변하는 것을 가정하는 Thorpe(1977)방법을 외에 해양 내부에서 내부파가 깨짐으로써 생기는 에너지전위를 가정한 GM(Garrett and Munk, 1975) model을 사용하여 관측정점에서의 수직혼합을 간접적으로 계산하였다. GM model은 내부파가 깨지면서 수직혼합이 생성되며 나타나는 수직 밀도/유속구조에서 O(1 m)이상의 파장을 이용해 수직난류소산율을 유추하는 방법으로 다음과 같이 정의된다 (Gregg et al. 2003, Kunze et al. 2006).

$$\begin{split} \epsilon &= \epsilon_0 \frac{\overline{N^2}}{N_0^2} \frac{<\xi_z^2>^2}{<\xi_{zGM}^2>} h(R_\omega) L(f,N) \\ h(R_\omega) &= \frac{1}{6\sqrt{2}} \frac{R_\omega(R_\omega+1)}{\sqrt{R_\omega-1}} \\ L(f,N) &= \frac{f \arccos h(\overline{N}/f)}{f_{30'} \mathrm{arccos} h(N_0/f_{30'})} \\ R_\omega &= \frac{V_z^2}{\overline{N^2} < \xi^2>} \end{split}$$

 ϵ : 난류소산율, ξ : strain, V_z : shear, R_ω : shear/strain variance ratio

GM model은 Thorpe방법보다 수직적으로 성긴 자료를 이용하여 소산율을 계산할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 내부파 깨짐을 가정하고 얻은 경험식이기 때문에 내부파의 깨짐 외에 다 른 현상에 의해 생기는 소산율을 계산 못하는 한계를 갖는다.

직접적인 미세유속구조 측정을 통해 얻은 소산율과 물성 및 유속 관측을 통해 얻은 자료에 서 GM model을 통해 얻은 소산율을 비교해 보았다. 표층에서 수심 100 m까지에 이르는 상층 부에서는 두 소산율의 크기 및 분포가 잘 맞는다. C07, C08, C10, C13, C14 정점에서는 수심

.0

100 m 이하의 지역에서도 $O(1)\sim O(10)$ 의 비율로 소산율의 크기와 분포형태가 잘 맞는다. 하지만 그 이외의 C04.5, C06, C09, C11.5 정점에서는 크기의 비율이 O(100)이상으로 크게 차이가나며 분포형태 또한 맞지 않는다. 이는 유속관측의 부재 및 GM model의 이론적 한계에 의해서 생기는 오차이다. 관측 당시 LADCP자료의 이상으로 R_ω 를 기존 연구(W halen et al. 2015)에서 사용한 값을 사용하였는데 R_ω 시공간 적으로 변하는 값이다. 따라서 보다 정확한 비교를 위해서는 유속과 물성자료가 동시에 관측되어야 한다. 위에서 언급했듯이 GM model은 내부파 깨짐 현상에 의한 에너지 전위를 가정하기 때문에 전층에 걸쳐 동일하게 나타나는조석 및 해류의 변화에 따른 에너지 소산은 모수화 하지 못한다.

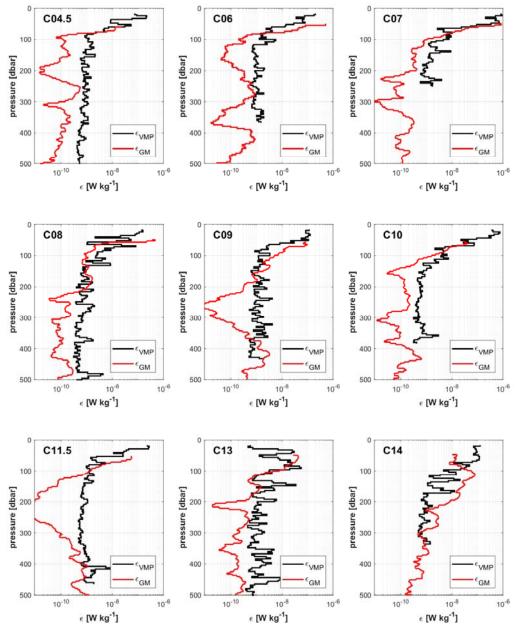


그림 3-4-1-5. 직간접 방법을 통한 난류 소산율 분포. 직접관측(VMP, 검정색), 간접관측(GM model, 빨강색).



2. 수충 구조 영상화

가. 탄성파 해양학 자료취득 음원

이번 탄성파해양학 탐사는 수층 정밀특성을 구명하기 위한 목적으로 수행되었으며, 이를 위 해 탄성파탐사에서 주로 해저 천부 고해상 탐사를 위해 사용되는 스파커음원을 사용하였다. 스파커 음원의 에너지는 강한 에너지의 경우 S/N가 높아지는 반면, 발파간격이 길어져 수평해 상도가 낮아질 수 있으며, 약한 에너지는 S/N 비가 낮은 반면 수평해상도를 높일 수 있다. 그림 3-4-2-1은 타지역에서 스파커 에너지를 5000J 및 2000J을 사용하여 얻어진 SO 신호를 비교한 그림으로 검은색 화살표로 표시한 SO 신호가 5000J 에서 보다 뚜렷히 나타남을 알 수 있다.

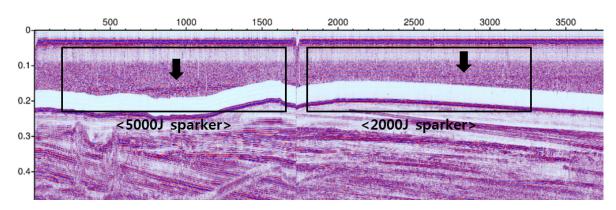


그림 3-4-2-1. 송신원 에너지에 따른 SO 신호 비교.

일반적인 경우 수층 구조는 수평방향으로 급격히 변하는 경우가 드물어, 본 탐사에서는 5000J 에너지의 스파커를 6초 간격으로 발파하여 탄성파자료를 취득하였다.

나. 탄성파 탐사 자료 획득

2017년 11월 5일 22:00에서 11월 6일 13:00까지 약 15시간 동안 탄성파 탐사를 수행하였다. 측선의 시작 위치는 36°4'N-158°22'E이고 종료위치는 34°52'N-158°8'로 약 132.3 km의 길이였 다. 송신원으로는 5000J의 에너지를 가지는 SIG Pulse L5 Sparker 장비를 사용하였고 수신기로 는 Geometrics 사의 analog 24 channel streamer를 사용하였다. 탄성파 탐사 중 해양 물리 자료 도 직접 취득하였으며 탐사 라인을 따라 CTD 1회, XCTD 3회, XBT 5회를 수행하였다. 그림 3-4-2-2에 탄성파 탐사 측선 및 탄성파 탐사시 선미 스트리머 배치 모습을 나타내었다.



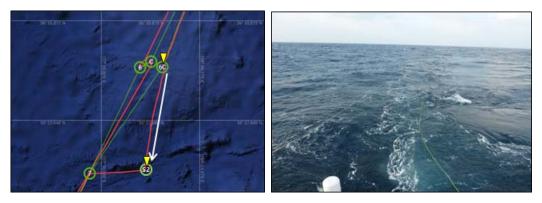


그림 3-4-2-2. 6C~S2 까지의 탄성파 탐사 측선(좌) 및 선미 스트리머 배치(우).

마. 나. 탄성파 탐사 자료 처리 및 수층 구조 영상화

탄성파 탐사를 통해 취득한 탄성파 자료는 그림 3-4-2-3에 나타낸 절차에 따라 처리되었다.

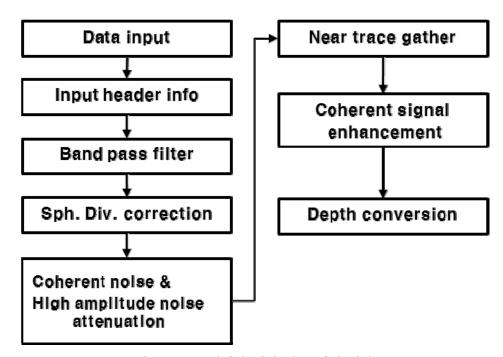


그림 3-4-2-3. 탄성파 탐사 자료 처리 절차도.

우선 탄성파 탐사 자료의 좌표, CDP 번호, 샘플링 간격 등과 같은 헤더 정보를 입력하였다. 그리 특정 속도 값을 가지는 신호를 제거하는 방법인 F-K 필터를 통해 강한 전기 노이즈를 제 거하였다. 그림 3-4-2-4는 주파수 필터, 구형 발산 보정, F-K 필터를 적용하기 전·후의 공통 송신원 모음이다.



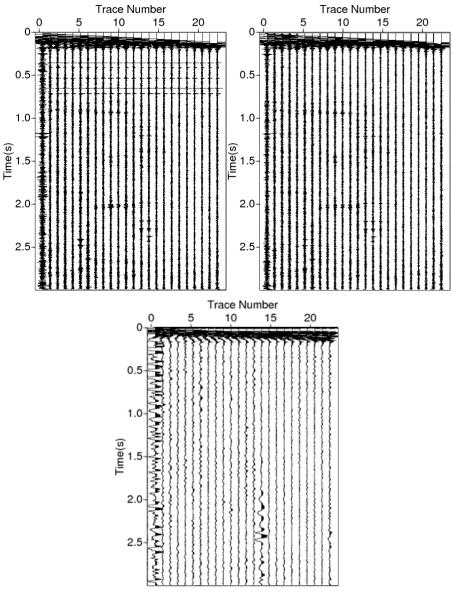


그림 3-4-2-4. 자료 처리 전(좌), Band pass 필터 및 구형 발산 보정 적용 후(중), F-K 필터 적용 후(우) 공통 송신원 모음.

공통 송신원 모음 상에서의 자료 처리를 수행한 후 공통 수신기 모음 영역으로 변환하여 추가적인 처리를 수행하였다. 탐사 수행 시 파고가 높고 바람이 매우 강하여 탄성파 탐사 자료의 질이 낮았기 때문에 일반적인 NMO 보정 및 중합을 수행할 경우 수층 단면의 신호 대잡음 비가 매우 낮았기 때문에 각 공통 수신기 모음 상에서 일관성 신호 향상을 위한 자료처리를 수행한 후 중합 단면을 도출하였다. 그림 3-4-2-5는 일관성 신호 향상 자료 처리 후 깊이 변환을 수행한 공통 수신기 모음이다. 신호가 들어오는 최초 시간을 오프셋과 음파 전달속도를 이용하여 보정해주었기 때문에 수신기마다 존재하던 기록 시간 딜레이는 보정된 상태이다. 수신기 번호가 커질수록 송신원과의 거리가 멀어지며 에너지의 통과 깊이가 감소하지만 각 수신기에 기록된 신호들은 서로 일관성 있는 형태를 보인다.

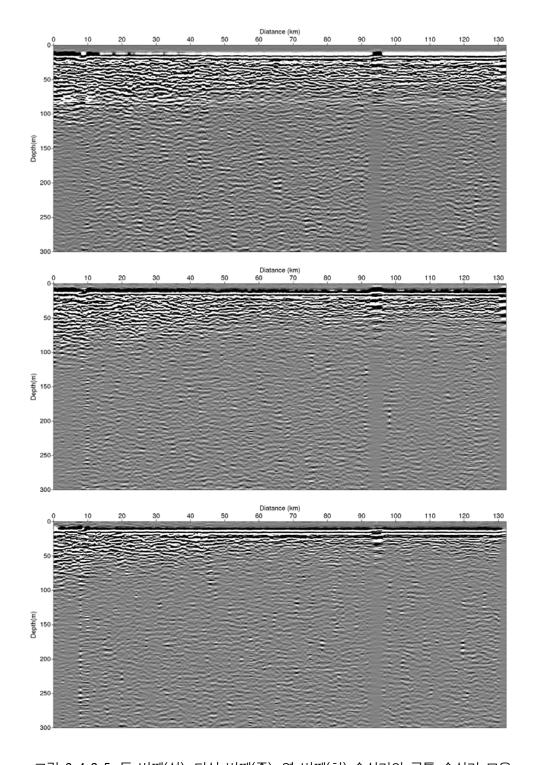


그림 3-4-2-5. 두 번째(상), 다섯 번째(중), 열 번째(하) 수신기의 공통 수신기 모음.

최종 자료 처리 결과 도출된 중합 단면도를 그림 3-4-2-6에 나타내었다. 탐사 초반 0~10 km 근처에서는 에너지의 투과도가 높으며 약 100 m 깊이까지 강한 반사파가 등장하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 탐사 중반 (50~100 km 거리)에는 반사파가 발생하는 수층의 깊이가 얕아져서 약 50 m 깊이 까지만 반사파가 발생한다. 130 km 거리 근처에서는 다시 반사파 발생 깊

이가 증가하지만 약 60~70 m 정도의 깊이가 반사파가 발생하는 최대 깊이인 것으로 확인된 다. 반사파가 발생하는 곳의 위치는 큰 온도차이가 존재하는 혼합층-수온약층의 경계일 가능 성이 크고 미세구조에 의해서도 반사파가 발생하기도 한다. 아래 중합 단면을 통해 36°34′ 근처에서는 수온 약층이 약 70~100 m 사이에 등장하고 탐사를 진행하여 남쪽으로 내려올수록 혼합층의 깊이가 얕아져서 약 34°에서는 혼합층-수온약층의 경계가 약 50 m 정도에서 형성되 는 것을 확인 할 수 있다.

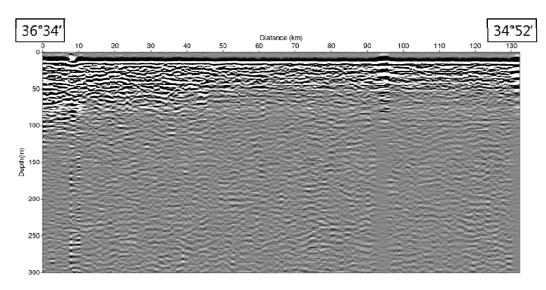


그림 3-4-2-6. 중합 단면도.

아래 자료(그림 3-4-2-7)는 해양 물리 관측 장비(CTD, XBT, XCTD)를 통해 얻은 수온 (파란색), 음파 전달 속도(빨간색), 염분(녹색) 결과이며 해양 물리 관측 자료로부터 반사 계수를 도출한 후 중합 단면도와 함께 도시하여 (그림 3-4-2-8) 해양 물리 관측 장비로부 터 얻은 실제 수층 구조와 탄성파 해양학으로 얻은 수층 단면이 얼마나 일치하는지 확인 하고자 하였다.

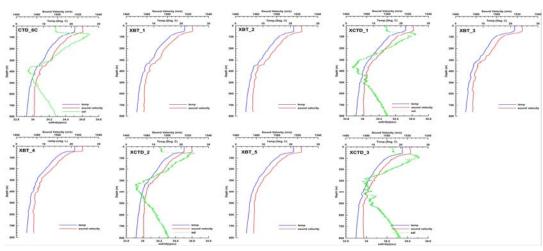


그림 3-4-2-7. CTD, XBT, XCTD 관측 자료.

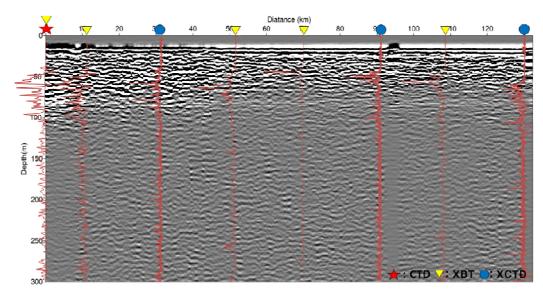


그림 3-4-2-8. 중합 단면도와 반사계수.

그림 3-4-2-9를 통해 CTD, XBT, XCTD와 같은 해양 물리 장비를 통해 직접 관측한 결과와 탄성파 중합 단면을 해석하여 얻은 결과가 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 탐사 초기 36°34′에서는 약 100 m 정도까지 강한 반사계수들이 계산되는 것을 확인할 수 있고 실제로 탄성파 중합 단면도에서도 강한 반사파들이 약 100 m 깊이까지 지속적으로 등장하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 혼합층-수온약층의 경계가 남쪽으로 갈수록 점점 얕아지는 현상도 해양 물리 장비를 통한 직접 관측 결과와 탄성파 중합 단면도 모두에서 확인할 수 있다. 또한 강한 반사계수를 가지는 혼합층-수온약층의 경계가 실제 탄성파 중합 단면도에서 보이는 강한 반사면과 거의 동일한 깊이에 등장하는 것을 볼 수 있으므로 SO를 통해 얻은 수층 단면이 실제 수층 구조를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

그림 3-4-2-9는 해양 물리 관측 자료를 이용해 직접 관측한 음파 전달 속도에 선형 보간법을 적용하여 계산한 음파 전달 속도 단면이며, 그림 3-4-2-10은 음파 전달 속도, 반사계수, 중합 단면도를 함께 도시한 그림이다.

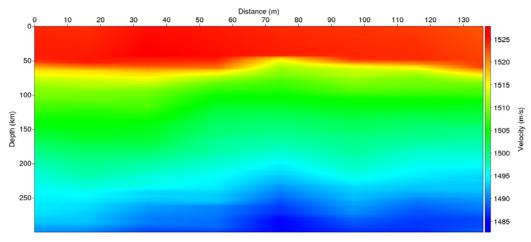


그림 3-4-2-9. 선형 보간법으로 얻은 음파 전달 속도.

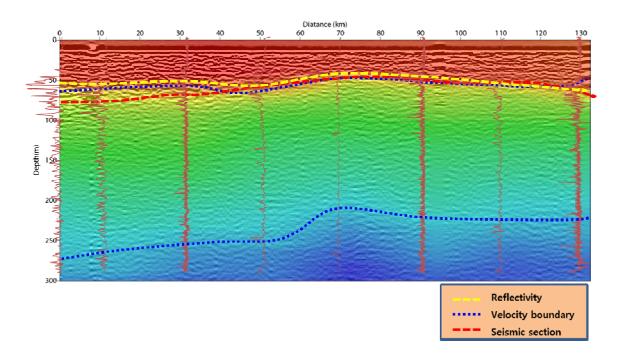


그림 3-4-2-10. 음파 전달 속도, 반사계수 및 중합 단면도와 각 자료에서 보이는 수층 경계.

그림 3-4-2-10에 나타난 각각의 자료로부터 얻은 수층 경계를 비교한 결과를 보면, 각각 다 른 방법을 통해 얻은 수층 경계 위치들이지만 서로 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었으나 음파 전달 속도로부터 얻은 경계 위치는 약 250~300 m 사이에도 존재하는 반면 탄성파 단면 을 통해서는 경계의 위치를 제대로 파악할 수 없었다. 이는 자료 취득 시 파고가 약 4 m 내 외로 비교적 높았고 강한 바람을 안고 조류 반대 방향으로 탐사를 진행했기 때문에 자료의 질이 매우 나빠 혼합층-수온약층 경계 아래에 존재하는 미세 난류 구조에서 발생하는 반사파 들을 제대로 기록하지 못했기 때문으로 추측한다. 하지만 전반적으로 탄성파 탐사로 얻은 결 과와 해양 물리 관측 장비로 얻은 결과가 서로 잘 일치하고 정해진 몇몇 위치에서만 관측해 야했던 해양 물리 관측 결과에 비해 연속적인 고해상도의 수층구조 영상을 탄성파 탐사를 통 해 얻을 수 있었다.



제5절 과거 장주기 기후변화에 따른 쿠로시오확장역 변동성

1. 연구 지역 및 연구 시료

북서태평양 샤츠키 해저고원은 일본 열도로부터 동쪽으로 약 2,000 km 떨어진 해저고원으로, 크게 세 개의 고원으로 이루어져 있다(그림 3-5-1-1). 고원들의 정상부는 약 2.5-3.5 km 의수심을 나타내며, 완만한 경사를 따라 5.5-6 km 수심의 해저면과 연결된다. 샤츠키 해저고원은 약 30-44°N, 154-168°E 사이에 분포하여 쿠로시오 확장역의 영향권에 놓여 있을 뿐 아니라그 해저지형에 의해 확장역의 분지에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hulburt and Metzger, 1998).

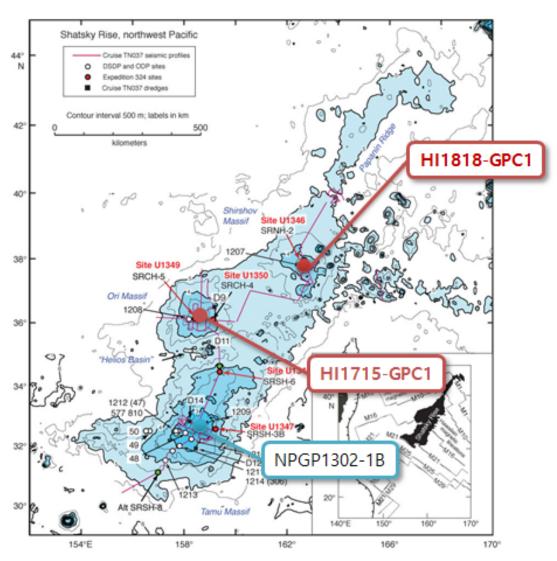


그림 3-5-1-1. 샤츠키 해저고원(Shatsky Rise)의 해저지형과 2018년도 획득시료 HI1818-GPC1 및 2017년 획득시료 HI1715-GPC1 의 위치(figure modified from Sager et al., 2009).

0,

본 사업에서 수행한 실해역 탐사를 통해, 남북 방향으로 놓인 샤츠키 해저고원의 세 해저산 중 중앙 고원(HI1715-GPC1)과 북쪽 고원(HI1818-GPC1)에서 GPC를 획득하였다(그림 3-5-1-1). 또한 남쪽 고원에서 기존에 확보한 piston core (NPGP1302-1B)를 함께 분석하여 과거 쿠로시오 확장역의 변화를 보다 면밀히 살펴보고자 하였다. 이외에도 향후 연구를 위해 탐사 경로상에 위치한 몇 개의 지점에서 다중주상시료를 획득하여 확보, 보관하였다. 각각의 시료 채취 위치와 길이는 표 1에 제시하였다.

종류	시료 ID	위도 (N)	경도 (E)	수심(m)	시료 길이(cm)	비고
GPC	NPGP1302-1B	32°17.55′	158°13.57′	2,503	613	
	HI1715-GPC1	36°07.64′	158°13.09′	3,350	1,421	상부교란 보정용 Pilot core 획득
	HI1818-GPC1	37°47.00′	162°46.50′	3,060	1,123	상부교란 보정용 MC 획득
MC	HI1715-MC1	28°36.95′	153°20.86′	5,881	34	
	HI1715-MC2	31°08.98′	155°14.90′	5,482	36	
	HI1715-MC3A	36°07.64′	158°13.09′	3,350	35	
	HI1715-MC3B	36°07.64′	158°13.09′	3,350	33	
	HI1715-MC4	32°23.34′	155°52.16′	4,554	37	
	HI1818-MC01	37°47 00′	162°46 50′	3 060	29	

표 3-5-1-1. 2017-2018년 탐사에서 획득한 퇴적물 시료 목록,

2. 연구 방법

시료 획득 후 퇴적상 기재 및 사진 촬영을 위해 코아를 반으로 절개한 후 퇴적상을 자세히 기술하였으며, 이후 사진자료를 획득하였다. 절개한 시료 중 절반은 함수율, 입도분석 및 지화학 분석을 위하여 1 cm 간격으로 부시료를 획득, 플라스틱 시료병에 담아 동결건조 하였다.

유공층 시료 분리 및 분석을 위해 동결건조한 시료를 63 μm 체로 입도분리 후 목적에 따라 125 μm, 250 μm, 355 μm 체를 이용해 추가로 분리하였다. 군집조성 분석을 위해서는 125 μm 이상의 시료를 sample divider를 이용하여 균일하게 나누고, 약 300개체 이상의 유공충 무리를 얻을 때 까지 dividing을 반복하였다. 유공충의 중 동정은 Kennett and Srinivasan (1983), Saito et al. (1981), Ujiié and Ujiié(2000)의 분류에 따랐다. 퇴적연대 파악을 위해서 250 μm 이상의 시료에서 부유성 유공충을 중 구분 없이 100개체 이상 추출하였고, 미국의 Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory에 AMS 방사성탄소동위원소조성 분석을 의뢰하였다. 14C 연대는 동위원소 분별 보정 후 Marine13 데이터베이스(Reimer et al., 2013)를 기반으로 http://calib.org의 Calib v. 7.1 프로그램을 이용, 달력연대(calendar year, Cal 14C age)로 보정하였다(Stuiver et al., 2017). 연구지역의 해수값에 의한 reservoir effect의 보정은 인근에서 보고된 값에 기반, ⊿R = 414를 이용하였다(Harada et al., 2012; Kuzmin et al., 2007; Yoneda et al., 2007).



부유성 유공충 중 혼합층, 상부수온약층, 중부수온약층에 서식하는 것으로 각각 알려진 Globigerinoides ruber, Neogloboquadrina pachyderma, 그리고 Globorotalia inflata 세 종을, 저서성 유공충 중 Uvigerina spp. 속을 $250~\mu m$ 이상의 시료에서 추출하여 안정산소동위원소 조성(δ 18O)을 분석하였다. 부유성 유공충은 서식 깊이나 환경이 크기에 따라 다를 수 있으므로 각종의 개체 크기를 제한하였다(Ezard et al., 2015; Friedrich et al., 2012). G. ruber와 N. incompta 는 250– $300~\mu m$, G. inflata는 355– $400~\mu m$ 크기 범위에서 약 30개체를 추출하였고, University of Michigan at Ann Arber의 Finnigan MAT 251~mass spectromater로 분석하였다. 표준물질 NBS-19의 분석값은 평균 $-2.23~\pm~0.08\%$ (n=29, $1~\sigma$)였다.

대륙 기원 입자의 추출은 무기규산염의 함량으로 근사하였다. $63 \, \mu \, \mathrm{m}$ 미만의 퇴적물에서 탄산염 제거, 망간-철산화물 제거, 생물기원 오팔 제거를 거친 후 건조하였다(Rea and Janecek, 1981; Hovan, 1995). 무기규산염 성분의 입도분석은 한국해양과학기술원의 Master Sizer Micro (Malvern Instrument Inc.)를 이용하였다. $143 \, \mathrm{Nd}/144 \, \mathrm{Nd}$ 와 $87 \, \mathrm{Sr}/86 \, \mathrm{Sr}$ 분석은 한국기초과학지원연 구원의 TIMS (VG54-30, Isoprobe-T)를 이용하였고, 표준물질인 JNdi-1과 NIST SRM-987의 분석결과 $87 \, \mathrm{Sr}/86 \, \mathrm{Sr} = 0.710246 \pm 6 \, (\mathrm{n=30}, \, 2\, \sigma)$, $143 \, \mathrm{Nd}/144 \, \mathrm{Nd} = 0.512101 \pm 9 \, (\mathrm{n=30}, \, 2\, \sigma)$ 값을 얻었다. 시료 간 $143 \, \mathrm{Nd}/144 \, \mathrm{Nd}$ 의 차이는 매우 근소하여 Chondritic Uniform Reservoir (CHUR) 로표준화한 $\varepsilon \, \mathrm{Nd} = ((143 \, \mathrm{Nd}/144 \, \mathrm{Nd})/0.512638) - 1) \times 104))$ 를 사용하였다.

3. 연구 결과

가. 퇴적상

HII715-GPC1과 HII818-GPC1의 주요 구성 성분은 석회미세조류(calcareous nannofossil), 점토 질 연니(pelagic clay), 유공충(foraminifera)과 규조(diatom)이다. HII715-GPC1(그림 3-5-1-2)에서는 석회조류와 점토질연니가 혼재되어 나타나며, 석회조류가 우세할 때에 올리브색을, 점토질연니가 우세할 때 황갈색을 띠는 퇴적상으로 요약된다. 각각 퇴적상간의 경계부는 점진적으로 나타나거나 약간의 생교란 흔적을 보이며, 종종 빈 구멍으로 나타나는 생교란 흔적이 관찰된다. 평행한 짙은 녹색의 띠가 코어 전체에서 관찰되며, 역시 점토질연니와 석회조류로 구성되어 있다. 약 728 cm 깊이에 급격히 퇴적상이 변하는 경계부가 존재한다(황갈색에서 올리브색). HII818-GPC1(그림 3-5-1-3)의 주 퇴적상은 석회조류이며, 점토질연니, 유공충과 규조류와 함께 나타난다. 석회조류와 점토질연니가 우세한 충은 황회색을 띠며 석회조류, 유공충, 규조류가 우세한 충은 밝은 녹회색을 나타낸다. 퇴적상간의 경계부는 점진적이며, 생교란되어 있다. 860-870 cm 구간에 화산재 충이 발견된다. HI715-GPC1과 HI1818-GPC1 모두 남쪽 고원의 NPGP1302-1B에 비해 점토질 퇴적물을 다량 함유하며, 특히 HI1715-GPC1에 풍부하게 나타나 전체적인 퇴적물의 색을 어둡게 만드는 것으로 여겨진다.



HI1715-GPC1

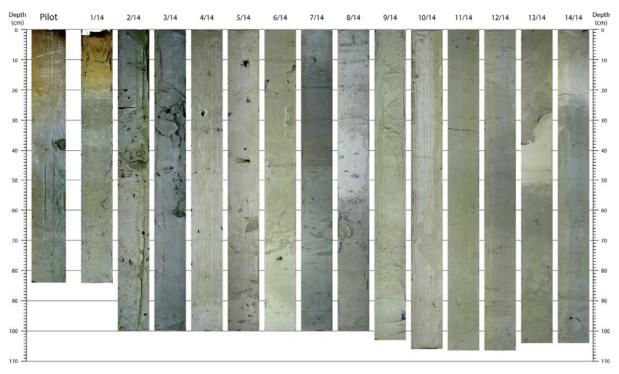


그림 3-5-1-2. HI1715-GPC1 절개 단면 사진.

HI1818-GPC1

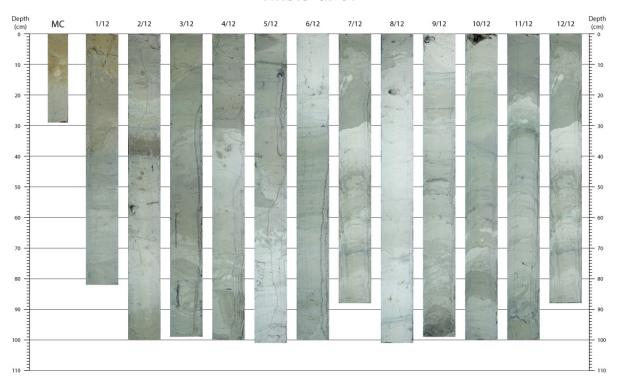


그림 3-5-1-3. HI1818-GPC1 절개 단면 사진.



나. 마지막 빙하기 이후 위도별 퇴적률 변화

세 개의 주상시료(NPGP1302-1B, HI1715-GPC1, HI1818-GPC1)의 최상부 퇴적층에서 추출한 부유성 유공층의 방사성탄소동위원소비 (⊿14C)에 근거한 퇴적연대를 산출, 선형퇴적률을 계산하였다(그림 3-5-1-4). 후기홀로세(6,000 년 전 이후)의 선형퇴적률은 중앙고원인 HI1715-GPC1에서 약 2.9 cm/kyr로 나타나 남쪽인 NPGP1302-1B(1.6 cm/kyr)와 HI1818-GPC1(1.2 cm/kyr)에비해 매우 높다. 연구지역들은 모두 해저고원의 정상부에 위치하여 해저에서 저탁류를 통해들어오는 퇴적체의 존재 가능성이 낮고, 대부분의 퇴적물은 표층에서 저층으로 직접 공급되므로 이 지역의 퇴적률은 대체로 표층에서의 저층 수송에 비례한다고 볼 수 있다. 중앙고원의퇴적률이 가장 높은 것은 이 지역의 표층생산성, 강수가 높아 수송 효율이 좋은 결과로 해석되는데, 아마도 쿠로시오확장역의 경로 중심축에 가장 가깝기 때문으로 보인다. 다만 중앙고원보다 생산성이 더욱 높을 것이라 여겨지는 북쪽고원보다 더 빠른 퇴적이 일어나고, 지난 3만년 동안의 평균퇴적률이 6.9 cm/kyr로 비정상적으로 높게 나타나는 것은 설명하기 어려워 해당지역에 추가적인 퇴적물의 집적(sediment focusing)을 야기하는 기작이 존재하리라 짐작된다.

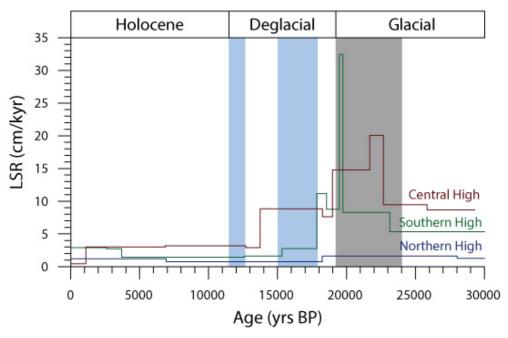


그림 3-5-1-4. 지난 3만년 동안 지역별 퇴적률 변화양상.

이러한 결과로 보면 쿠로시오확장역의 경로 중심부에서 가장 높은 퇴적률이 나타난다고 가정할 수 있고, 마지막 빙하기(Last Glacial Maximum, LGM)로부터 현재까지 쿠로시오확장역의 중심축은 중앙고원(~36°N) 근방에 머물러 있었다고 볼 수 있다. 그러나 빙하기-간빙기 전환의 초기인 18,000-20,000 년 전 남쪽 고원의 퇴적률이 급격히 상승하여 중앙고원보다 높게 나타나는데, 이 시기에 중심축의 남하가 두드러졌을 가능성을 지시하며 향후 추가적인 표층수온 분석을 통해 확인할 계획이다.

다. 마지막 빙하기 이후 표층해양환경 변화

샤츠키 해저고원의 남쪽 고원에서 획득한 주상시료 NPGP1302-1B(32°17.55′N, 158°13.57′ E, 2,503 m depth)는 쿠로시오확장역의 남북방향 변동범위(32°-36°N) 중 남쪽 경계부에 가까워 확장역의 변동성을 기록하고 있다. 본 연구에서는 각기 다른 수심대에 서식하는 부유성 및 저 서성 유공충의 산소동위원소 조성(♂18O)과 종 조성을 분석하여, 지난 23,000년 간 표층해양환 경 변화를 복원하였다(Seo et al., 2018).

부유성 유공층 Globigerinoides ruber, Neogloboquadrina pachyderma, 그리고 Globorotalia inflata 는 각각 혼합층, 상부수온약층 및 중부수온약층에 서식하고 각각의 수층환경을 대변한다 (Sagawa et al., 2011; Rebotim et al., 2017). 각각 종의 탄산염각 δ180 조성은 빙하기로부터 현 재까지 감소하는 양상을 나타내며, 이는 빙하기로부터 현재까지 대륙빙하의 감소로 인한 해수 조성 변화를 반영한다(그림 3-5-1-5A, B). 한편 부유성 유공충의 종간 818O 조성 차이는 각각 의 종이 서식하는 수층의 해수 δ18O 조성과 수온에 따라 결정되고, 해수의 δ18O는 깊이가 깊을수록 증가하고 유공충 각의 δ18O는 수온이 낮을수록 증가하므로 결과적으로 유공충 각 의 δ 18O 역시 수심이 깊어질수록 증가하게 된다. G. ruber, N. pachyderma, G. inflata 순으로 증가하는 δ18O 값은 이들의 서식 수심을 잘 반영한다고 볼 수 있다.

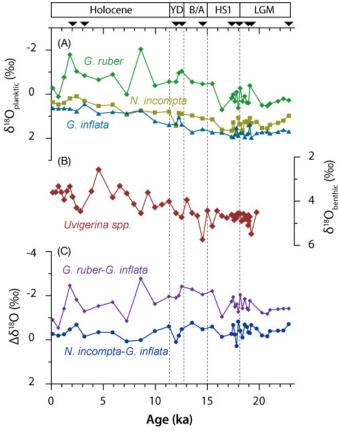


그림 3-5-1-5. NPGP1302-1B 내 부유성(A) 및 저서성(B), 유공충의 산소동위원소조성 및 부유성유공충 종간 차이(C)

.C

이러한 종간 차이는 수층구조가 안정되어 수직혼합이 약할 때 더욱 두드러진다(e.g., Caromel et al., 2014; Coxall et al., 2000; Rashid and Boyle, 2007, Seo et al., 2016). LGM, 하인리히 소빙 기 1(Heinrich Stadial 1; HS1)과 영거드라이아스 한랭기(Younger Dryas; YD) 동안 각 종 간 δ 180 조성의 차이가 작아짐을 관찰할 수 있는데(그림 5C), 이 시기에 수직혼합이 활발하고 수 온약층이 깨져 서식 수심의 구별이 불분명해졌음을 알 수 있다.

부유성 유공층의 군집조성 역시 시기에 따른 차이를 나타낸다(그림 3-5-1-6). 연구지역의 우점종으로 볼 수 있는 Globigerina bulloides, Globigerinita glutinata, 그리고 G. inflata (Group A)는 마지막 빙하기부터 현재까지 가장 많은 개체수를 나타내며, HS1과 YD 시기 감소한다. 열대아열대 해역에 주로 분포하는 Trilobatus sacculifer, G. ruber, Globorotalia truncatulinoides (Group B)는 홀로세 이후 증가하는 양상을 나타내고, 중위도-아한대 해역에 주로 분포하는 Neogloboquadrina pachyderma, Neogloboquadrina dutetrei, N. incompta (Group C)는 빙하기에 현재보다 우세하며특히 HS1과 YD 시기 더욱 개체수가 증가한다. 온난한 빈영양 해역의 우점군인 Group B에 비해 Group A 군집은 온난하면서 수직혼합이 활발한 해역을 선호하고, 아열대순환역에 속하지만 에디와 와류에 의해 생산성이 비교적 높은 현재 연구지역의 해양환경을 가장 잘 대변한다. 중위도에서 아한대 지역까지 산출되는 Group C는 쿠로시오확장역 중심이나 그 북쪽의 환경을 대변한다고 볼 수 있으며, 따라서 LGM, HS1, YD 등 한랭기에 해당 군집의 출현빈도가 증가하는 것은 당시 쿠로시오확장역의 남하를 시사한다고 볼 수 있다.

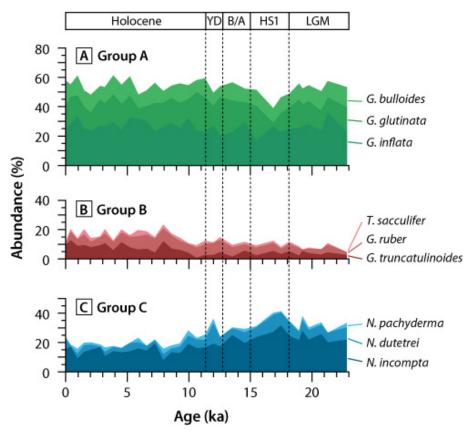


그림 3-5-1-6. NPGP1302-1B 내 산출되는 부유성 유공충 중 우점하는 9종의 상대적인 비율.



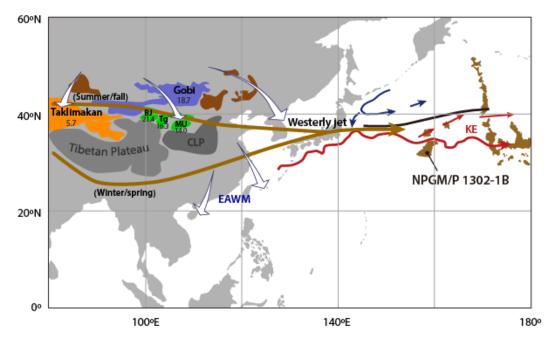


그림 3-5-1-7. 연구지역 (NPGP1302-1B)과 계절변동에 의한 편서풍 제트의 경로, 중앙-동아시아의 주요 건조지대의 위치와 그들의 석영 전자스핀공명값.

이처럼 NPGP1302-1B에서의 결과는 한랭기 쿠로시오확장역의 남하 가능성을 나타내나, 해당지역이 확장역의 남쪽경계부에 위치하므로 주 경로의 변화양상을 파악하기 위해서는 중앙고원과 북쪽고원의 결과가 요구된다. 연구방법에서 기술했듯, 빙하기-간빙기 전환 당시 퇴적률로 대변되는 해류순환의 변화가 있었으리라 여겨지며 향후 위도간 부유성 유공충 δ180 차이 분석을 통해 확인할 예정이다.

라. 빙하기-간빙기 기후변화에 따른 편서풍 경로변화

기후변화에 따른 쿠로시오확장역과 북태평양해류의 경로 및 강도 변화는 편서풍의 경로 변화와 밀접히 연결되어 있다(Saenko et al., 2005; Yang et al., 2016). 지난 30만년 동안 NPGP1302-1B 퇴적물에 기록된 대륙 기원 입자의 기원지 변화 분석을 통해 빙하기-간빙기 규모의 기후변화에 따른 편서풍 경로의 변화를 복원하였다. 편서풍을 타고 원양으로 운반되는 대륙 기원 입자는 동아시아 건조지대에서 기원하며, 이들은 기원지에 따라 Nd/Sr 동위원소조성, 장석 조성, 석역의 전자스핀공명(Electron Spin Resonance; ESR)값에서 차이를 보인다 (그림 3-5-1-7). 동아시아 건조지대의 주요 황사 발원지는 타클라마칸과 고비 사막으로 정리되는데, 타클라마칸은 거대한 모래 사구로 이루어졌으나 고지대의 타림분지 내에 존재하여 편서풍 제트를 타고 원양까지 운반된다(Shi and Liu, 2011; Seo et al., 2014). 반면 고비사막의 입자들은 동아시아 겨울몬순을 통해 직접적으로 동아시아와 인근의 주변해에 공급된다. 지형적으로, 티벳고원과 히말라야 고지대는 편서풍 제트류의 경로에 영향을 미치고 이는 겨울몬순 시기 발생하는 황사에서 고비사막의 상대적 기역도를 증가시킨다(Nagashima et al., 2011).

.0

지난 35만 년 동안 샤츠키 해저고원의 남쪽 고원에 퇴적된 풍성기원입자의 ESR과 Sr-Nd 동위원소 조성은 빙하기와 간빙기 간 차이를 나타낸다(그림 3-5-1-8). 화산 기원 입자의 유입으로 인한 값의 변화를 제거하면, 빙하기에는 고비사막의 기여가 상대적으로 증가하고, 간빙기에는 타클라마칸의 기여가 상대적으로 높다. 이는 기존에 보고된 수천 년 규모의 기후변화의 진동에 의한 편서풍의 경로변화 패턴과 유사한데, 한랭기에 유라시아에 고압대가 형성되어 편서풍의 경로가 남하하고 겨울몬순의 범위가 확장되어 고비사막이 타클라마칸사막보다 주요한 황사의 공급지가 될 수 있다는 것이다 (Nagashima et al., 2011).

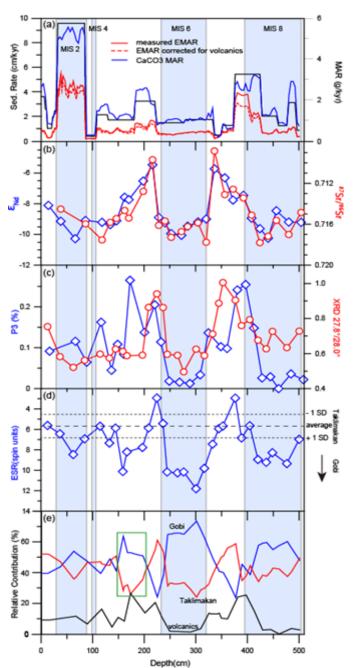


그림 3-5-1-8. NPGP1302-1B 코어 퇴적물의 (a) 퇴적률과 성분별 플럭스(mass accummulation rate; MAR), (b) 풍성기원입자의 εNd, 87Sr/86Sr 조성, (c) 화산기원물질의 함량(P3)과 정장석/사장석 비율, (d) 석영입자의 ESR, (e) P3과 ESR로 계산한 고비사막, 타클라마칸사막, 화산쇄설물의 상대적 기여도.

0,

한편 중앙고원에서 획득한 HI1715-GPC1은 NPGP1302-1B에 비해 퇴적률이 높아 보다 고해상 도의 대기순환 변화 연구가 가능하다. HI1715-GPC1 상부 200 cm 구간에서 측정한 풍성기원입자의 함량은 빙하기로부터 현재까지 감소하는 추세를 보이며, 빙하기의 퇴적률이 홀로세에 비해 약 3배 이상 증가한 것을 감안할 때 풍성기원입자의 유입 역시 크게 증가하였음을 지시한다 (그림 3-5-1-9). 반면 바람의 세기를 나타내는 풍성기원입자의 입도는 빙하기보다 해빙기,특히 Heinrich Stadial 1(HS1) 동안 증가하였다. 이는 연구지역에서 바람의 세기와 풍성기원입자의 공급량 변화가 일치하지 않았음을 지시한다.

풍성기원입자 입도가 크게 증가하는 HS1 시기는 그린란드 기온으로 대변되는 북반구 고위도의 한랭기에 해당하며, 편서풍 등 북반구 대기순환에 변화가 있었을 것으로 여겨진다. 풍성기원입자의 입도 변화는 편서풍의 경로 변화에 따른 입자 공급지 변화, 공급지로부터의 거리변화, 기원지의 습윤화에 따른 먼지입자의 플럭스 감소, 대기순환 강화 등 다양한 원인으로 해석될 수 있고, 향후 추가 시료 분석 및 입자의 동위원소조성 변화와 관련지어 보다 정확한변화기작 해석이 가능하리라 생각된다.

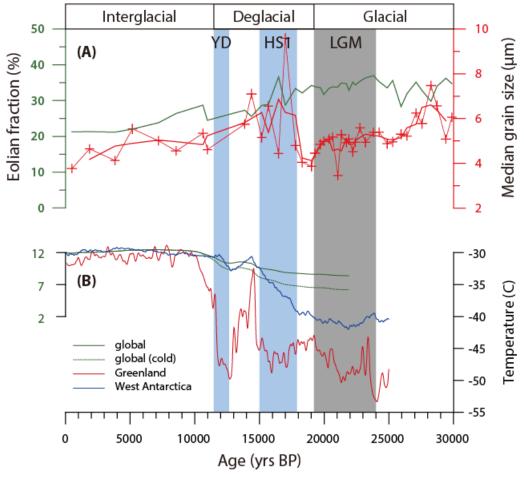


그림 3-5-1-9. (A) H1715-GPC1 퇴적물 내 풍성기원입자의 함량(녹색선) 및 평균입도 변화(적색선).
(B) 마지막 빙하 최성기(LGM) 이후 현재까지 지구 평균 온도변화(녹색선),
그린란드 기온(적색선) 및 서남극 기온(청색선) 비교(data from Cuffey et al., 2016).

제4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도





제4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 목표 달성도

		총연구기간내 연차별 목	또 대비	달성율(%)	
		연차별 계획대비			
구분	성과목표	성과목표 연구내용		달성실적	연구실적 달성율(B) (%)
	1. 계류시스템 설치	1-1. sediment trap (침강 입자 포집기) 2대, 해류계 3대 이상으 로 구성된 계류선 과, PIES 2대 이상 을 샤츠키 해저고 원 서쪽에 설치	0.3	- 계획대로 설치함	
		1-2. 고도계, 모델 자료 등을 활용하여 대 상 해역의 변동 특 성 연구		- 기존 자료를 활용하 여 쿠로시오 확장역 해양 상충부 열용량 의 장기(경년에서 수 십년주기) 변동성 분석 - 연구결과 논문 투고, 심사 후 수정중	95
1년차	차 2. 생태계 생지화학 기초자료 획득	2-1. 탄소플럭스, 영얌염 등 생지화학 자료 획득	0.3	 영양염, 부유물질, 입자성유기탄소 시료확보 (총 9개 정점) KEO 정점에서 장기관측된 대기-해양이산화탄소 분압자료확보 침강입자포집기 2대계류(800m, 4,000m) 	70 (숭선조사일 축소로 인한 획득
	2-2. 하위 생태계 먹이 망 구조, 생물량/다 양성, 기초생산성 현 장 조사, 시료 확보 및 기초분석		 먹이망구조 연구 시료 확보 (총 5개 정점) 생물량/다양성 시료 확보 (9개 정점) 현장 분석 자료 확보 (엽록소, 광합성 변수 등) 	시료수 감소)	

	_	_			
d	r	٦	h		
	Ь	4	y	١.	
1	4	•	,	•	D

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)						
	연차별 달성내용					
구분	성과목표	연구내용	가 중 치 (A)	달성실적	계획대비 연구실적 달성율(B) (%)	
	3. 수층구조와 해양 혼합 특성 조사	 3-1. 미세난류구조 직접 관측 3-2. 탄성파해양학 연구기법수립과 자료 (200 ~ 300 km) 획득 	0.2	 미세 난류구조 직접 관측 함 탄성파 해양학 연구 기법 수립 및 시뮬레이션 수행 탄성파 해양학 자료 획득(132.2km) 	70 (승선조사일 축소로 인한 획득 자료량 감소)	
1년차	4. Giant 피스톤코어 퇴적물시료 획득(획득 시표 기초분석 포함)	4-1. GPC 퇴적물 시료 2 정점 획득 4-2. 확보 시료 기초 분석	0.2	- GPC 1정점 시료확보 - 미계획된 MC 5정점 시료 추가 확보 - 사진(optic & X-ray), XRF, 대자율 - 유공충 종조성, δ 18O	65 (승선조사일 축소로 인한 획득 시료수 감소)	
	계		1.0		92	
	1. 계류 시스템 유지와 관측자료 분석	1-1. sediment trap 2대,해류계 3대 이상으로구성된 계류선과PIES 2대 이상샤츠키 해저고원서쪽에 설치1-2. 고도계, 모델 자료등을 활용하여대상 해역의 변동특성 연구	0.3	- 계획대로 회수하였으며, 재설치함 - 기존관측자료와 재분석자료를 활용 하여 연구논문을 출간하고 추가 분석 진행중	100 95	
2년차	2. 하위 생태계 구조 및 C-export	 2-1. 하위 생태계 구조 및 먹이망 연구 - 하위 생태계 특성 및 먹이망 구조 - 경계역 수괴 내 영양염, 부유물질, 입자성 유기탄소 변동 경향 	0.3	- 8개 정점의 150여개 수심에서 영양염, 부유물질, 입자성 유기탄소 시료 획득 - 2017년도 부유물질, 입자성 유기탄소시료 분석	90	
	조사와 정량화	2-2. 탄소플릭스 변동 연구- 시계열 퇴적물포집장치를 이용한 수심 별 침강 입자 시료 획득		- 침강입자 시료를 획득하였음	100	

		총연구기간내 연차별 목3	또 대비 및	글성 율 (%)	
		연차별 달성내	8		연차별 계획대비
구분	성과목표	연구내용	가 중 치 (A)	달성실적	게득내미 연구실적 달성율(B) (%)
		3-1. 미세난류구조연구		 혼합역에서 혼합특성 파악 직간접적 방법을 이용하여 대상해역의 해양특성 규명 	
	3. 소~중규모 수층 구조와 혼합 특성 규명		0.2	- 1차년도 탄성파 탐사 수행 결과 및 기존 탄성파 해양학 탐사 자료를 활용하여 취득 방법 개선 및 자료 처리 기법을 보완함	95
		3-3. 1차년도 취득한 탄성파 탐사 자료 처리 및 분석		- 1차년도에 취득한 탄성파 탐사 자료를 처리하고 해양 물리 관측 자료와의 상관성을 분석함	95
		4-1. GPC 1정점 확보		- GPC 1정점 시료 확보	
	4. Giant 피스톤 코어 퇴적물 시료 획득, 고해양환경 프록시 분석	적물 및 유공충 득, 군집구조 분석 - 군집구조 분석		- 유공충 ∂¹8O, 방사성탄소동위원소 비 분석완료 - 유공충 보존 상태 불량하여 다른 proxy 분석 중 (총무기탄소함량, 대륙기원입자 등)	95
		4-3. 풍성기원입자 기원지 및 플럭스 분석을 통한 편서풍 경로변화 추적		- 함량 및 플럭스 분석 완료	
		계	1.0		96



1. 정량적 연구성과

[2017년도 목표 대비 달성도]

구	구분 가중치* 달성 목표(건)		세부 가중치	달성(건)	달성도(%)		
		mrnIF 81점 이상	1	50%	1(채택)		
			mrnIF 61~80		-	1(발간)	
과학적 성과	논문	90%	mrnIF 41~60	1	30%		
			mrnIF 40점 이하	1	20%	1(발간)	
			소계	3	100%	3	
사회적,	홍보활동	5%	연구활동 홍보	1		1	
인프라	대외활동	5%	외부 세미나 등	1		1	
계	-	100%		5	-	100%	

[2018년도 목표 대비 달성도]

구	분	가중치*	달성 목표(건)		세부 가중치	달성(건)	달성도(%)
			mrnIF 81점 이상	1	30%	2	100%
			mrnIF 61~80	2	50%	1	100%
과학적 성과	논문	95%	mrnIF 41~60	1	15%	0	50%
			mrnIF 40점 이하	1	5%	2	100%
			소계				
사회적,	홍보활동						
인프라	대외활동	5%		1	100%		100%
계	-	100%			-		93%



제2절 대외 기여도

- O 대형 조사선 이사부호에 걸맞는 쿠로시오 확장역으로 연구 영역을 확대함
 - 이사부호를 이용하여 해황이 나빠 접근하지 못하던 해역에 대한 연구를 수행함.
 - 계류선을 유지하고 다학제적 연구를 진행함.
 - 협력하여 순수 원내 연구원 인력만으로 연구영역을 확대하고 다학제 연구기반을 마련함.
- O 예산이 계속 축소되었음에도 불구하고 총 8편의 SCI급 논문을 출간함.
- O 쿠로시오 확장역에 계류선을 설치하여 연구기반을 구축함.
 - 해류와 퇴적물 시계열 자료를 획득하여 쿠로시오 확장역의 단기 변동성을 규명할 수 있는 기초자료 획득.
- O 2년의 조사를 통해 웜풀-쿠로시오확장역-오야시오 해역의 하위 생태계의 구조와 기능적 특성을 파악함.
 - 식물플랑크톤과 원핵생물의 생물량 및 생산력과 먹이망 구조 특성
 - 질소고정율 및 질소계 영양염 동화속도.
- O 2개 정점에서 퇴적물 코어 자료를 획득하여 쿠로시오 확장역의 빙하기 간빙기간 연구에 필요한 자료 획득
 - 아열대 아한대 경계부 퇴적물 확보 완료.
 - 남쪽고원에서 빙하기 쿠로시오확장역 남하 기록과 편서풍 변동 보고.
- O 해양혼합과 음향해양학 연구체계를 구축하여 수층 구조 및 혼합 특성을 규명함
 - 수층의 혼합특성을 직간접적인 방버을 이용하여 조사함.
 - 탄성파 해양학의 연구 기반을 마련하고 자료를 취득함.
 - 수층 탄성파 탐사 자료 처리 기법을 연구하고 자료 처리를 통해 수층 구조 영상화를 수행함.

제5장 연구개발 결과의 활용계획





제5장 연구개발 결과의 활용계획

O 과학적 측면

- 기후변화 ~ 쿠로시오 확장역 변동성 ~ 생태계 특성 사이의 상관성 연구를 통해 기후변화 시나리오에 다른 북서태평양 생태계 변동을 예측하기 위한 과학적 근거로 활용.
- 기후변화 기인, 북태평양 순환류 변동에 따른 해양 탄소 플럭스 변동성 규명에 활용.
- 과거 기후조건의 환경변수를 이용한 기후 모의 자료 제공 및 적도-한반도 해역 및 아열 대 ~ 아한대 기후상관성 규명에 활용.
- 해수수층 구조, 특성 및 공간 분포 등을 쉽게 인지할 수 있는 2-D 및 3-D 영상화 기술 및 기법 개발에 활용.

O 기술적 측면

- 지질학적 과거에 발생한 대규모 기후변화에 따른 북태평양의 지역적 반응 및 역할을 규명.
- 아열대 ~ 아한대순환류의 변화에 따른 생태계 변화의 사례 제시.
- 해양 환경 변화에 따른 생태계의 반응에 대한 과학적 근거 자료를 제공함으로써, 환경 변화에 따른 해양 생태계 변동성을 보다 정밀하게 예측할 수 있음.
- 심해에서 장기간 안정적으로 운영할 수 있는 계류 기술 확보, 해양 탄소 플럭스 변동성 파악 모니터링 기술 기반확보.
- 아열대·아한대 순환류가 만나는 경계역에서의 탄성파 해양학을 위한 탐사자료 획득·처리 최적화를 통해 대양 및 한반도 주변 해역에서의 탄성파 해양학 연구분야 선도.
- 수층 형성, 이동 등에 대한 영상화 기술/기법 기반 마련.

O 경제·산업적 측면

- 기후 및 고해양 연구를 통해 획득한 다양한 환경변수는 향후 해양·대기 기후모델에 접합하여 중·장기 해양환경 변화 예측에 활용될 수 있음.
- 특히 북서태평양 아열대·아한대순환류 경계부는 세계적인 어장으로, 과거 유사한 기후 변화 시기의 해양생산성 변화 기록을 바탕으로 해양환경 정책 및 수산정책 수립에 정보 제공.
- 북서태평양의 어획량과 환경 변화 사이의 상관성 분석을 위한 자료를 제공함으로써 잡는 어업의 장기 전략 수립에 활용되어 경제·산업의 발전에 기여할 수 있음.

O 사회적 측면

- 장기적인 해양의 변화양상을 이해함으로써 기후변화에 대응하고 국민의 삶의 질 향상.
- 고해양학 연구를 대양으로 확대함에 따라 국내 해양연구의 국제적 위상 강화.

- 대양 연구 경험을 축적하고, 연구 인력의 양성에 기여함으로써, 해양 연구 인프라를 견 고히 구축할 수 있음.
- 공해상 대양 연구 결과를 생산 발표하여 제공함으로써 국가의 해양 연구 역량을 고양하 고, 관련 연구 그룹에 기여함으로써 국가 이미지를 제고할 수 있음.

제6장 참고문헌



.0

제6장 참고문헌

- Amplicon, P., P. Clean Up, and P. Index (2013), 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation, edited.
- Arrigo, K. R. (2004), Marine microorganisms and global nutrient cycles, Nature, 437(7057), 349.
- Azam, F., T. Fenchel, J. G. Field, J. Gray, L. Meyer-Reil, and F. Thingstad (1983), The ecological role of water-column microbes in the sea, Marine ecology progress series, 257-263.
- Book, J. W., M. Wimbush, S. Imawaki, H. Ichikawa, H. Uchida, and H. Kinoshita (2002), Kuroshio temporal and spatial variations south of Japan determined from inverted echo sounder measurements, Journal of Geophysical Research: Oceans, 107(C9).
- Bralower, T. J., I. Premoli Silva, and M. Malone (2002), Ocean Drilling Program, College Station, TX: CD-ROM, 198.
- Carniel, S., A. Bergamasco, J. W. Book, R. W. Hobbs, M. Sclavo, and W. T. Wood (2012), Tracking bottom waters in the Southern Adriatic Sea applying seismic oceanography techniques, Continental shelf research, 44, 30-38.
- Change, I. P. O. C. (2007), Climate change 2007: The physical science basis, Agenda, 6(07), 333.
- Choi, D., J. Noh, K. Selph, and C. Lee (2016), Dynamic Changes of Photosynthetic Picoeukaryotes Composition in the Northwestern Pacific Ocean Revealed by High-Throughput Tag Sequencing of Plastid 16S rRNA Gene, paper presented at American Geophysical Union, Ocean Sciences Meeting 2016, abstract# ME14E-0660.
- Expedition 324 Scientists (2010), Testing plume and plate models of ocean plateau formation at Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean. IODP Prel. Rept., 324. doi:10.2204/iodp.pr.324.2010
- Donohue, K. A., D. R. Watts, K. L. Tracey, A. D. Greene, and M. Kennelly (2010), Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of current and pressure recording inverted echo sounders, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 27(3), 507-527.
- Dore, J. E., R. M. Letelier, M. J. Church, R. Lukas, and D. M. Karl (2008), Summer phytoplankton blooms in the oligotrophic North Pacific Subtropical Gyre: Historical perspective and recent observations, Progress in Oceanography, 76(1), 2-38.
- Ducklow, H. W., D. L. Kirchman, and H. Quinby (1992), Bacterioplankton cell growth and macromolecular synthesis in seawater cultures during the North Atlantic spring phytoplankton bloom, May, 1989, Microbial Ecology, 24(2), 125-144.
- Ducklow, H. W., D. K. Steinberg, and K. O. Buesseler (2001), Upper ocean carbon export and the biological pump, Oceanography-Washington DC-Oceanography Society, 14(4), 50-58.

- 0,
- Ezard, T. H., K. M. Edgar, and P. M. Hull (2015), Environmental and biological controls on size specific δ13C and δ18O in recent planktonic foraminifera, Paleoceanography, 30(3), 151-173.
- Field, C. B., M. J. Behrenfeld, J. T. Randerson, and P. Falkowski (1998), Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components, science, 281(5374), 237-240.
- Fortin, W. F., W. S. Holbrook, and R. W. Schmitt (2017), Seismic estimates of turbulent diffusivity and evidence of nonlinear internal wave forcing by geometric resonance in the South China Sea, Journal of Geophysical Research: Oceans, 122(10), 8063-8078.
- Friedrich, O., R. Schiebel, P. A. Wilson, S. Weldeab, C. J. Beer, M. J. Cooper, and J. Fiebig (2012), Influence of test size, water depth, and ecology on Mg/Ca, Sr/Ca, δ18O and δ13C in nine modern species of planktic foraminifers, Earth and Planetary Science Letters, 319, 133-145.
- Fuhrman, J. A. (2009), Microbial community structure and its functional implications, Nature, 459(7244), 193.
- Fuhrman, J. A., and F. Azam (1980), Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, Antarctica, and California, Applied and environmental microbiology, 39(6), 1085-1095.
- Garrett, C., and W. Munk (1975), Space time scales of internal waves: A progress report, Journal of Geophysical Research, 80(3), 291-297, doi:doi:10.1029/JC080i003p00291.
- 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, Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(12), 6704-6716.
- Gregg, M. C. (1989), Scaling turbulent dissipation in the thermocline, Journal of Geophysical Research, 94(C7), 9686, doi:10.1029/jc094ic07p09686.
- Gregg, M. C., T. B. Sanford, and D. P. Winkel (2003), Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters, Nature, 422(6931), 513.
- Harada, N., M. Sato, O. Seki, A. Timmermann, H. Moossen, J. Bendle, Y. Nakamura, K. Kimoto, Y. Okazaki, and K. Nagashima (2012), Sea surface temperature changes in the Okhotsk Sea and adjacent North Pacific during the last glacial maximum and deglaciation, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 61, 93-105.
- Holbrook, W. S., P. Páramo, S. Pearse, and R. W. Schmitt (2003), Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling, Science, 301(5634), 821-824.
- Hurlburt, H. E., and E. J. Metzger (1998), Bifurcation of the Kuroshio extension at the Shatsky Rise, Journal of Geophysical Research: Oceans, 103(C4), 7549-7566.
- Isoguchi, O., and H. Kawamura (2006), Seasonal to interannual variations of the western boundary current of the subarctic North Pacific by a combination of the altimeter and tide gauge sea levels, Journal of Geophysical Research: Oceans, 111(C4).

- .0
- Kennelly, M., K. Tracey, and D. R. Watts (2007), Inverted echo sounder data processing manual Rep., Rhode Island Univ Narragansett Graduate School of Oceanography.
- Kennett, J. P., and M. Srinivasan (1983), Neogene planktonic foraminifera: a phylogenetic atlas, Hutchinson Ross.
- Kunze, E., E. Firing, J. M. Hummon, T. K. Chereskin, and A. M. Thurnherr (2006), Global abyssal mixing inferred from lowered ADCP shear and CTD strain profiles, Journal of Physical Oceanography, 36(8), 1553-1576.
- Kuzmin, Y., G. Burr, S. Gorbunov, V. Rakov, and N. Razjigaeva (2007), A tale of two seas: reservoir age correction values (R, ΔR) for the Sakhalin Island (Sea of Japan and Okhotsk Sea), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 259(1), 460-462.
- Kuzmin, Y. V., G. S. Burr, and A. T. Jull (2001), Radiocarbon reservoir correction ages in the Peter the Great Gulf, Sea of Japan, and eastern coast of the Kunashir, southern Kuriles (northwestern Pacific), Radiocarbon, 43(2A), 477-481.
- Lee, S., and J. A. Fuhrman (1987), Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton, Applied and environmental microbiology, 53(6), 1298-1303.
- Lee, Y. G., C.-H. Ho, J.-H. Kim, and J. Kim (2015), Quiescence of Asian dust events in South Korea and Japan during 2012 spring: Dust outbreaks and transports, Atmospheric Environment, 114, 92-101.
- Li, M., K. Xu, M. Watanabe, and Z. Chen (2007), Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 71(1-2), 3-12.
- Lovell, C. R., and A. Konopka (1985), Primary and bacterial production in two dimictic Indiana lakes, Applied and environmental microbiology, 49(3), 485-491.
- Minakawa, M., and Y. Watanabe (1998), Aluminum in the East China Sea and Okinawa Trough, marginal sea areas of the western North Pacific, Journal of Oceanography, 54(6), 629.
- Moon, H.-J., H.-J. Kim, C.-H. Kim, S. Moon, S.-h. Lee, J. S. Kim, C.-K. Jeon, G. H. Lee, S. H. Lee, and Y. Baek (2017), Imaging the Yellow Sea Bottom Cold Water from multichannel seismic data, Journal of Oceanography, 73(5), 701-709.
- Na, H., K.-Y. Kim, S. Minobe, and Y. N. Sasaki (2018), Interannual to Decadal Variability of the Upper-Ocean Heat Content in the Western North Pacific and Its Relationship to Oceanic and Atmospheric Variability, Journal of Climate, 31(13), 5107-5125.
- Nagashima, K., R. Tada, A. Tani, Y. Sun, Y. Isozaki, S. Toyoda, and H. Hasegawa (2011), Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period, Journal of Asian Earth Sciences, 40(6), 1214-1220.

- 0,
- Nakamura, Y., T. Noguchi, T. Tsuji, S. Itoh, H. Niino, and T. Matsuoka (2006), Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front, Geophysical Research Letters, 33(23).
- Nishibe, Y., K. Takahashi, M. Sato, T. Kodama, S. Kakehi, H. Saito, and K. Furuya (2017), Phytoplankton community structure, as derived from pigment signatures, in the Kuroshio Extension and adjacent regions in winter and spring, Journal of Oceanography, 73(4), 463-478.
- Osborn, T. (1980), Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements, Journal of Physical Oceanography, 10(1), 83-89.
- Park, C. K. (1979), On the distribution of dissolved oxygen off the east coast of Korea, 한국해양 학회지, 14.
- Pedrós-Alió, C., and T. D. Brock (1982), Assessing biomass and production of bacteria in eutrophic Lake Mendota, Wisconsin, Applied and environmental microbiology, 44(1), 203-218.
- Piété, H., L. Marié, B. Marsset, Y. Thomas, and M. A. Gutscher (2013), Seismic reflection imaging of shallow oceanographic structures, Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(5), 2329-2344.
- Pomeroy, L. R. (1974), The ocean's food web, a changing paradigm, Bioscience, 24(9), 499-504.
- Porter, K. G., E. B. Sherr, B. F. Sherr, M. Pace, and R. W. Sanders (1985), Protozoa in Planktonic Food Webs1, 2, The Journal of protozoology, 32(3), 409-415.
- Qiu, B., P. Hacker, S. Chen, K. A. Donohue, D. R. Watts, H. Mitsudera, N. G. Hogg, and S. R. Jayne (2006), Observations of the subtropical mode water evolution from the Kuroshio Extension System Study, Journal of physical oceanography, 36(3), 457-473.
- Rashid, H., and E. A. Boyle (2007), Mixed-layer deepening during Heinrich events: A multi-planktonic foraminiferal δ18O approach, Science, 318(5849), 439-441.
- Rebotim, A., A. H. Voelker, L. Jonkers, J. J. Waniek, H. Meggers, R. Schiebel, I. Fraile, M. Schulz, and M. Kucera (2017), Factors controlling the depth habitat of planktonic foraminifera in the subtropical eastern North Atlantic, Biogeosciences, 14(4), 827-859.
- Reimer, P. J., E. Bard, A. Bayliss, J. W. Beck, P. G. Blackwell, C. B. Ramsey, C. E. Buck, H. Cheng, R. L. Edwards, and M. Friedrich (2013), IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0 50,000 years cal BP, Radiocarbon, 55(4), 1869-1887.
- Saenko, O. A., J. C. Fyfe, and M. H. England (2005), On the response of the oceanic wind-driven circulation to atmospheric CO 2 increase, Climate dynamics, 25(4), 415-426.
- Sagawa, T., Y. Yokoyama, M. Ikehara, and M. Kuwae (2011), Vertical thermal structure history in the western subtropical North Pacific since the Last Glacial Maximum, Geophysical research letters, 38(8).

- .0
- Saito, T., P. R. Thompson, and D. Breger (1981), Systematic index of Recent and Pleistocene planktonic foraminifera, University of Tokyo Press.
- Sekine, Y., and K. Kutsuwada (1994), Seasonal variation in volume transport of the Kuroshio south of Japan, Journal of physical Oceanography, 24(2), 261-272.
- Seo, I., Y. Lee, Y. I. Lee, C. M. Yoo, and K. Hyeong (2016), Climatic evolution of the central equatorial Pacific since the Last Glacial Maximum, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17(8), 3454-3468.
- Seo, I., Y. Lee, C. M. Yoo, and K. Hyeong (2018), Migration of the Kuroshio Extension in the Northwest Pacific since the Last Glacial Maximum, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 496, 323-331.
- Seo, I., Y. I. Lee, C. M. Yoo, H. J. Kim, and K. Hyeong (2014), Sr Nd isotope composition and clay mineral assemblages in eolian dust from the central Philippine Sea over the last 600 kyr: Implications for the transport mechanism of Asian dust, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(19), 11,492-411,504.
- Sheen, K., N. White, C. Caulfield, and R. Hobbs (2012), Seismic imaging of a large horizontal vortex at abyssal depths beneath the Sub-Antarctic Front, Nature Geoscience, 5(8), 542.
- Sheen, K., N. White, and R. Hobbs (2009), Estimating mixing rates from seismic images of oceanic structure, Geophysical Research Letters, 36(24).
- Sherr, B. (1984), The role of heterotrophic protozoa in carbon and energy flow in aquatic ecosystem, MJ, Current perspectives in microbial ecology, 412-423.
- Shi, Z., and X. Liu (2011), Distinguishing the provenance of fine-grained eolian dust over the Chinese Loess Plateau from a modelling perspective, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 63(5), 959-970.
- Shih, L. H., J. R. Koseff, G. N. Ivey, and J. H. Ferziger (2005), Parameterization of turbulent fluxes and scales using homogeneous sheared stably stratified turbulence simulations, Journal of Fluid Mechanics, 525, 193-214.
- Shimizu, Y., I. Yasuda, and S.-i. Ito (2001), Distribution and circulation of the coastal Oyashio intrusion, Journal of Physical Oceanography, 31(6), 1561-1578.
- Shiozaki, T., K. Furuya, T. Kodama, and S. Takeda (2009), Contribution of N2 fixation to new production in the western North Pacific Ocean along 155 E, Marine Ecology Progress Series, 377, 19-32.
- Stuiver, M., P. Reimer, and R. Reimer (2017), CALIB 7.1 [WWW program], edited.
- Tan, S.-C., X. Yao, H.-W. Gao, G.-Y. Shi, and X. Yue (2013), Variability in the correlation between Asian dust storms and chlorophyll a concentration from the north to equatorial Pacific, PLoS One, 8(2), e57656.

- 0,
- Thorpe, S. (1977), Turbulence and mixing in a Scottish loch, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 286(1334), 125-181.
- Ujiie, Y., and H. Ujiie (2000), Distribution and oceanographic relationships of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, northwest Pacific Ocean, The Journal of Foraminiferal Research, 30(4), 336-360.
- Ullman, D. S., and D. Hebert (2014), Processing of underway CTD data, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 31(4), 984-998.
- Whalen, C. B., J. A. MacKinnon, L. D. Talley, and A. F. Waterhouse (2015), Estimating the Mean Diapycnal Mixing Using a Finescale Strain Parameterization, Journal of Physical Oceanography, 45(4), 1174-1188, doi:10.1175/Jpo-D-14-0167.1.
- Whitman, W. B., D. C. Coleman, and W. J. Wiebe (1998), Prokaryotes: the unseen majority, Proceedings of the National Academy of Sciences, 95(12), 6578-6583.
- Yamada, N., H. Fukuda, H. Ogawa, H. Saito, and M. Suzumura (2012), Heterotrophic bacterial production and extracellular enzymatic activity in sinking particulate matter in the western North Pacific Ocean, Frontiers in microbiology, 3, 379.
- Yamamoto, T., S. Nishizawa, and A. Taniguchi (1988), Formation and retention mechanisms of phytoplankton peak abundance in the Kuroshio front, Journal of plankton research, 10(6), 1113-1130.
- Yang, H.-S., S.-S. Kim, C.-G. Kang, and K.-D. Cho (1991), A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula-III. Chemical characteristics of water masses in the polar front area of the central Korean East Sea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 24(3), 185-192.
- Yang, H., G. Lohmann, W. Wei, M. Dima, M. Ionita, and J. Liu (2016), Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate, Journal of Geophysical Research: Oceans, 121(7), 4928-4945.
- Yatsu, A., S. Chiba, Y. Yamanaka, S.-i. Ito, Y. Shimizu, M. Kaeriyama, and Y. Watanabe (2013), Climate forcing and the Kuroshio/Oyashio ecosystem, ICES Journal of Marine Science, 70(5), 922-933.
- Yoneda, M., H. Uno, Y. Shibata, R. Suzuki, Y. Kumamoto, K. Yoshida, T. Sasaki, A. Suzuki, and H. Kawahata (2007), Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 259(1), 432-437.
- Yoon, J. E., K. Kim, A. M. Macdonald, K. T. Park, H. C. Kim, K. C. Yoo, H. I. Yoon, E. J. Yang, J. Jung, and J. H. Lim (2017), Spatial and temporal variabilities of spring Asian dust events and their impacts on chlorophyll a concentrations in the western North Pacific Ocean, Geophysical Research Letters, 44(3), 1474-1482.