

서북극 결빙해역에서 질소의 시공간적 변화 연구

A study on Spatio-Temporal Variation of Nitrogen in the Arctic
Ocean



한양대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 및 대양과학 연구 사업” 과제의 위탁연구 “서북극 결빙해역에서 질소의 시공간적 변화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 강 성 호

위탁연구기관명 : 한양대학교

위탁연구책임자 : 신 경 훈

위탁참여연구원 : 최 현 태

“ : 최 지 수

“ : 최 보 람

보고서 초록

위탁연구과제명	서북극 결빙해역에서 질소의 시공간적 변화 연구				
위탁연구책임자	신 경 훈	해당단계 참여연구원수	3 명	해당단계 연구비	5,000 만원
연구기관명 및 소속부서명	한양대학교 해양융합과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약					보고서 면수
<p>1. 연구목적 서북극해의 결빙 해역과 북태평양, 베링해, 척치해의 위도별 배경질소 파악과 해수기원에 따른 질소원 및 질소순환 연구</p> <p>2. 연구개발결과</p> <p>2.1. 위도별, 연도별 배경질소의 변동</p> <ul style="list-style-type: none"> - 정점별, 연도별로 채집된 요각류 <i>Calanus</i>속의 아미노산 질소 안정동위원소비를 분석하여, 배경 질소의 변동을 파악할 수 있는지 알고자 하였음. - 베링해에서 배경질소 안정동위원소비는 기존에 알려진 무기질소의 안정동위원소비가 유사하게 나타나며, 요각류를 이용하여 배경질소의 판별이 가능함을 알 수 있었음. - 이는 무기질소원이 결핍되기 쉬운 북극해역에서도 활용할 수 있었으며, 동시베리아해와 척치해 북부에서의 연간 배경질소 변동을 확인할 수 있었음. <p>2.2. 침강입자 시료를 활용한 계절별 배경질소의 변동</p> <ul style="list-style-type: none"> - 계절별로 채집된 침강입자 시료로부터 아미노산 질소 안정동위원소비를 분석하였음. - 결빙기와 여름철 bloom 시기에 특징적인 배경질소의 변동 패턴을 확인할 수 있었으며, 침강입자 내에 존재하는 일차생산자 기원 유기물의 상대적인 조성에 따라 조절되는 것으로 추측할 수 있었음. <p>3. 연구활용계획</p> <p>서북극해역의 질소원의 계절적, 공간적 변동을 아미노산 질소 안정동위원소비를 통해 확인할 수 있었으며, 장기적인 질소원 변동 연구에서 중요한 자료로 활용될 수 있음</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	배경 질소, 북극, 안정동위원소, 아미노산, Isoscape			
	영 어	Background Nitrogen, Arctic, Stable Isotope, Amino Acid, Isoscape			

요 약 문

I. 제 목

서북극 결빙해역에서 질소의 시공간적 변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 북극해역은 지구온난화에 의해 꾸준히 해빙이 감소하는 추세에 있으며, 이는 북극의 해양환경의 기초생산력 및 생태계 구조의 변화를 야기할 수 있음.
- 이에 따라 북극해역의 질소 순환 과정과 질소원의 변화 연구는 미래 기후 변화에 따른 해양환경 또는 생태계 변화를 유추하기 위한 자료로써 의미가 매우 큼
- 최근 사용되고 있는 아미노산의 질소 안정동위원소비 분석법은 질소순환 연구에 필요한 배경질소 정보를 얻을 수 있어 활용도가 높을 것으로 기대되고 있으나, 해당 연구기법을 활용한 북극해의 배경질소에 대한 연구사례는 부족한 실정임
- 따라서 본 연구의 아미노산 질소 안정동위원소비를 활용한 북극해의 배경질소 파악 연구는 기존의 연구 기법의 한계로 인해 얻지 못한 배경질소 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대됨

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 배경질소의 공간적 변동 및 연간 변화 파악 (2015~2018년)
 - 요각류 *Calanus*속의 bulk 질소 안정동위원소비 분석
 - 요각류 *Calanus*속의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석
 - 조사해역 (이동항해, 베링해, 척치해 북부, 동시베리아해 북부)에 따른 배경질소의 공간적 변화 해석
 - 조사연도에 따른 배경질소의 시간적 변화 해석
- 배경질소의 계절적 변동 파악 (2017~2019년)
 - 침강입자의 bulk 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석
 - 침강입자의 아미노산 함량 분석
 - 배경질소의 계절적 변동 요인 해석

IV. 연구개발결과

- 요각류 *Calanus*속의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 통한 배경질소 안정동위원소비
 - 베링해에서의 배경질소 안정동위원소비 ($5.67 \pm 1.64\%$)는 기존에 알려진 무기질소의 안정동위원소비와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었음
 - 북극해역에서는 4.63~8.68%의 배경질소 안정동위원소비 값을 확인할 수 있었음
 - 2018년 동시베리아해 북부 해역에서 2.88~5.63%의 범위로 배경질소가 감소하는 현상을 확인할 수 있었으며, 저층의 영양염이 공급되면서 배경질소를 변화시켰을 것으로 생각됨

- 침강입자 시료의 아미노산 조성 및 질소 안정동위원소비
 - 가을 동안 결빙기에 접어들면서 일차생산의 감소와 미생물 활동의 상대적 증가에 의해 배경질소의 안정동위원소비가 증가하는 것을 확인하였음
 - 배경질소 안정동위원소비는 여름철 bloom이 시작되면 일시적으로 감소하는 현상을 확인함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 기후변화 연구의 기초자료 제공
- 분자단위 안정동위원소 분석 기법의 극지 해양학 분야 활용에 대한 연구기반 조성
- 북극권에서 국가적 협력관계 구축을 위한 연구자료 활용



S U M M A R Y

I. Title

A study on Spatio-Temporal Variation of Nitrogen in the Arctic Ocean

II. Purpose and Necessity of R&D

- The Arctic Ocean has experienced severe decrease of sea ice, resulting in change of primary production and ecosystem structure within the marine environment.
- Understanding the nitrogen cycle and nitrogen source trace is important in order to predict marine environment and ecosystem change according to future climate change.
- Nitrogen isotope of amino acids is a promising tool to obtain nitrogen baseline information for understanding the marine nitrogen cycle. However, there is limited information on nitrogen baseline estimated by nitrogen isotope of amino acids in the Arctic Ocean.
- Thus, nitrogen baseline estimation in the Arctic Ocean can provide nitrogen baseline information, which could not be obtained previously.

III. Contents and Extent of R&D

- Spatial and temporal variation of nitrogen baseline (2015~2018)
 - Bulk nitrogen isotope analysis of copepod *Calanus*
 - Amino acid nitrogen isotope analysis of *Calanus*
 - Interpretation of the spatial variation of nitrogen baseline in study area (North Pacific, Bering Strait, northern Chukchi Sea, northern East Siberian Sea)
 - Interpretation of the annual change of nitrogen baseline
- Seasonal variation of nitrogen baseline (2017~2019)
 - Bulk carbon and nitrogen isotope analysis of sinking particles
 - Amino acid contents analysis within sinking particles
 - Interpretation of seasonal variation of nitrogen baseline

IV. R&D Results

- Nitrogen baseline estimated by nitrogen isotope ratio of amino acid in *Calanus*
 - Nitrogen baseline within the Bering Sea ($5.67 \pm 1.64\text{‰}$) was similar range to nitrogen isotope ratio of dissolved nitrogen reported in previous study.
 - The range of $4.63 \sim 8.68\text{‰}$ of nitrogen baseline was found in the Pacific Arctic Ocean.
 - A decrease of nitrogen baseline to $2.88 \sim 5.63\text{‰}$ was observed in northern East Siberian Sea in 2018, suggesting alteration of nitrogen baseline by supply of nutrient from deep ocean.
- Amino acid composition and nitrogen isotope ratio
 - Nitrogen baseline increased from autumn due to the decrease of primary production and relative increase of microbial activity.
 - In summer bloom, nitrogen baseline temporarily decreased.

V. Application Plans of R&D Results

- Providing the research results to climate change study
- The application of compound-specific isotope analysis on marine science in the Arctic Ocean for the establishment of research base
- Use of the research results to build international cooperation in the Arctic Ocean

목 차

제 1 장 서 론	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황	11
제 1 절 국내 기술 개발 현황	11
제 2 절 국외 기술 개발 현황	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	13
제 1 절 연구지역 및 시료채취	13
제 2 절 재료 및 방법	15
1. Bulk tissue의 탄소 및 질소 안정동위원소비	15
2. 아미노산의 조성 및 질소 안정동위원소비 분석	16
3. 데이터의 처리	18
제 3 절 결과 및 고찰	20
1. 요각류 <i>Calanus</i> 의 배경질소의 시공간적 변화	20
2. 침강입자의 배경질소의 시공간적 변화	30
제 4절 요약	45
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	46
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	47
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	48
제 7 장 참고문헌	49
별첨자료 (연구성과)	52
부 록	49

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 이론

해양환경에는 다양한 질소 안정동위원소비를 갖는 무기질소들이 존재하며, 1차 생산자들은 다양한 무기질소들을 유기질소로 동화시킨다. 1차 생산자의 종류에 따라, 환경 내의 무기질소의 상대적 기여도에 따라 배경 질소 안정동위원소비는 다르게 나타날 수 있다 (그림 1). 근래에 질소 안정동위원소비를 활용하여 질소순환의 과정을 확인하고 수피의 기원을 알기 위한 연구는 증가하고 있으며, 복잡한 해양 질소순환을 이해하기 위한 중요한 정보를 제공하고 있다. 질소원의 안정동위원소비 (배경질소)를 알고 그 변동 요인을 알기 위한 연구로써 무기질소, 일차생산자, 소비자가 사용될 수 있다. 그러나 무기질소의 경우 무기질소원이 결핍된 해역에서는 질소 안정동위원소 분석을 위한 시료의 확보가 극히 제한적인 문제가 있다. 일차생산자는 질소원이 가진 질소 안정동위원소비에 가장 가까울 수 있으나, 현장에서 식물플랑크톤만을 분별하여 채집하기 어려우며, 안정동위원소비의 turnover rate가 빠르기 때문에 정확한 배경질소 정보를 알기 어렵다. 동물플랑크톤의 경우, 안정동위원소비의 turnover rate는 식물플랑크톤에 비해 느리지만, 이들이 갖는 영양 단계에 따라 질소 안정동위원소비가 높아지는 문제가 있어, 이들의 질소 안정동위원소비는 두 가지 정보(배경질소와 영양단계)가 혼재되어 있다. 이처럼 배경질소의 연구는 질소 안정동위원소가 갖는 분별계수 (fractionation factor)의 다양성과 변화에 대해 고려되어야 하기 때문에 현장에서의 시료 채집과 분석결과의 해석에 어려움이 있다 (그림 2).

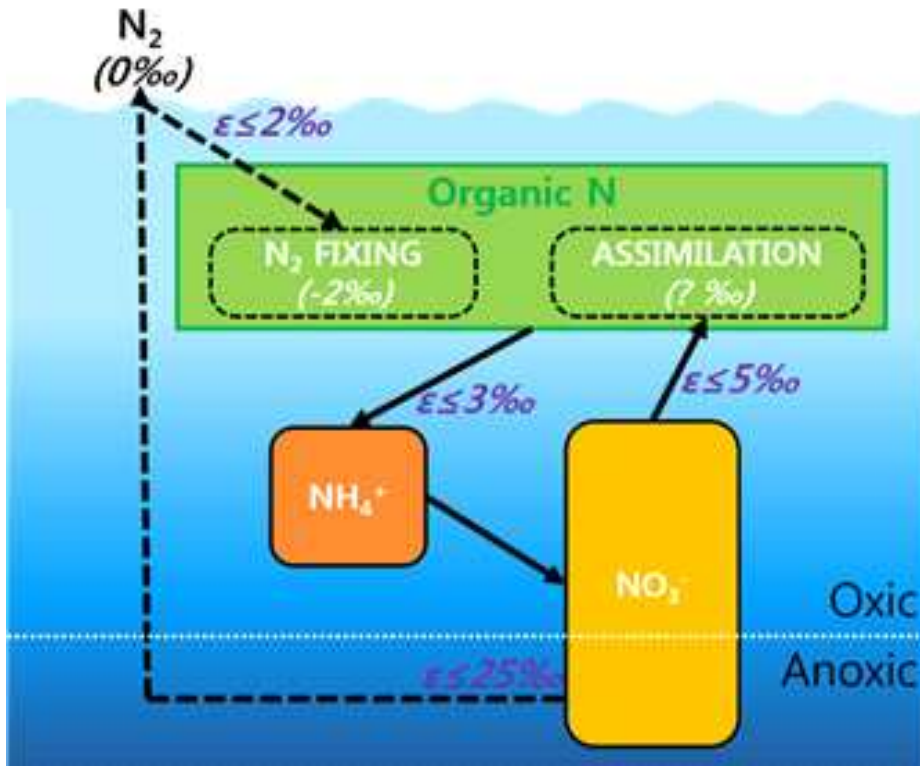


그림 1. 무기 질소들의 질소 안정동위원소비와 일차 생산 과정에서 발생할 수 있는 질소 안정동위원소비의 fractionation factor.

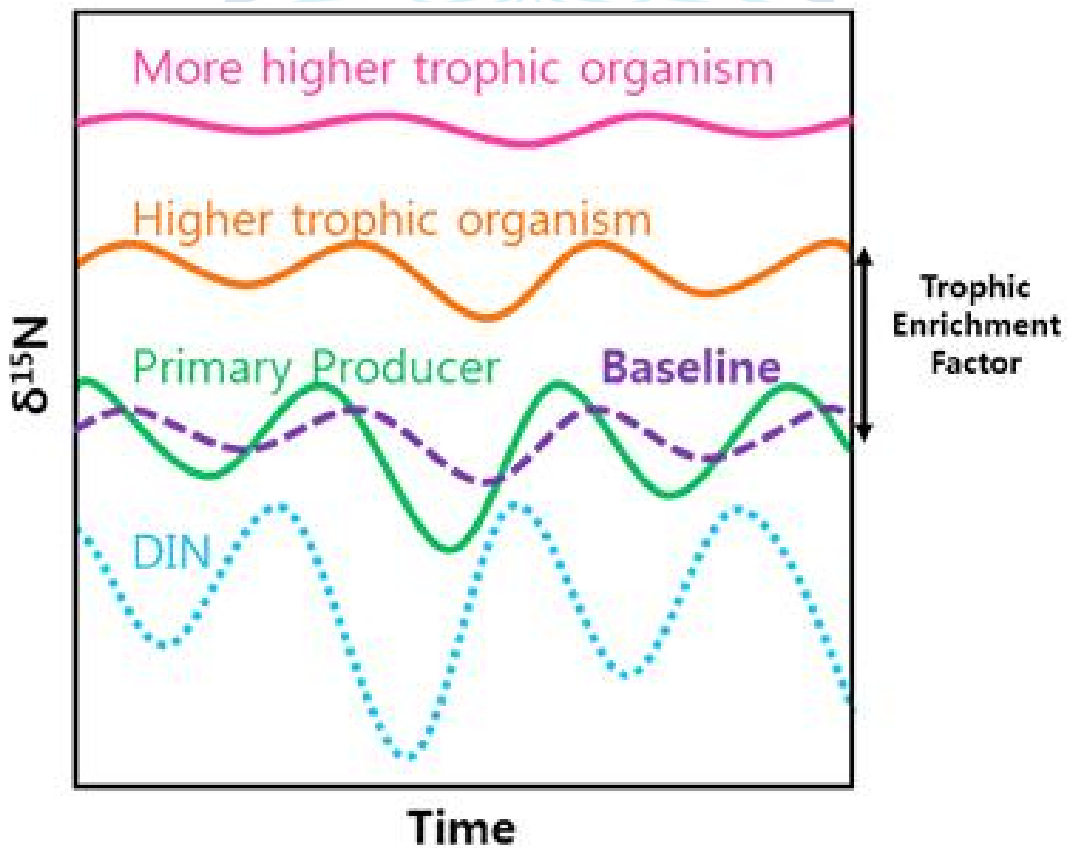


그림 2. 해양환경 내의 여러 시료들이 갖는 질소 안정동위원소비의 turnover rate.

아미노산의 질소 안정동위원소비 분석 기법은 기존의 질소 안정동위원소비의 해석에서 발생할 수 있는 문제를 보완할 수 있는 방법으로 활용되기 시작하였으며, 특히 생태학 분야에서는 생물로부터 보다 정확하고 신뢰성 있는 영양 단계 정보를 얻을 수 있는 것으로 확인되었다 (Bowes and Thorp, 2015; Choi et al., 2020). 이는 아미노산들이 생물체 내부에서 가지는 물질대사 과정에 따라 질소원의 정보를 보존하고 있는 아미노산 (source amino acid)과 영양단계의 정보를 가진 아미노산(trophic amino acid)으로 구분되기 때문이다. 이는 질소순환의 연구에서 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각되며, 본 연구에서는 배경질소의 공간적 분포를 파악하기 용이한 시료들을 채집하여 아미노산 질소 안정동위원소 분석을 수행하였다.

요각류 *Calanus*속은 북극해 및 북태평양에서 공통적으로 발견되는 요각류이며, 여과 섭식을 통해 수중에 존재하는 입자들을 섭식한다. 따라서 이들은 먹이 선택성이 없기 때문에 수중에 존재하는 입자들의 질소 안정동위원소비를 반영하고 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 *Calanus*로부터 분석되는 아미노산 질소 안정동위원소비를 활용하여 서식 해역의 배경질소를 추정하고, 해역에 따른 차이와 그 차이를 일으키는 요인에 대해 알아보하고자 하였다.

침강입자는 sediment trap을 이용하여 채집되는 시료로, 북극해의 특성상 현장조사가 어려운 계절의 시료를 얻을 수 있어 근래의 북극해 연구에서 폭넓게 사용되어왔다. 포집된 침강입자 시료를 통해 계절에 따른 배경질소의 변동을 파악할 수 있을 것으로 기대되며, 특히 잘 알려지지 않은 결빙기간 동안의 물질순환과 미소생태계의 역할을 파악할 수 있는 시료로 생각된다. 본 연구에서는 2년간의 침강입자 시료로부터 아미노산 질소 안정동위원소비를 분석하여 계절에 따른 배경질소의 변동과 그 변동 요인을 파악하고자 하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술 개발 현황

국내에서 아미노산의 안정동위원소비 분석 기법을 활용한 관련 연구사례는 점차 증가하는 추세에 있으며, 환경화학 분야 (Kim et al., 2020; Won et al., 2020), 연안생태 분야 (Choi et al., 2017), 담수생태 분야 (Choi et al., 2020) 등의 다양한 분야에서 전개되고 있다. 극지해역을 대상으로는 Svalbard에서 동물플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 수행하여 월동 동안의 동물플랑크톤의 영양단계 변화를 제시한 논문이 보고된 바 있다 (Choi et al., 2020).

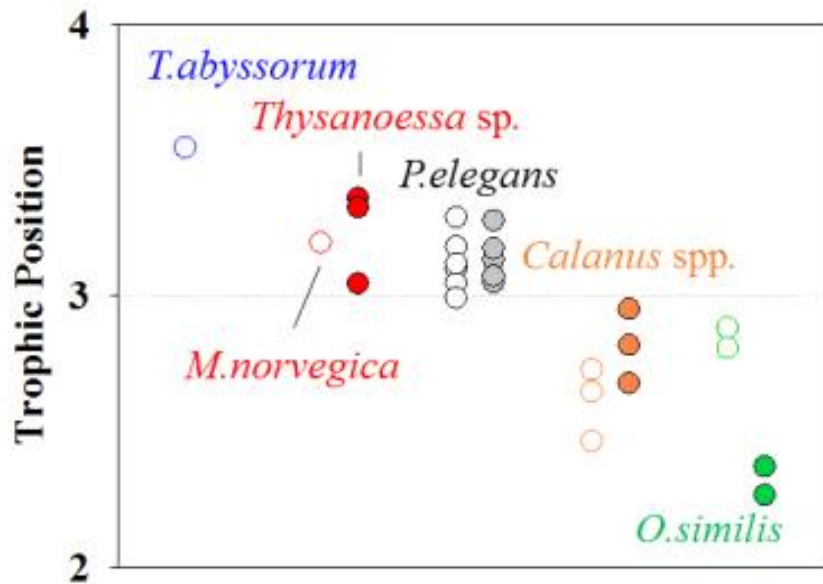


그림 3 Kongsfjorden (Svalbard)에서 채집된 동물플랑크톤들의 극야 전과 후의 영양단계 변화 비교 연구 (Choi et al., 2020).

제 2 절 국외 기술 개발 현황

질소 안정동위원소를 이용한 해양으로 유입되는 다양한 질소의 기원 파악, 질소순환과정 연구의 활용도가 높아지면서 많은 연구가 시도되고 있는 추세이다. 그러나 질소 안정동위원소 분별계수의 다양성 및 변화에 대한 고려가 요구되고 있으며 접근 방법의 한계가 드러나고 있다. 아미노산의 질소 안정동위원소비 분석 기법은 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 기존의 연구 방법에 비해 보다 정확하고 신뢰성 있는 결과를 제시하고 있다. 이는 생물 또는 해양에 존재하는 유기물들이 가진 아미노산의 질소 안정동위원소비를 통해 서식환경이 가진 질소원의 질소 안정동위원소비 (배경질소)를 추적하여, 질소원의 시간적 또는 공간적 변동을 파악할 수 있는 원리에 착안한다.

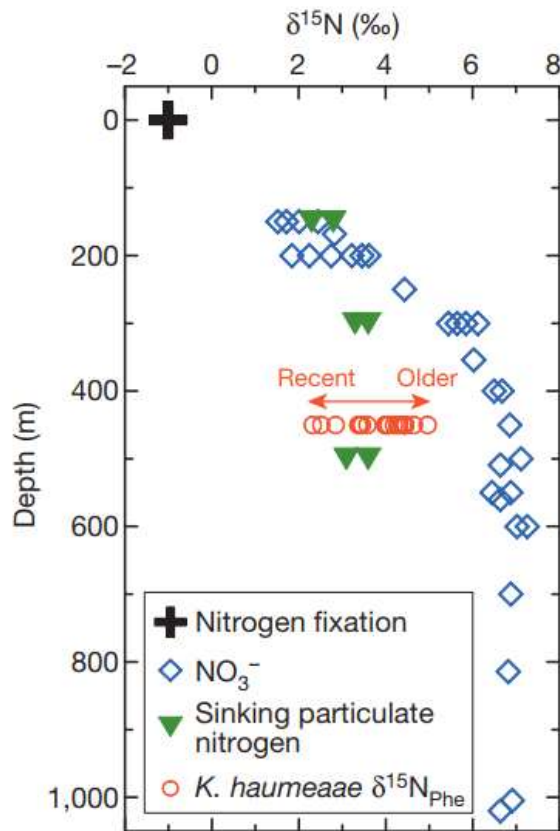


그림 4 산호(*Kulamanamana haumea*)의 아미노산 질소 안정동위원소 분석을 통한 시간별 배경 질소원의 변동 (Sherwood et al., 2014).

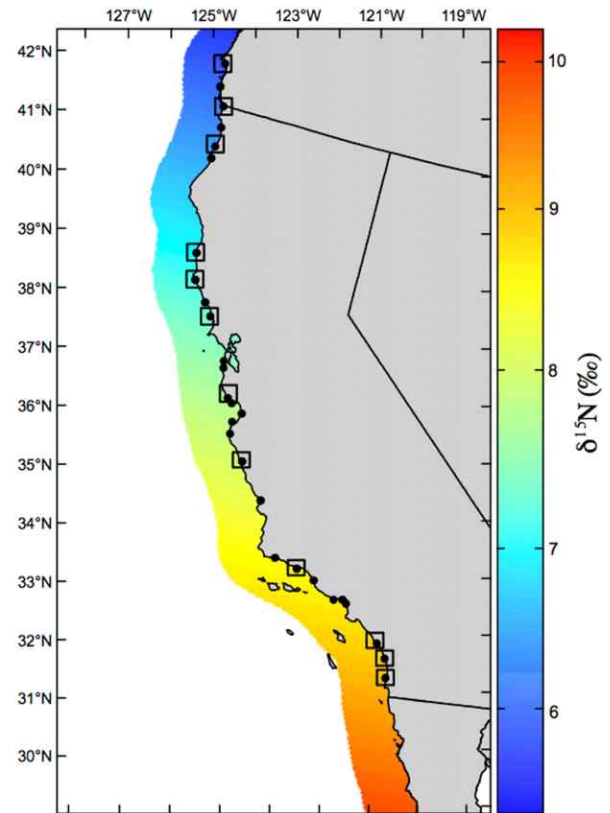


그림 5 캘리포니아 서부 용승해역에서 이매패류의 아미노산 질소 안정동위원소 분석을 통한 배경질소의 공간적 분포 (Vokhshoori and McCarthy, 2014)

극지연구소

미국 해양대기청 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 진행 중인 북극해역 생태조사 프로젝트인 DBO (Distributed Biological Observatory)를 통해 베링해, 칩치해, 보퍼트해에 이르는 북극해의 생태계 조사가 지속적으로 이루어지고 있다. 이 조사를 통해 확보된 다양한 생물군으로부터 먹이망 구조, 종 다양성 등의 생태적 연구들이 이루어지며, 근래에는 아미노산 질소 안정동위원소비를 활용한 연구사례 또한 보고된 바 있다 (Kedra et al., 2019). 이외에 북극해 생태계를 대상으로 한 아미노산의 안정동위원소비 분석 연구 또한 증가 추세에 있으며, 현재까지는 북극고래 (Pomerleau et al., 2017), 범고래 (Matthews and Ferguson, 2014) 등과 같은 북극권에 서식하는 해양 포유류를 주제로 한 연구 사례들이 보고되고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구지역 및 시료채취

본 연구진은 2015년부터 2019년까지 연 1회 현장 조사를 수행하여 시료 채집을 수행하였다. 상세한 조사연도별 연구정점은 그림 6 및 그림 7에 나타내었다.

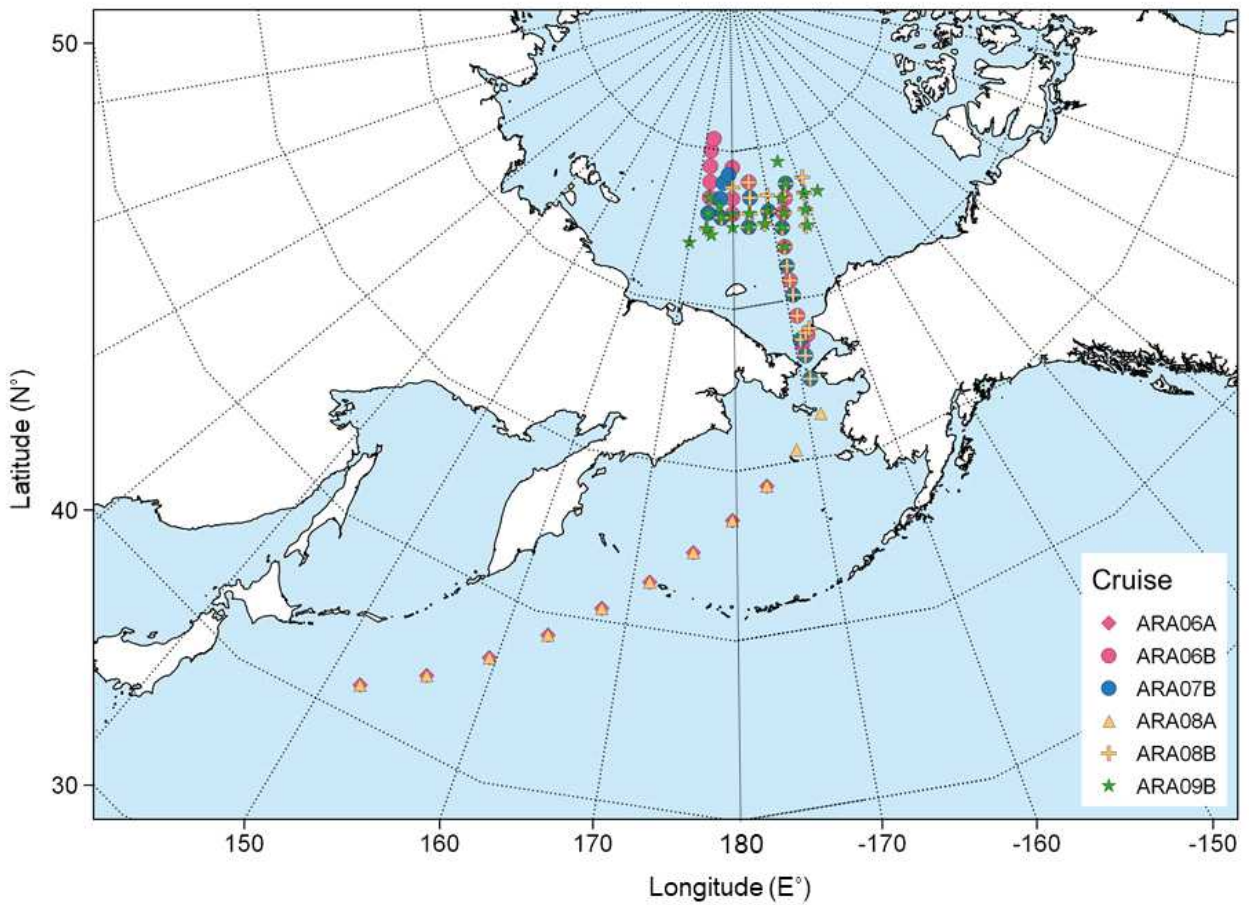


그림 6. 입자성 유기물 및 동물플랑크톤 시료가 채집된 정점.

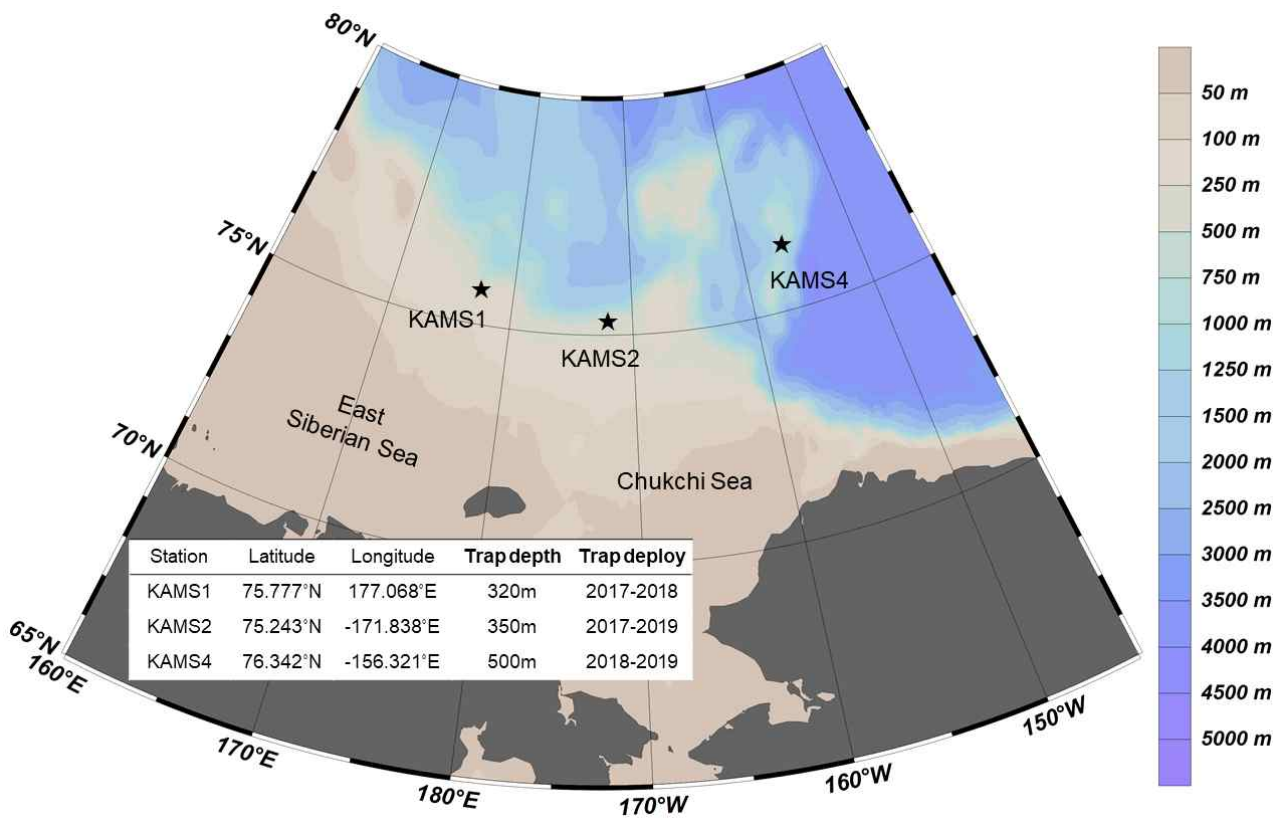


그림 7 침강입자 시료가 채집된 정점.

2015년부터 2019년까지 매년 8월 각 정점에서 현장 조사를 수행하였다. 매 정점마다 입자성 유기물 및 동물플랑크톤 시료를 채집하였다. 입자성 유기물은 현장수 4~6L를 미리 태워진 GF/F (지름 25 mm, 공경 0.7 μm , Whatman)를 이용하여 여과하였다. 동물플랑크톤은 bongo net (500 μm mesh, 60 cm diameter)를 이용하여 100 m 수심까지 수직 채집하였다. 동물플랑크톤은 실험실로 옮겨온 후 요각류 (*Calanus* spp.)를 분류하여 분석에 사용하였다. 모든 시료는 승선 기간 동안 냉동보관한 후 실험실로 옮겨와 동결건조 하였다. 또한, 2017~2018년과 2019~2020년에 확보된 침강입자 시료를 확보하여 분석에 사용하였다.

제 2 절 재료 및 방법

1. Bulk tissue의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석

탄소 및 질소 안정동위원소비는 EA/IRMS (vario EL cube, Elementar/Isoprime 100, GV instruments)를 이용하여 분석하였다. 입자성 유기물 및 동물플랑크톤은 질소 안정동위원소비 분석에 사용하였고, 침강입자 시료는 1M HCl을 이용하여 무기탄소를 제거한 후 탄소 안정동위원소비를 분석하였고, 무기탄소가 제거되지 않은 시료를 이용하여 질소 안정동위원소 분석을 수행하였다. 분석값의 정확성을 확인하기 위해 탄소 및 질소 안정동위원소비가 알려진 표준물질 (CH-3, IAEA/N-1, IAEA)을 약 10개 시료 분석 시마다 분석하였다. 분석 기간 중 표준 물질의 안정동위원소 분석값의 오차는 0.3% 미만으로 나타났다. 안정동위원소비는 다음과 같은 방정식에 따라 계산되었다.

$$\delta X = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 (\%)$$

X는 해당 원소의 안정동위원소를, R은 각 원소에 해당하는 표준물질의 동위원소 비율을 나타낸다. 탄소 안정동위원소비는 PDB (Pee Dee Belemnite)를, 질소 안정동위원소비는 N₂ 가스를 표준물질로 사용하여 델타(δ) 표기법으로 표현하였다. 분석 기간 중 표준 물질의 안정동위원소 분석값의 오차는 0.3% 미만으로 나타났다.

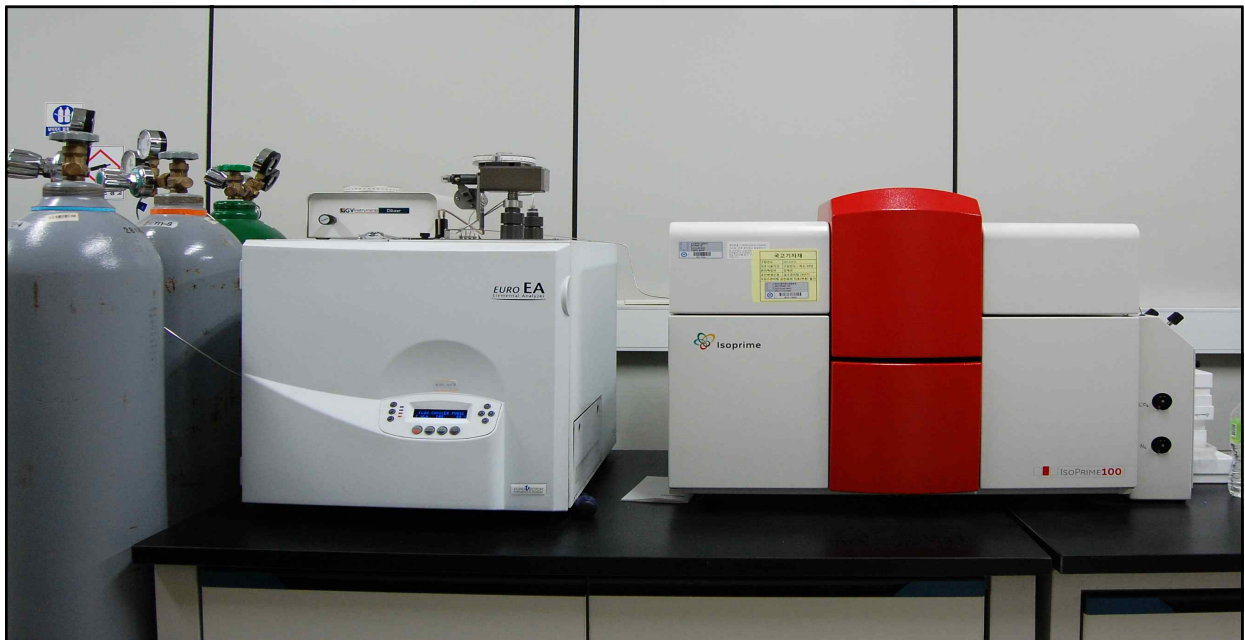


그림 8 Bulk tissue의 안정동위원소비 분석을 위한 분석기기 (EA/IRMS).

2. 아미노산의 조성 및 질소 안정동위원소비 분석

시료의 아미노산 전처리 과정은 시료의 단백질을 아미노산 단위로 분해하고, 기체 크로마토그래피 상에서의 분석을 위해 아미노산 분자들의 휘발성을 높이는 과정들이 수행된다 (그림 3.3.3.3.5). 건중량 기준 2~6 mg에 해당하는 동물플랑크톤 시료를 6M HCl을 이용하여 110°C에서 2~24시간 동안 가수분해 하였다. 시료는 상온까지 냉각시킨 후 PTFE membrane filter (0.2 μm pore size)를 이용하여 입자 물질을 제거하였다. 이후 6:5 n-hexane/dichloromethane (v/v)를 이용하여 시료 내의 지질 및 소수성 성분을 제거하였다. 침강입자 시료의 경우 별도의 정제 과정 (Takano et al., 2010)을 통해 시료 내의 이온과 Si 등의 불순물을 제거하였다. 정제 과정은 Cation-exchange resin (AG-50W X8, 200-400 mesh size, Bio-rad)을 이용한 카트리지에 시료를 통과시켜 아미노산을 추출하였다. 이후 시료들의 첫 번째 유도체화 반응 (esterification)을 실시하였다. 건조된 시료에 1:4 thionyl chloride/2-propanol (v/v)를 첨가한 후 110°C에서 2시간 동안 반응시켰다. 반응이 끝난 시료의 reagent를 제거한 후 1:4 pivaloyl chloride/dichloromethane (v/v)를 첨가하여 두 번째 유도체화 반응 (pivaloylation)을 실시하였다. 반응이 끝난 시료는 건조시킨 후 증류수와 6:5 n-hexane/dichloromethane (v/v)를 이용하여 증분리한 후, 아미노산 유도체가 포함된 상등액을 옮겨 건조시켰다. 아미노산 유도체는 dichloromethane에 용해시킨 후 분석 전까지 -20°C 냉동고에 보관하였으며, GC/FID, GC/IRMS 분석에 사용되었다. 침강 입자 시료의 아미노산 조성을 파악하기 위해 정량 분석을 수행하였으며, GC/FID (Shimadzu GC-2010)을 이용하였다. GC column은 HP Ultra-2 (25m length, 320mm ID, 0.12 μm film thickness, Agilent)를 사용하였다. 시료의 분석에 앞서 각 아미노산의 표준 물질을 이용하여 검량선을 작성하였으며, 침강 입자 시료의 아미노산 함량 계산에 사용하였다.

아미노산의 질소 안정동위원소비는 GC/IRMS (Agilent 6890N, Agilent/Isoprime 100, Isoprime)을 이용하여 분석하였다 (그림 3.3.3.3.6). GC column은 HP Ultra-2 (25m length, 320mm ID, 0.12 μm film thickness, Agilent)를 사용하였다. 산화관은 산화구리, 산화니켈, 백금 와이어가 충전된 석영관을 950°C에서, 환원관은 구리 와이어가 충전된 세라믹관을 500°C에서 사용하였다. 분석값의 정확성은 질소 안정동위원소비가 알려진 아미노산 표준 물질 (alanine, glycine, valine, leucine, aspartic acid, methionine, glutamic acid, phenylalanine, SHOKO-Science 및 Indiana University)을 동일한 전처리 방법으로 준비하여, 5개 시료 분석 시마다 분석하였다. 분석 기간 중 표준 물질의 평균 오차는 1% 미만으로 나타났다.

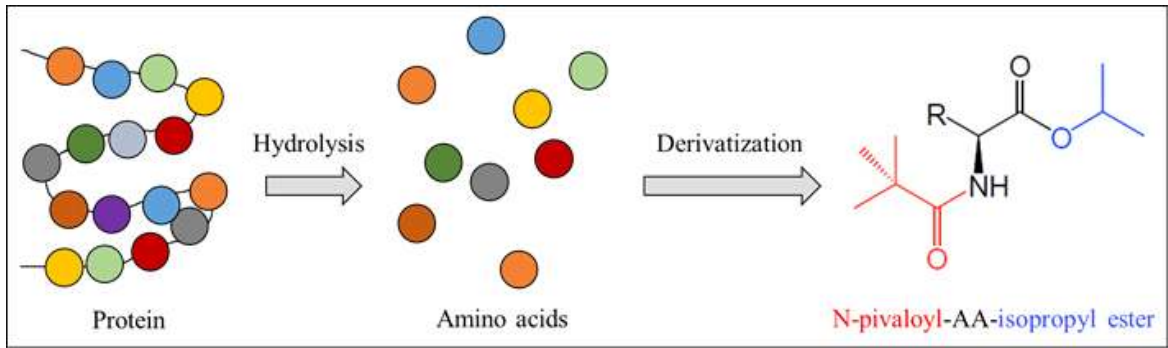


그림 9. 시료의 아미노산 전처리 과정.



그림 10. 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 장비 (GC/IRMS).

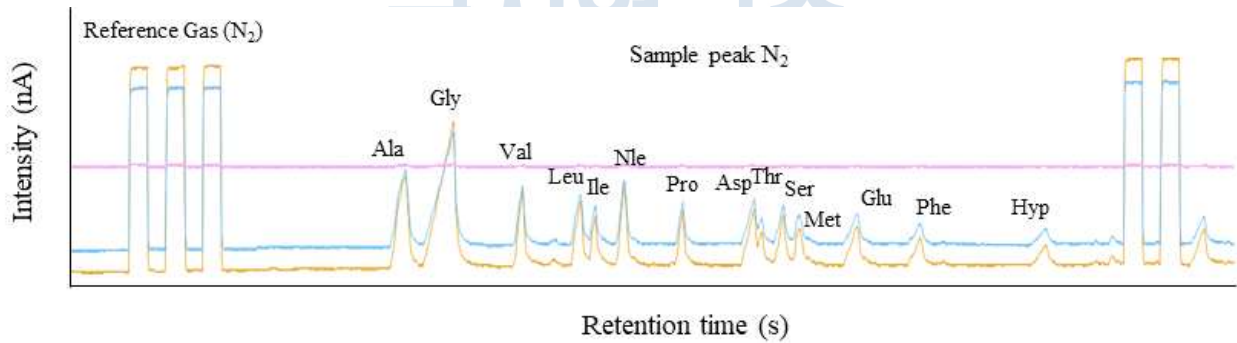


그림 11. GC/IRMS 상에서 검출되는 아미노산의 chromatogram.

3. 데이터의 처리

(가) 영양 단계의 산출

영양 단계(Trophic Level, TL)는 Chikaraishi et al (2009)에 의해 고안된 식으로 계산하였다.

$$TL = [(\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 3.4) / 7.6] + 1$$

$\delta^{15}N_{Glu}$ 와 $\delta^{15}N_{Phe}$ 는 각각 생물의 glutamic acid와 phenylalanine의 질소 안정동위원소비를 나타낸다. 3.4‰(β value)은 1차 생산자의 $\delta^{15}N_{Glu}$ 와 $\delta^{15}N_{Phe}$ 의 차이를 나타내는 경험값이 사용되었다. 7.6‰(Trophic Enrichment Factor, TEF)은 영양 단계의 상승 시 $\delta^{15}N_{Glu}$ 와 $\delta^{15}N_{Phe}$ 의 enrichment의 차이를 나타내는 경험값이 사용되었다.

(나) 배경 질소의 산출

아미노산의 질소 안정동위원소 분석은 정확한 영양 단계 정보를 제공할 수 있다. 또한 섭취자의 Phenylalanine의 질소 안정동위원소비는 먹이원으로부터의 변동이 낮은 것으로 알려져 있기 때문에, 배경질소를 파악할 수 있는 자료로써 사용할 수 있다. 두 가지의 특징을 활용하여, 기초생산자가 가진 Bulk 질소 안정동위원소비를 산출할 수 있다. 배경질소 안정동위원소비($\delta^{15}N_{Baseline}$)는 소비자의 Bulk 및 아미노산의 질소 안정동위원소 정보를 모두 사용하며, 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\delta^{15}N_{Baseline} = \delta^{15}N_{consumer} - (TP_{AAs} - 1) \times TEF_{Bulk}$$

(다) Degradation Index의 산출

기존에 침강입자 혹은 퇴적물로부터 아미노산의 조성을 확인한 연구에 따르면, 미생물에 의한 유기물 분해 과정이 진행됨에 따라 아미노산의 전체적인 조성비가 변화하여, 생물 혹은 fresh한 유기물 시료들과 구분되는 특징이 있는 것이 보고된 바 있다 (Cowie and Hedges, 1992; Dauwe and Middelburg, 1998). 이는 Degradation index (DI)를 통해 확인할 수 있으며, Dauwe and Middelburg (1998)에 보고된 reference data를 이용하여 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$DI = \sum [(var_i - AVG_i) / STD_i] * factor\ coefficient_i$$

AVG_i , STD_i , $factor\ coefficient_i$ 는 각각 Dauwe (1999)에서 사용된 i 번째 아미노산의 mol%의 평균값, 표준편차, 상관계수이며 var_i 는 시료의 i 번째 아미노산의 mol%에 해당한다.

(라) Total hydrolysable AA (THAA)의 질소 안정동위원소비 산출

아미노산의 질소 안정동위원소비는 아미노산의 정량적인 정보와 결합하여 전체 아미노산의 질소 안정동위원소비를 계산할 수 있다. 전체 아미노산 (THAA)에서 각 아미노산의 mol 농도가 차지하는 비율을 환산하여 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$\delta^{15}N_{THAA} = \sum (\delta^{15}N_{AA} * mol\%_{AA})$$

(마) ΣV 산출

아미노산 중에서 trophic AAs에 해당하는 아미노산들은 미생물 활동에 의해 분해되거나 재합성되면서 기존의 trophic AAs들이 갖는 질소 안정동위원소비에서 불규칙하게 벗어나는 현상을 보인다. trophic AAs의 질소 안정동위원소비의 편차를 계산하여 유기물의 분해 및 재합성 정도를 평가하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다 (McCarthy et al., 2007).

$$\Sigma V = \sum [| \delta^{15}N_{AA} - \delta^{15}N_{Trophic AA} | / n]$$

$| \delta^{15}N_{AA} - \delta^{15}N_{Trophic AA} |$ 항은 각 trophic AA의 편차의 절대값을 나타내며, n은 계산에 사용된 trophic AA의 수이다. 계산된 ΣV 값은 fresh한 식물성 플랑크톤이나 입자성 유기물에서는 1.5‰ 미만의 값을 보이지만, 유기물 분해 및 재합성이 진전된 시료에서는 1.5‰ 이상의 값을 보이며 3~4% 까지도 증가하게 된다.



제 3 절 결과 및 고찰

1. 요각류 *Calanus*의 배경질소의 시공간적 변화

가. 북서태평양과 북극해의 배경질소 변동

북서태평양 해역의 시료는 2015년과 2017년에 채집되었으며, 본 연구에서는 두 항차에서 채집된 요각류의 배경질소 안정동위원소비에 대해 비교하였다 (그림 12). Bulk 질소 안정동위원소비는 북위 40~60도 북서태평양 해역에서 가장 낮게 나타나다가, Bering Sea에서부터 급격한 증가를 보이며 북극해 정점들에서 전체적으로 10% 이상의 값을 보였다. 연도별 차이를 비교하였을 때, 북위 40~60도 북서태평양 해역의 시료들은 2015년에 4.03~6.90%, 2017년에 3.56~7.45%이었고, 북극해 시료들은 2015년에 8.39~12.33%, 2017년에 6.75~13.02%로 나타났다. 두 조사연도에서 모두 북극해역에서 질소 안정동위원소비가 북서태평양 해역에 비해 높은 것으로 나타나며, 질소 안정동위원소비의 범위는 2017년에 근소하게 넓은 것으로 확인되었다. 이와 같은 특징은 아미노산 glutamic acid와 phenylalanine에서도 유사하게 확인된다 (그림 13~14). Glutamic acid는 북위 40~60도 북서태평양 해역에서 2015년에 13.94~19.71%, 2017년에 13.45~20.91%이었고, 북극해 시료들은 2015년에 20.26~25.92%, 2017년에 18.74~24.93%로 나타났다. Phenylalanine은 북위 40~60도 북서태평양 해역에서 2015년에 -0.32~4.95%, 2017년에 -0.97~4.46%이었고, 북극해 시료들은 2015년에 3.86~9.90%, 2017년에 3.99~10.11%로 나타났다.

*Calanus*의 영양단계는 큰 차이가 나타나지 않았으며, 해역간 또는 조사연도 간 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 동일한 분류군에 속하는 *Calanus*의 먹이원이 해역에 따라 큰 차이가 없으며, 먹이망에서 유사한 생태적 위치를 가지고 있음을 시사한다. 이를 통해 계산된 배경질소 안정동위원소비는 Phenylalanine과 유사한 경향을 보인다. 배경 질소 안정동위원소비를 통해 확인할 수 있는 것은, 북서태평양 해역과 북극해의 일차생산에 영향을 미치는 질소원이 상이하다는 것이다. 배경질소 안정동위원소비는 위도에 따라 증가하는 양상을 보이며, 조사연도 사이에서 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 확인된다 (그림 15). 40~60도 북서태평양 해역에서의 배경 질소 안정동위원소비는 2015년에 -0.21~3.71%, 2017년에 -0.64~3.18%로, 일부 정점에서 질소고정에 의한 일차생산이 우세한 것으로 추측할 수 있다. 베링해에서는 수온, 염분, 영양염의 함량 등이 다양한 해류가 존재하며 일차생산량 또한 높게 나타난다. 반면 북극해의 표층수는 여름철 용빙수와 담수의 유입으로 인해 성층화가 발생하며, 표층의 영양염이 고갈된 상태로 알려져 있다. 이는 DIN (dissolved inorganic nitrogen)의 질소 안정동위원소비의 변동을 통해서도 확인할 수 있다. 예를 들어 생산력이 높은 베링해에서의 DIN의 질소 안정동위원소비는 평균적으로 6.5%로 알려진 바 있다 (Granger et al., 2011). 또한 보퍼트해 동부는 여름철 성층화로 인해 표층의 영양염이 결핍되는 것으로 알려지며, 이 때의 DIN의 질소 안정동위원소비는 평균적으로 8.0%로 보고되었다 (Granger et al., 2018). 베링해의 경우, 2015년과 2017년을 합한 배경질소 안정동위원소비의 평균값은 $5.67 \pm 1.64\%$ 로, 알려져 있는 값 (6.5%)에 근접한 양상을 보인다. 반면 북극해의 경우 여러 해역이 존재하고, 해역마다의 질소 안정동위원소비의

연간 변동 또한 상이한 패턴을 가질 수 있기 때문에 보다 세밀한 해석이 요구된다.

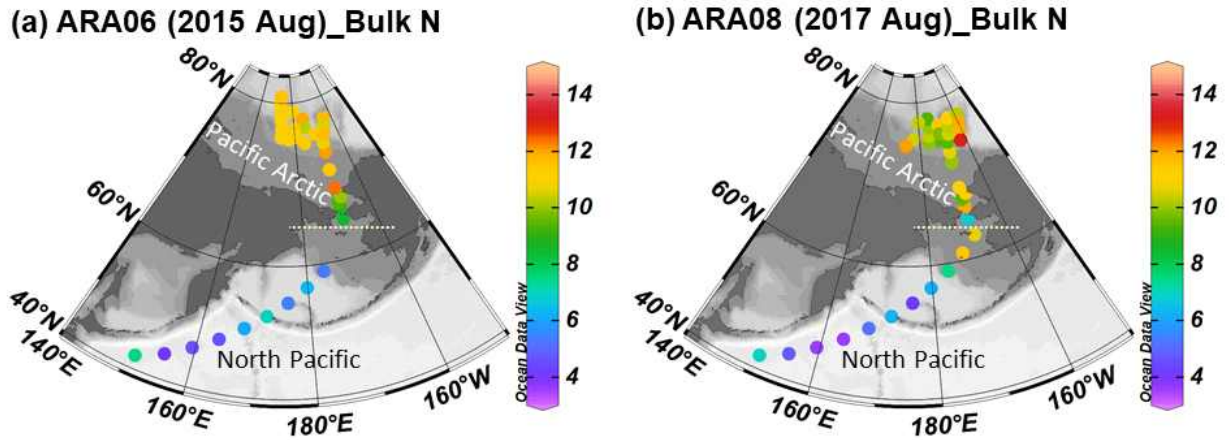


그림 12. 2015년(a)과 2017년(b)에 채집된 *Calanus* spp.의 Bulk 질소 안정동위원소비.

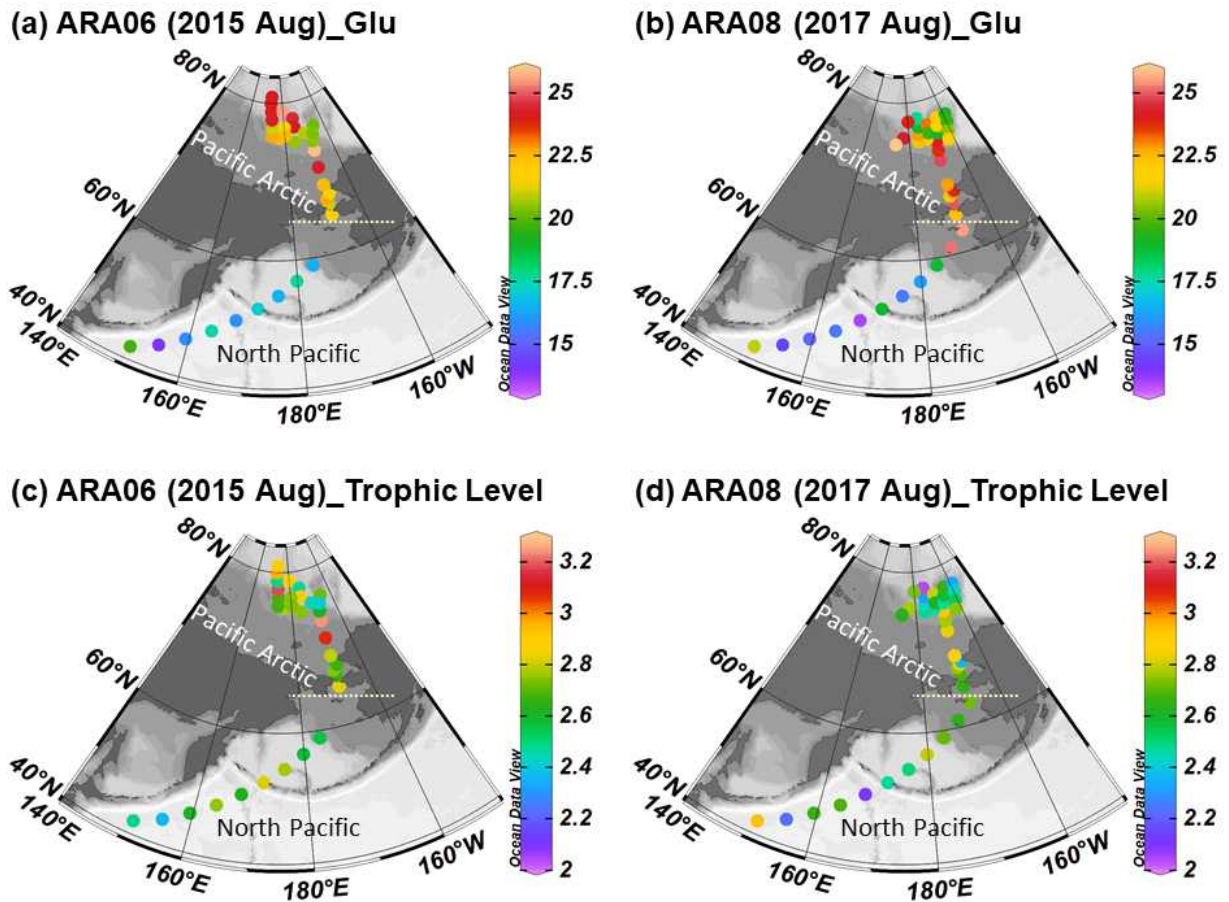


그림 13. 2015년(a)과 2017년(b)에 채집된 *Calanus* spp.의 Glutamic acid의 질소 안정동위원소비와 영양단계.

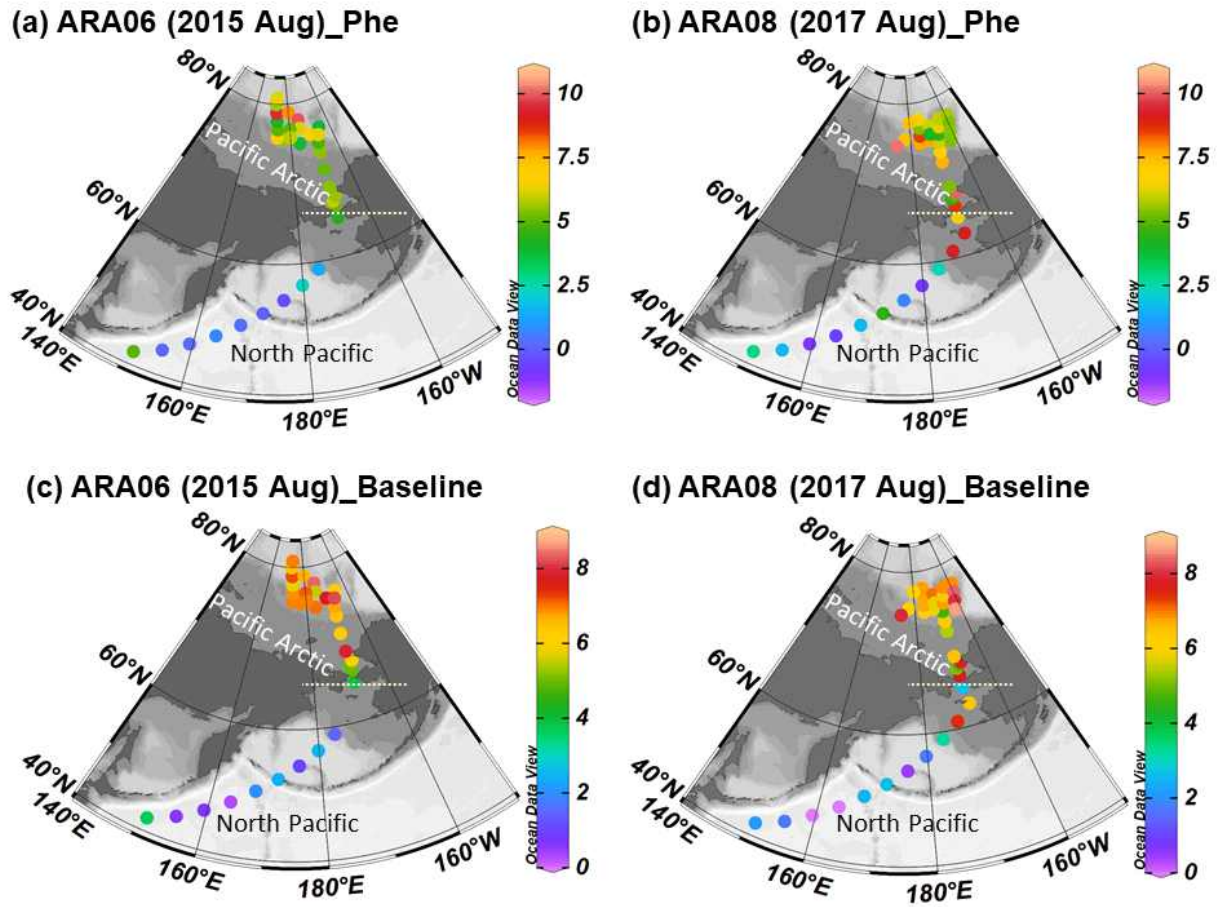


그림 14. 2015년(a)과 2017년(b)에 채집된 *Calanus* spp.의 Phenylalanine과 배경질소의 질소 안정동위원소비.

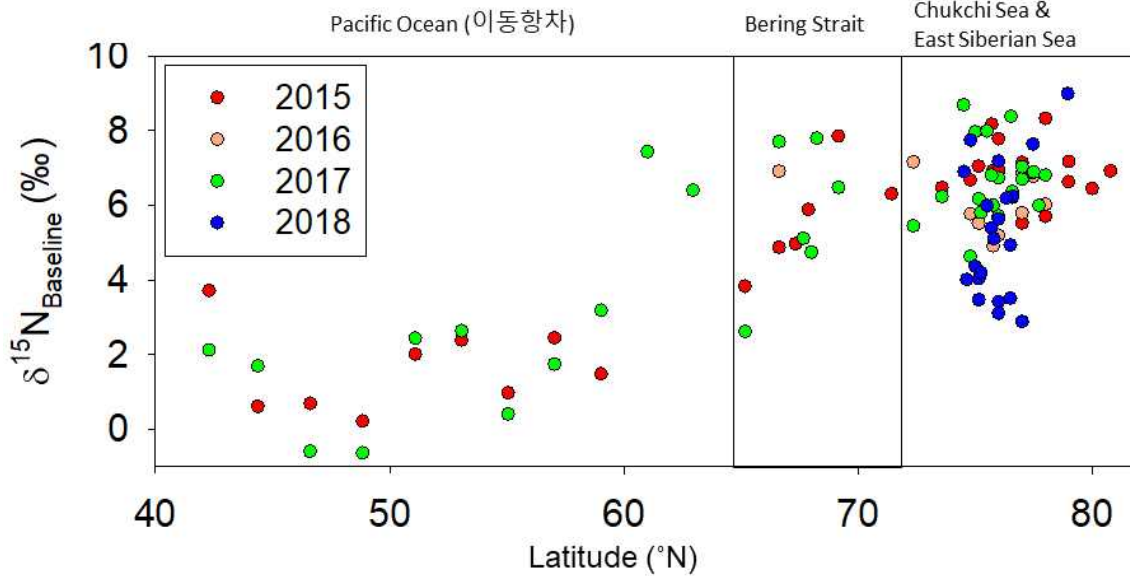


그림 15. 위도별 *Calanus* spp.의 배경질소 안정동위원소비.

나. 북극해 내부에서의 배경질소 변동

본 연구에서의 북극해 조사 해역은 크게 베링해(North Bering Sea, NBS), 척치해 북부(Northern, Chukchi Sea, NCS), 동시베리아해 북부(Northern East Siberian Sea, NESS)로 나눌 수 있다. 북극해에서의 *Calanus* spp. 시료들은 2015년부터 2018년까지 채집되었으며, 4회의 현장 조사로부터의 질소 안정동위원소비 결과를 연속적으로 비교할 수 있었다 (표 1, 그림 16). *Calanus* spp의 Bulk 질소 안정동위원소비 결과를 그림 17에 정리하였다. NESS에서 Bulk 질소 안정동위원소비는 2015년에 가장 높았다가 점진적으로 감소하여 2018년에 가장 낮게 나타났다고, NCS에서는 2015년부터 2018년까지 유사한 Bulk 질소 안정동위원소비 값이 유지되었다. 이러한 경향은 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 결과에서 상이하게 나타났다. Glutamic acid의 질소 안정동위원소비는 2018년의 NESS와 NCS를 제외하면 해역과 조사연도에 따라 뚜렷하게 구분되지 않았다 (그림 18). Phenylalanine의 질소 안정동위원소비 또한 해역에 따라 뚜렷하게 구분되지 않으며 ($p=0.774$), 조사연도에 따라서는 2018년이 다른 연도들에 비해 질소 안정동위원소비가 낮은 양상을 보였다. (그림 19). 이로 인해 영양단계는 2018년 NESS와 NCS에서 평균 0.25의 차이를 보이게 되나 ($p=0.007$), 다른 해역과 조사연도에서는 모두 0.1 이내의 차이로 나타났다 ($p>0.3$, 그림 20). 2018년 NESS와 NCS의 차이는 배경질소 안정동위원소비에서도 나타나게 된다 (그림 21). 이는 다른 해에 비해 평균값의 차이가 크게 나타나는 것으로 확인된다 ($p=0.000$).

이와 같은 결과는 다른 측정자료들과 비교하여 보았을 때, 연도별 Chl-a 농도의 차이가 2018년 여름에 가장 강한 동서구배를 보이는 것과 상관이 있는 것으로 생각할 수 있다. NESS에서 2018년 여름에 Micro Chl-a가 높은 농도를 보이며 색소분석을 통해서도 구조류의 우점 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 입자물질을 여과 섭식하는 *Calanus* spp. 개체들이 NESS에서 보다 낮은 영양단계를 보이는 것으로 나타나며, 이는 다른 조사 시기들에서 나타나지 않는 NESS와 NCS 간의 차이로 확인된다. 모든 조사연도에서 NCS 해역은 NESS에 비해 해빙이 더 많이 용빙된 것으로 나타났다. 산소 안정동위원소비 및 염분을 통해 산정된 수괴 비율 자료에서는 하천수의 비율이 용빙수에 비해 높게 나타나며, 담수가 보퍼트 환류에 의해 NCS 정점들까지 영향을 미치는 것으로 추측할 수 있다. 따라서 용빙수 또는 하천수의 영향에 의해 여름철에는 두 해역 모두 표층염분이 낮았다. 이에 따라 성층화된 표층수는 질산염이 결핍된 환경으로 나타나며, 2015년~2017년 여름에 배경질소 안정동위원소비가 나타내는 분포(4.63~8.68‰)는 표층의 질소원이 결핍되고 재사용되면서 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 단 2018년의 경우 이전 3년간의 자료와 다른 양상이 나타났다. NESS의 배경질소 안정동위원소비 차이가 NCS에 비해 평균 2.5‰ 가량 낮은 것으로 나타난다. 이를 영양염 분석 결과와 비교하여 보면 2018년 여름에 대서양 해수가 다른 해에 비해 비교적 낮은 수심까지 유입되면서, 이례적으로 저층의 무기질소들이 용승되어 NESS 해역의 표층까지 전달된 것으로 확인된다. 따라서 2018년 여름의 NESS 해역은 유광층 내에서 Chl-a 농도가 높게 나타나며, 이 때의 배경질소 안정동위원소비는 2.88~5.63‰로, 다른 해의 값들에 비해 현저하게 낮은 것이 확인되고 있다. 따라서, *Calanus* spp.로부터 산출된 배경 질소 안정동위원소비는 해역의 영양염 이용을 잘 반영하

고 있는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. 연도별, 해역별 요각류 *Calanus* spp.의 Bulk, Glutamic acid, Phenylalanine, 배경질소의 질소 안정동위원소비와 영양 단계의 평균 및 표준편차.

Year	해역	정점수	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TL	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Baseline}}$
2015	North Pacific	9	5.64±1.13	16.73±1.58	1.06±1.66	2.61±0.14	1.61±1.12
	NBS	6	10.09±1.53	22.26±1.15	5.24±0.57	2.79±0.16	5.61±1.39
	NCS	4	11.24±0.76	21.76±2.77	5.10±1.03	2.74±0.36	6.87±0.88
	NESS	14	11.26±0.39	23.01±1.55	6.28±1.76	2.75±0.21	6.87±0.71
2016	NBS	1	11.30	21.61	4.85	2.76	6.90
	NCS	3	10.83±1.01	22.31±1.46	5.92±1.51	2.71±0.32	6.56±0.72
	NESS	6	9.73±0.59	21.69±1.58	6.06±0.64	2.61±0.24	5.71±0.69
2017	North Pacific	11	6.39±2.67	18.11±4.20	2.68±3.64	2.58±0.25	2.43±2.55
	NBS	6	9.99±1.88	22.99±1.24	6.65±2.22	2.70±0.19	5.73±1.99
	NCS	10	10.88±1.08	21.63±2.08	5.89±0.87	2.62±0.19	6.82±1.27
	NESS	10	10.30±0.87	22.08±2.59	7.06±1.70	2.53±0.24	6.48±0.69
2018	NCS	12	11.37±1.45	22.51±0.99	4.31±1.17	2.95±0.20	6.48±1.38
	NESS	10	8.21±0.91	20.71±1.44	4.15±1.42	2.70±0.17	3.95±0.87

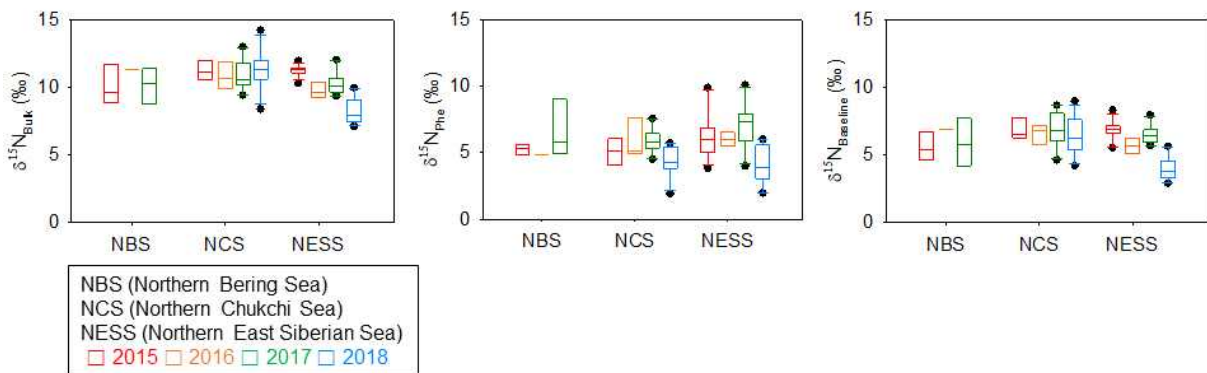
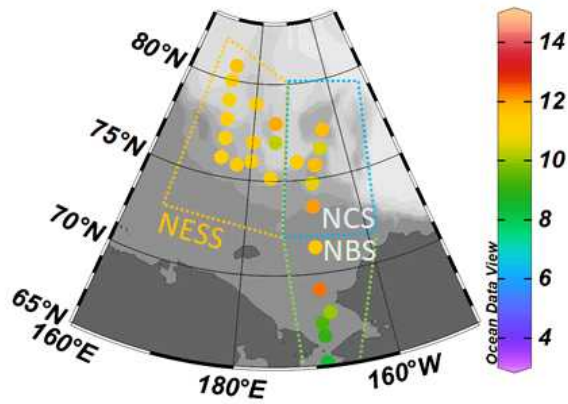
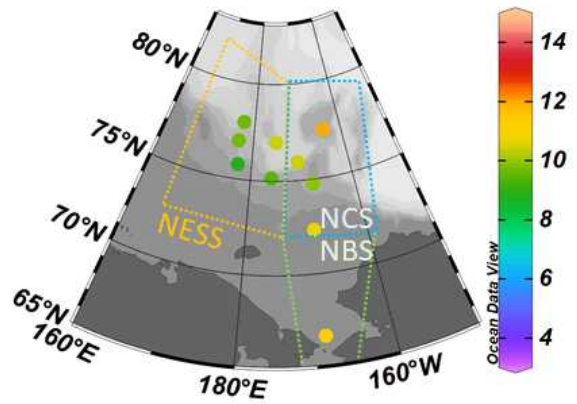


그림 16. 서로 다른 3개 해역에서 채집된 요각류 *Calanus* spp.의 Bulk, Phenylalanine과 배경질소의 질소 안정동위원소비

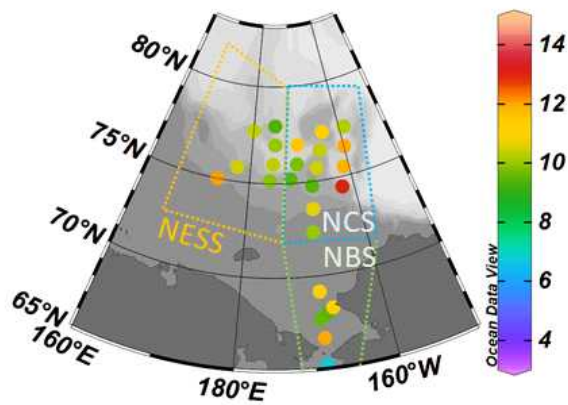
(a) ARA06 (2015 Aug) _Bulk N



(b) ARA07 (2016 Aug) _Bulk N



(c) ARA08 (2017 Aug) _Bulk N



(d) ARA09 (2018 Aug) _Bulk N

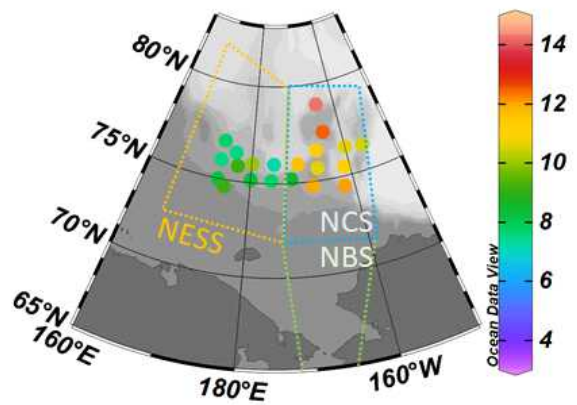
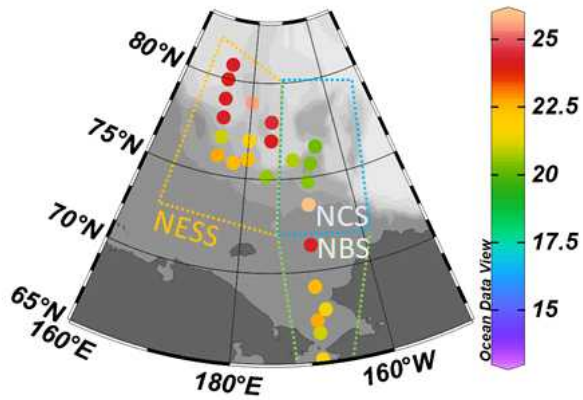


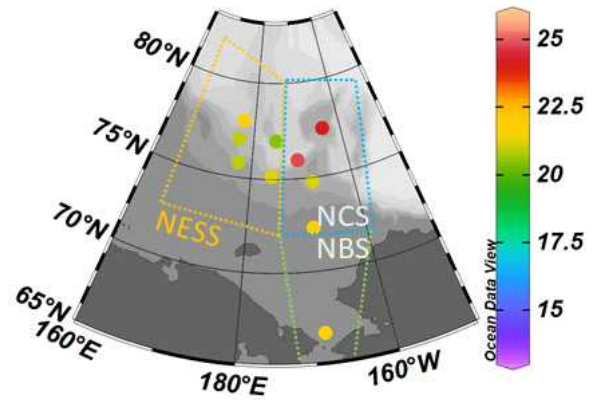
그림 17. 2015년(a), 2016년(b), 2017년(c), 2018년(d)에 채집된 *Calanus* spp.의 Bulk 질소 안정동위원소비.

극지연구소

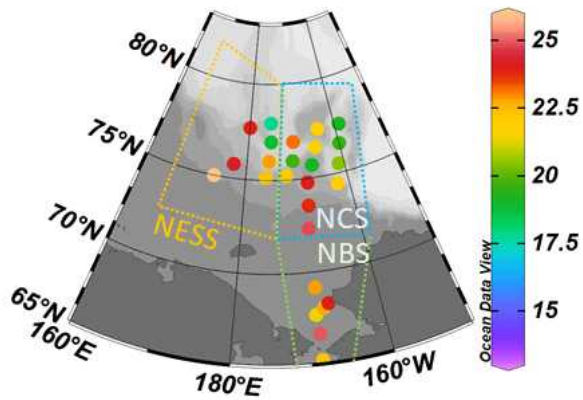
(a) ARA06 (2015 Aug) _Glu



(b) ARA07 (2016 Aug) _Glu



(c) ARA08 (2017 Aug) _Glu



(d) ARA09 (2018 Aug) _Glu

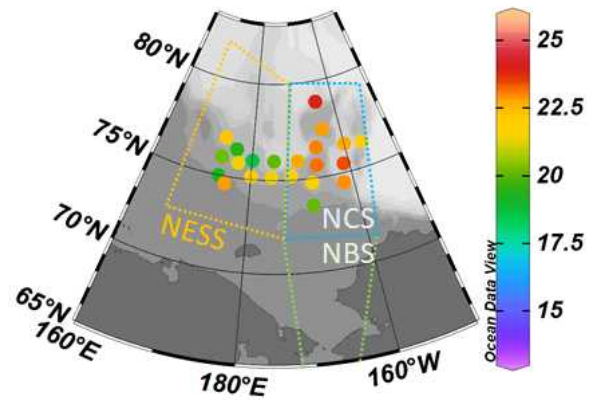
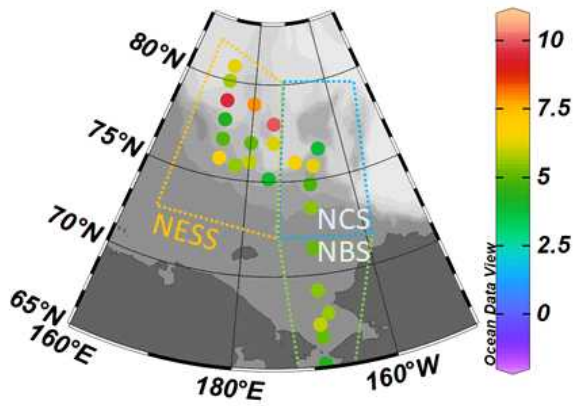


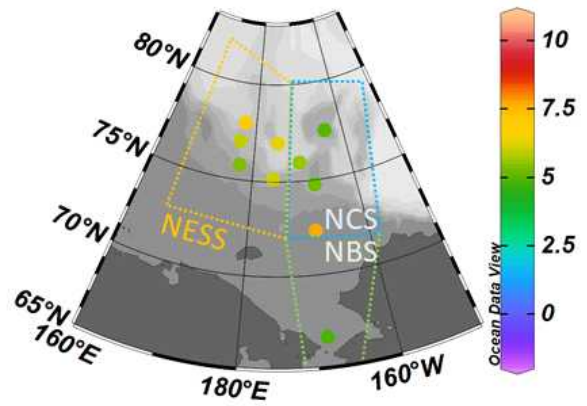
그림 18. 2015년(a), 2016년(b), 2017년(c), 2018년(d)에 채집된 *Calanus* spp.의 glutamic acid의 질소 안정동위원소비.

극지연구소

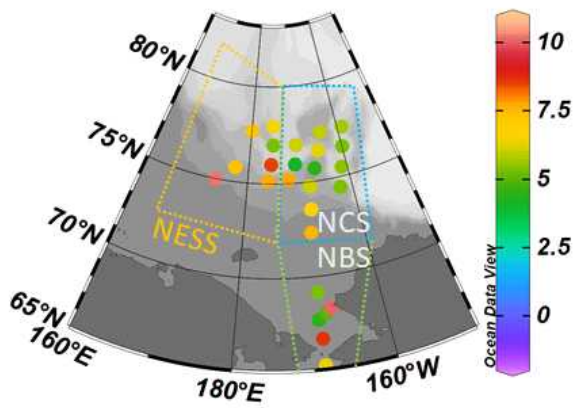
(a) ARA06 (2015 Aug) _Phe



(b) ARA07 (2016 Aug) _Phe



(c) ARA08 (2017 Aug) _Phe



(d) ARA09 (2018 Aug) _Phe

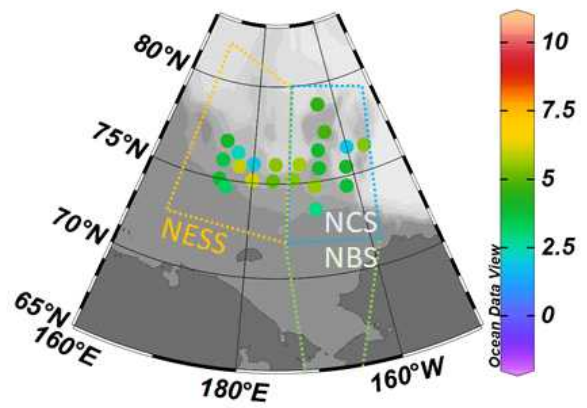
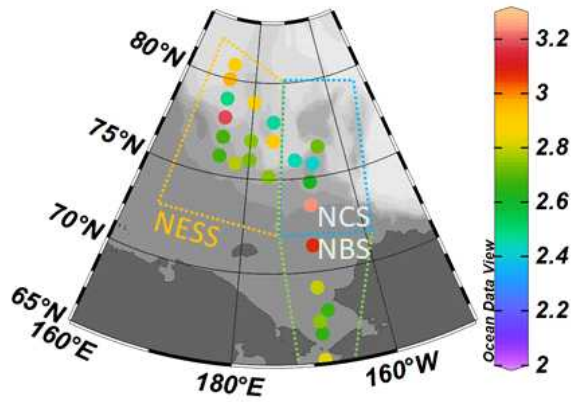


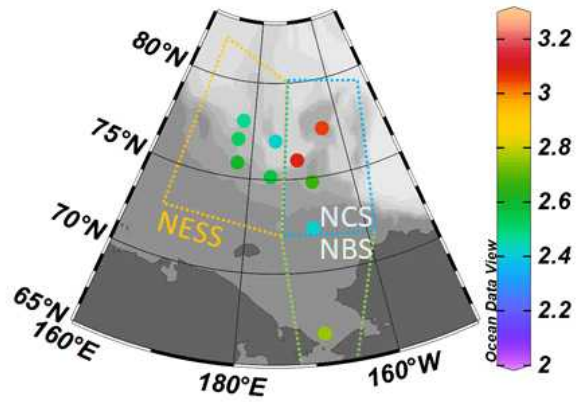
그림 19. 2015년(a), 2016년(b), 2017년(c), 2018년(d)에 채집된 *Calanus* spp.의 phenylalanine의 질소 안정동위원소비.

극지연구소

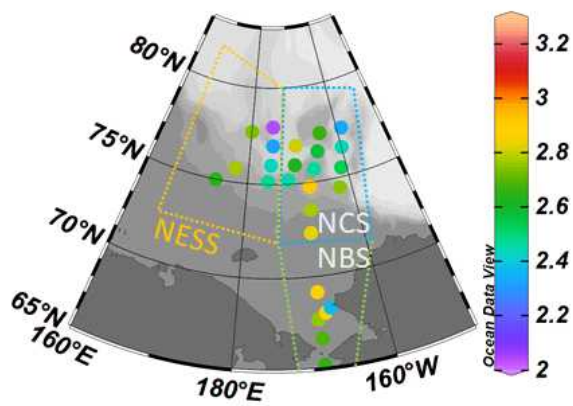
(a) ARA06 (2015 Aug) _Trophic Level



(b) ARA07 (2016 Aug) _Trophic Level



(c) ARA08 (2017 Aug) _Trophic Level



(d) ARA09 (2018 Aug) _Trophic Level

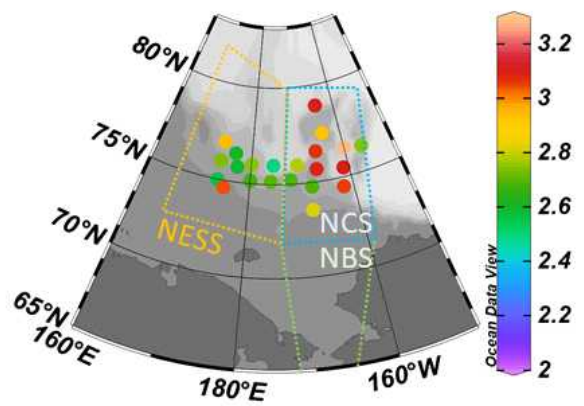
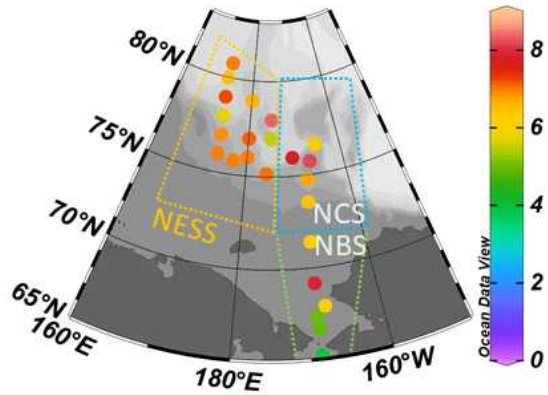


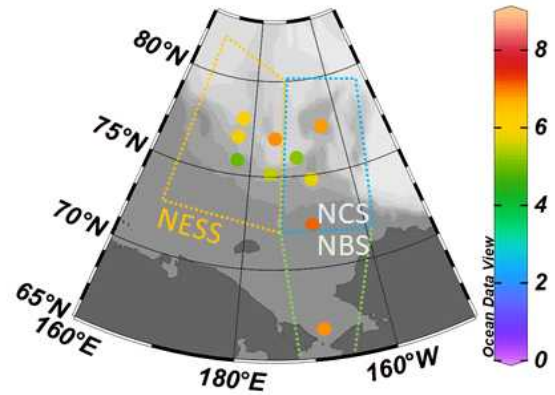
그림 20. 2015년(a), 2016년(b), 2017년(c), 2018년(d)에 채집된 *Calanus* spp.의 영양 단계.

극지연구소

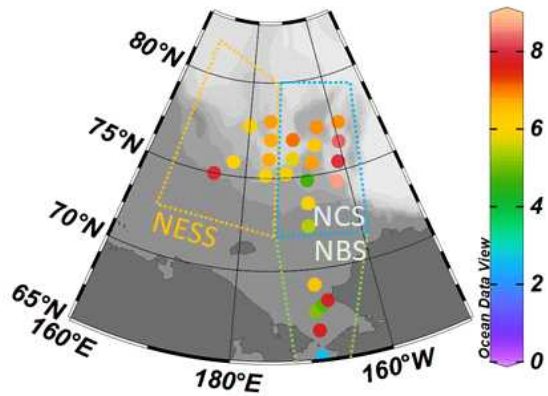
(a) ARA06 (2015 Aug) _Baseline



(b) ARA07 (2016 Aug) _Baseline



(c) ARA08 (2017 Aug) _Baseline



(d) ARA09 (2018 Aug) _Baseline

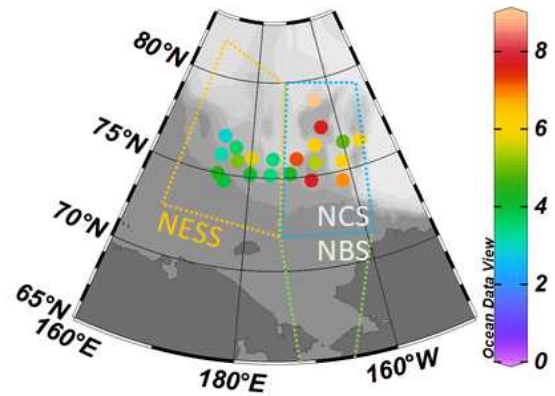


그림 21. 2015년(a), 2016년(b), 2017년(c), 2018년(d)에 채집된 *Calanus* spp.의 배경질소 안정동위원소비.

극지연구소

2. 침강입자의 배경질소의 시공간적 변화

가. 정량 분석 결과: 아미노산의 조성비 변화

GC/FID를 통해 분석된 아미노산의 총량 (total hydrolysable amino acids, THAA)를 표 2와 표 3에 나타내었다. 침강입자 시료에서의 아미노산 조성비는 시기적으로 뚜렷한 경향을 보이지 않는 것으로 보인다 (그림 22, 그림 23). 그러나 THAA의 flux (그림 24, 그림 25)는 계절적, 공간적인 변동성이 존재한다. 동시베리아해 북부 (St. 16)에서 2017년 여름철에 낮게 나타났던 THAA flux는 결빙기간에 더 낮아지는 양상을 보이며, 2018년에는 해빙의 융빙이 완전히 이루어지기 전에 THAA flux가 크게 증가하는 경향을 보인다. 척치해 북부 (St. 22)에서도 2018년 여름에 THAA flux가 크게 증가한다. 이는 Kim et al (2021)에서 보고된 total mass flux 및 POC flux 결과와 유사한 경향으로 확인되며, 아미노산의 flux가 전체적인 유기물의 flux와 유사한 경향을 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

THAA/TN 비율은 총질소에서 아미노산 유래 질소가 차지하는 비율을 나타낸다 (표 2, 표 3). 이 값은 생물에서는 38% 이상의 비율을 보이나, 미생물에 의한 분해 과정이 진행된 시료에서는 38% 미만의 비율을 나타낸다 (Cowie and Hedge, 1992). THAA/TN 비율은 대부분의 시료에서 20% 미만의 비율을 나타내며 침강입자 시료들에서 유기물 분해가 일어났음을 확인할 수 있다. 그러나, 계절적인 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 반면 비단백질성 아미노산인 β -alanine (BALA)과 γ -aminobutyric acid (GABA)의 함량은 계절에 따른 차이가 존재하는 것으로 확인된다 (그림 3.3.3.3.19, 그림 3.3.3.3.20). 이들은 각각 aspartic acid와 glutamic acid의 미생물 분해 과정에서 나오는 물질로, 전체 아미노산에서 비단백질성 아미노산들이 차지하는 비율은 미생물 활동에 의해 유기물이 변형, 재합성된 정도를 간접적으로 나타낸다. fresh한 유기물에서는 이들 각각의 mol%가 1% 미만으로 나타나는 반면, 유기물 분해가 충분히 진행될 수 있는 퇴적물의 경우 3~4%까지 상승하기도 한다 (Dauwe and Middelburg, 1998). 본 연구에서 확보한 침강입자 시료들의 경우, 결빙기간이 아닌 시기에도 BALA와 GABA의 함량 합계가 2~3%이며, 결빙기간에 최대 6% 이상으로 증가하는 것이 확인된다. 이는 유기입자물질이 유광층에서 침강하면서 bacteria의 흡착에 의한 유기물 분해가 발생하면서 비단백질성 아미노산 함량의 증가를 일으킨 것으로 생각된다. 그리고 미생물의 유기물 분해 활동이 결빙기에 접어들면서 더 우세해지는 것으로 확인된다.

DI 값은 대부분의 시기에서 음의 값을 갖거나 1 미만의 값을 갖는 것으로 확인된다 (그림 24, 그림 25). DI 값은 fresh한 유기물에서 1보다 큰 값을 가지고, 퇴적물, 용존성 유기물과 같이 유기물의 분해가 상당히 진행된 환경 시료에서는 음의 값을 가지며 DI 값이 음의 값으로 커질수록 유기물의 분해가 더욱 진행된 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서의 침강입자 시료들은 0.22~-0.72 사이의 DI 값 분포를 보인다. DI 값은 결빙기가 시작되면서 감소하여 음의 값을 나타내며, 결빙기가 끝나고 bloom 시기에 접어들면서 양의 값으로 상승한 결과가 보여진다. 이후 DI 값은 다시 음의 값으로 점진적으로 감소하여 bloom 동안 유기물의 분해 또한 같이 증가한 것으로 생각할 수 있다. 단 침강입자에서의 DI 값은 큰 변동폭이 나타나지 않기 때문에, 유기물 분해 정도를 안정동위원소 분석 결과와 같이 해석하고자 하였다.

표 2. 2017~2018년 동안 St. 16과 St. 22에서 채집된 침강입자의 TN 및 아미노산 함량과 THAA/TN 비율, degradation index.

Sample	Period	TN (%)	THAA ($\mu\text{g}/\text{mg dw}$)	THAA/TN (%)	Degradation index
St.16-01	17.08.18~31	1.31	4.62	4.33	-0.28
St.16-02	17.09.01~15	1.03	8.05	9.52	-0.21
St.16-09	18.01.01~31	0.64	7.16	13.14	-0.32
St.16-11	18.03.01~16	0.53	3.42	8.02	-0.37
St.16-17	18.06.16~30	0.74	3.06	4.89	0.03
St.16-18	18.07.01~15	0.99	11.08	13.52	-0.06
St.16-19	18.07.16~31	0.96	9.89	12.63	-0.19
St.16-20	18.08.01~13	0.69	4.49	8.05	-0.39
St.22-16	18.06.01~15	0.67	2.99	5.59	-0.53
St.22-17	18.06.16~30	0.82	2.01	2.96	0.22
St.22-18	18.07.01~15	0.64	2.22	4.11	0.19
St.22-19	18.07.16~31	0.75	3.10	5.20	-0.08
St.22-20	18.08.01~14	1.19	7.07	7.29	-0.19

KOPRI
극지연구소

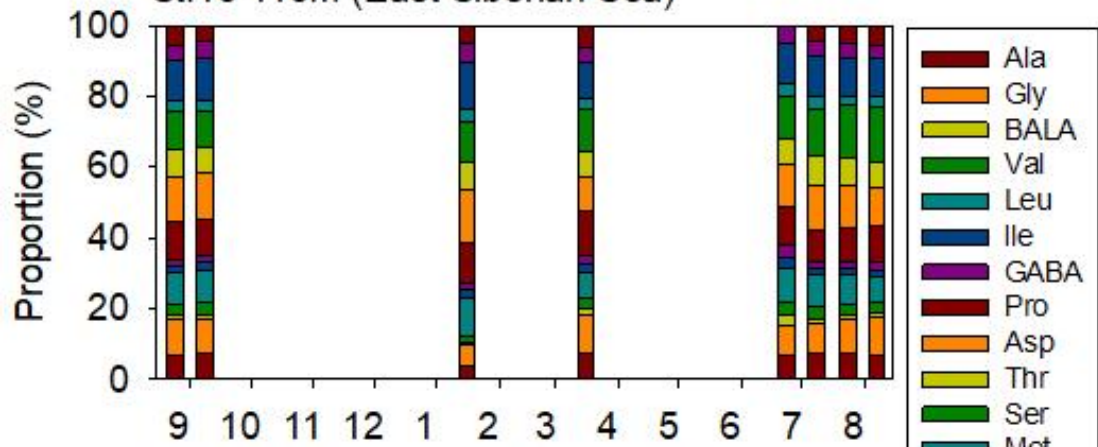
표 3. 2018~2019년 동안 St. 16과 St. 19에서 채집된 침강입자의 TN 및 아미노산 함량과 THAA/TN 비율, degradation index

Sample	Period	TN (%)	THAA ($\mu\text{g}/\text{mg dw}$)	THAA/TN (%)	Degradation index
St.16-01	18.08.17~31	1.75	14.84	9.94	-0.30
St.16-02	18.09.01~15	1.22	17.55	16.87	-0.72
St.16-03	18.09.16~30	1.18	7.72	7.72	-0.50
St.16-04	18.10.01~15	1.39	9.82	8.35	-0.43
St.16-05	18.10.16~31	1.16	8.65	8.90	-0.65
St.19-01	18.08.17~31	1.29	14.50	12.89	-0.01
St.19-02	18.09.01~15	0.95	26.39	32.57	-0.43
St.19-03	18.09.16~30	0.84	14.45	19.92	-0.64
St.19-04	18.10.01~15	0.98	8.58	10.35	-0.25
St.19-17	19.06.16~30	0.72	14.01	22.60	-0.53
St.19-18	19.07.01~15	1.01	13.33	15.44	-0.28



ARA08B (2017.08~2018.08)

St.16 115m (East Siberian Sea)



St.22 325m (northern Chukchi Sea)

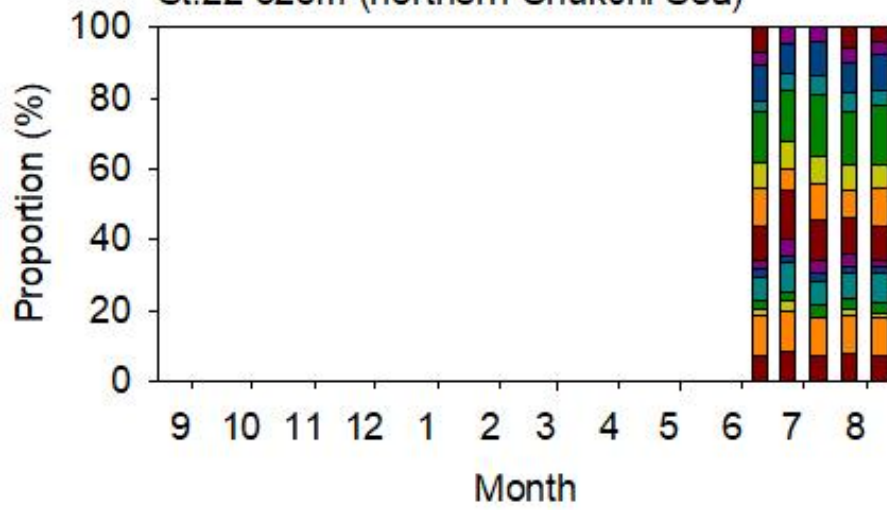


그림 22 2017~2018년 동안 채집된 침강입자 시료들의 아미노산의 상대적인 함량.

ARA09B (2018.08~2019.08)

St.16 315m (northern Chukchi Sea)

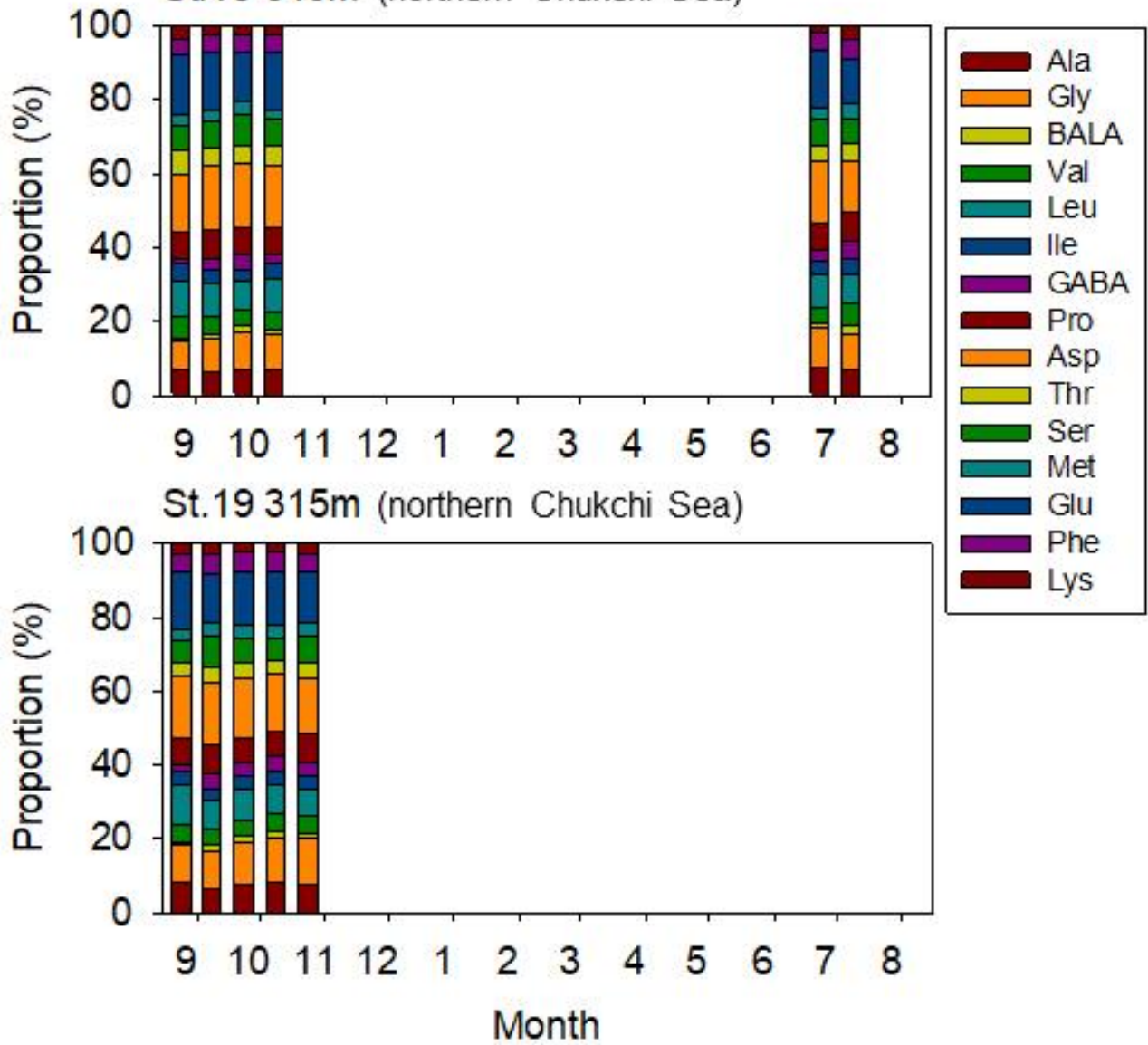


그림 23. 2018~2019년 동안 채집된 침강입자 시료들의 아미노산의 상대적인 함량.

ARA08B (2017.08~2018.08)

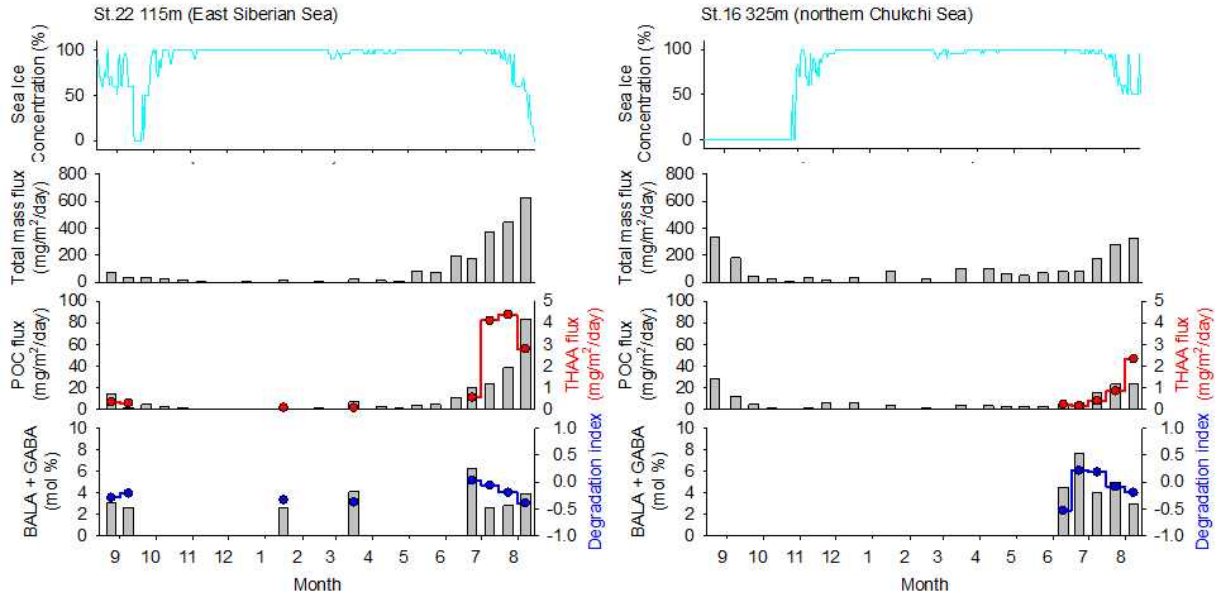
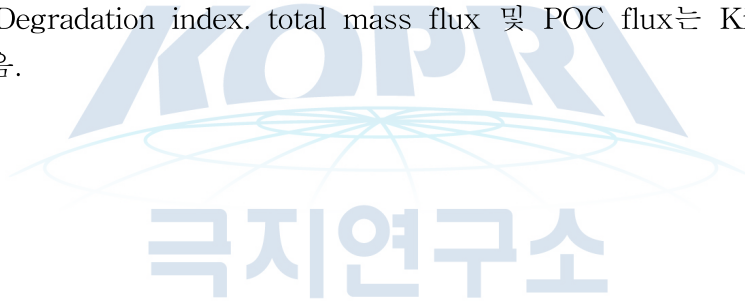


그림 24. 2017~2018년에 채집된 침강입자의 THAA flux, 비단백질성 아미노산 (BALA, GABA)의 함량, Degradation index, total mass flux 및 POC flux는 Kim et al (2021)의 자료를 참고하였음.



ARA09B (2018.08~2019.08)

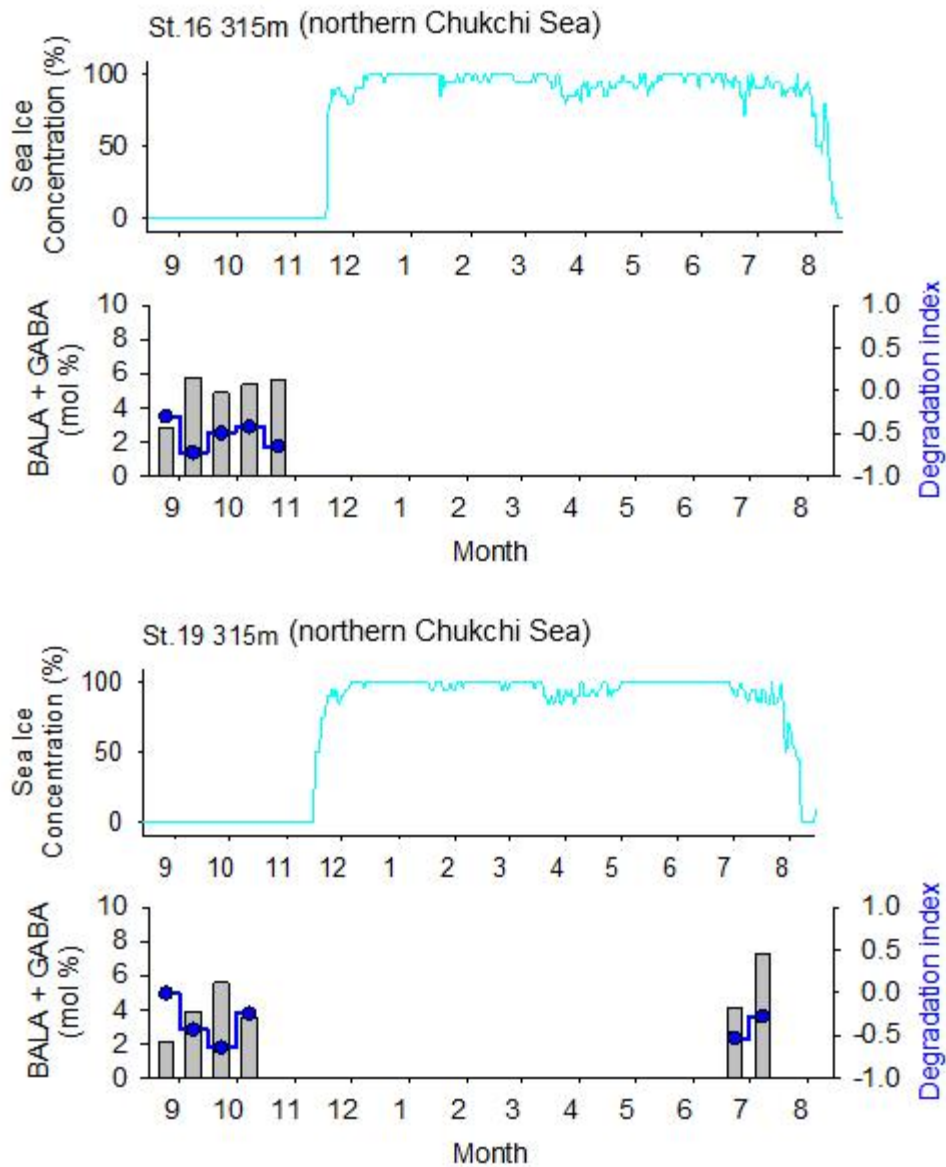


그림 25. 2019~2020년에 채집된 침강입자의 비단백질성 아미노산 (BALA, GABA)의 함량 및 Degradation index.

나. 안정동위원소비 분석 결과

(1) Bulk 탄소 및 질소 안정동위원소비

침강입자 시료로부터 분석된 bulk 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석 결과를 그림 26과 그림 27에 나타내었다. 2017년 NESS (St. 16)에서 결빙기 이전에 POC flux가 낮은 조건과 함께 가장 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값이 발견되었다. 이 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값은 결빙기에 접어들면서 증가하는 양상을 보이며, 이러한 현상은 2018년의 두 침강입자 시료들에서도 유사하게 나타난다. 가을로 접어들면서 일조량이 감소하고 해빙농도가 증가하면서 일차생산력이 감소하게 되는데, 이 때 미생물의 활동에 의한 유기물 분해 작용이 상대적으로 우세해지면서 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값을 증가시켰을 가능성이 있다. bulk $\delta^{15}\text{N}$ 의 값 또한 결빙기에 접어들면서 증가하는 양상이 보여진다. 이는 세 가지의 원인으로 설명할 수 있는데, 첫째로는 미생물에 의한 유기물 분해 작용에 의해 남은 유기물의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 높아진 것과, 둘째로 결빙기간 동안 수층의 입자 내에는 일차생산자가 아닌 종속영양생물들이 대부분을 차지하면서 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 높아졌을 가능성이 있다. 결빙기 동안 높게 유지되던 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 해빙미세조류 등에 의한 bloom이 시작되면서 일시적으로 낮아졌다가 다시 상승하는 양상이 보인다. 이 또한 침강입자에 존재하는 유기물의 기원이 일차생산자 위주에서, 뒤늦게 변성한 섭식 생물 기원의 유기물의 비중이 증가하게 되면서 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 증가시켰을 가능성이 있다. Bulk $\delta^{15}\text{N}$ 에서 확인되는 이러한 특징은 여러 요인이 합쳐진 결과로, bulk $\delta^{15}\text{N}$ 은 배경질소의 정보뿐만 아니라 영양 단계에 대한 정보도 포함되어 있기 때문에 질소원의 변동에 대한 해석을 어렵게 하는 문제가 있다.

(2) 아미노산의 질소 안정동위원소비

수중에 분포하는 자유 아미노산은 미생물에 의해 탄소 또는 질소원으로 활용되기 쉬우며, 이 과정에서 발생하는 아미노산의 분해 과정은 펩티드 결합의 분해를 의미한다. 이 결과 용존 유기물에서는 아미노산들의 질소 안정동위원소비가 평균적으로 8‰ 증가하는 것으로 보고된다 (Yamaguchi and McCarthy, 2018). 본 연구에서 침강 입자 시료의 아미노산 함량으로 계산된 DI 및 비단백질성 아미노산 flux를 통해 침강 입자에서 아미노산의 분해가 이루어지고 있는 것이 확인되었다. 아미노산의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 그림 26과 그림 27에 나타내었다. 2017~2018년의 침강 입자 시료 중에서 결빙기 전과 후를 비교할 수 있는 시료는 동시베리아해 북부 (St. 16)의 시료로, 여름철 식물플랑크톤의 bloom이 끝난 이후 아미노산의 $\delta^{15}\text{N}$ 값들이 상승하는 경향을 보인다. 8월에서 9월로 넘어가면서 일차생산력이 감소하고, 유기물의 분해는 상대적으로 더 일어나게 되면서 $\delta^{15}\text{N}$ 값들을 증가시킨 결과로 해석된다. 이는 결빙기간 동안 유지되다가, 2018년 7월에 접어들면서 $\delta^{15}\text{N}$ 값들은 일제히 감소하게 된다. Kim et al (2021)에 따르면 이 시기에 동시베리아해 북부 해역에서 해빙미세조류가 번성하면서 용빙이 완전히 이루어지기 전에 일차생산력이 높아진 것으로 설명하고 있다. 이와 같은 경향은 2017~2018년과 2018~2019년의 척치해 북부 (각각 St. 22, St. 19)의 7월 이후 시료에서도 발견되어, bloom이 끝나고 결빙기가 시작되면서 아미노산의 $\delta^{15}\text{N}$ 값들이 상승하는 것과, 해빙미세조류의 번성에 기인한 아미노산의 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 감소가 2018~2019년 척치해 북부의 정점들에서도 일어나고 있는 것을 확인할 수 있

었다.

해빙미세조류의 발생과 이에 따른 침강입자 유기물 조성의 변동은 영양단계의 감소로 나타난다. 그림 27에 제시된 바와 같이, 침강입자로부터 계산된 영양단계는 해빙미세조류의 발생으로 추측되는 7월 중에 낮아지면서 1에 가까워지는 양상을 보인다. 침강입자를 구성하고 있는 유기물이 해빙미세조류로부터 유래한 것으로 추측할 수 있다. 반대로 결빙기에 접어드는 시기에는 영양단계가 증가하는 양상을 보이게 되는데, 이는 침강입자를 구성하는 유기물에서 일차생산자가 감소하게 되면서, 동물플랑크톤이나 원생동물 등의 종속영양생물이 침강입자를 구성하고 있는 것으로 추측할 수 있다. ΣV 값 (그림 28, 그림 29)은 모든 기간에서 전체적으로 2%를 초과하지 않았으며, 이는 DI 값의 경향과 같이 고려하였을 때 침강입자에서 아미노산의 분해가 이루어지고 있는 것을 시사한다.



ARA08B (2017.08~2018.08)

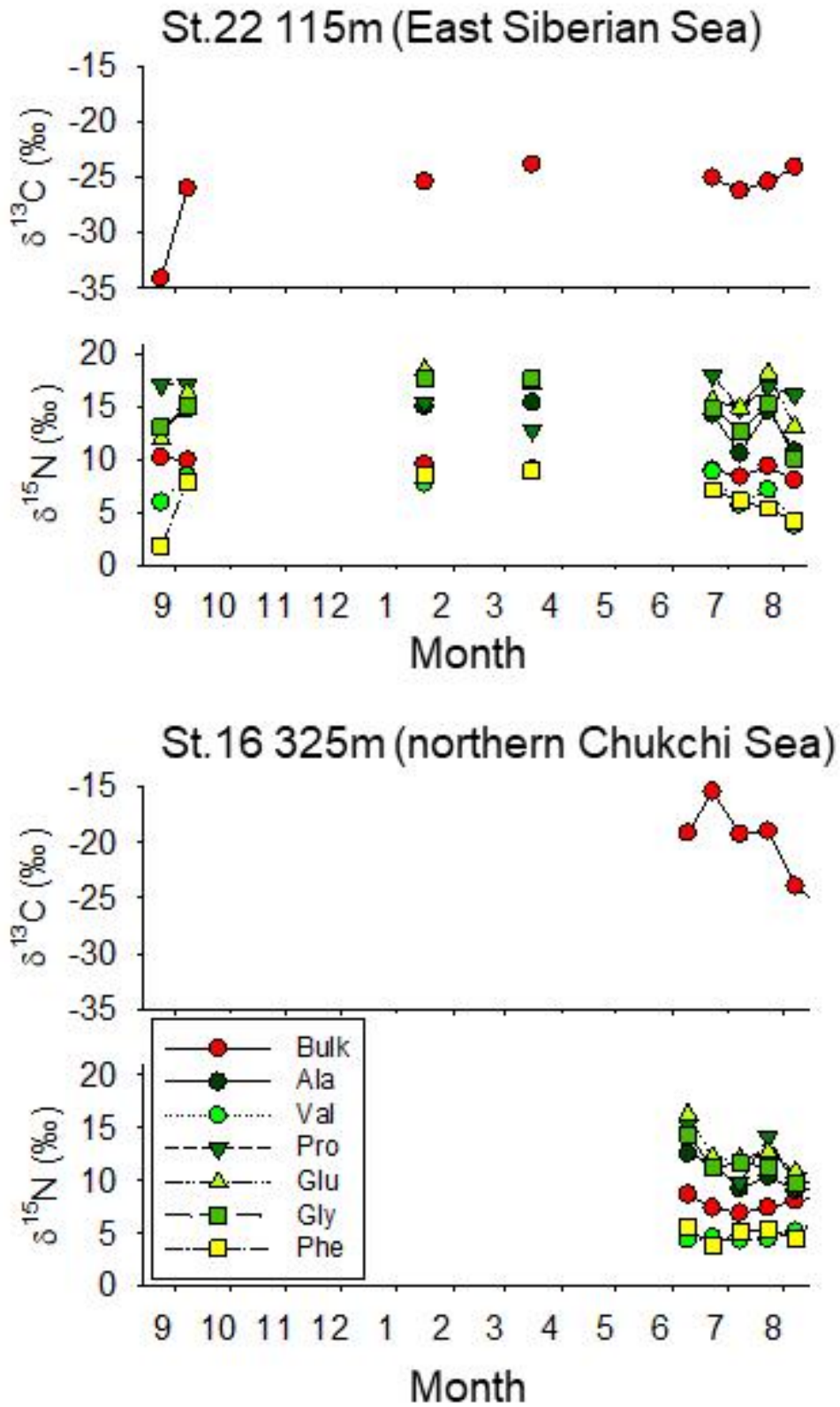


그림 26 2017~2018년에 채집된 침강입자의 Bulk 질소 및 탄소 안정동위원소 및 아미노산의 질소 안정동위원소비.

ARA09B (2018.08~2019.08)

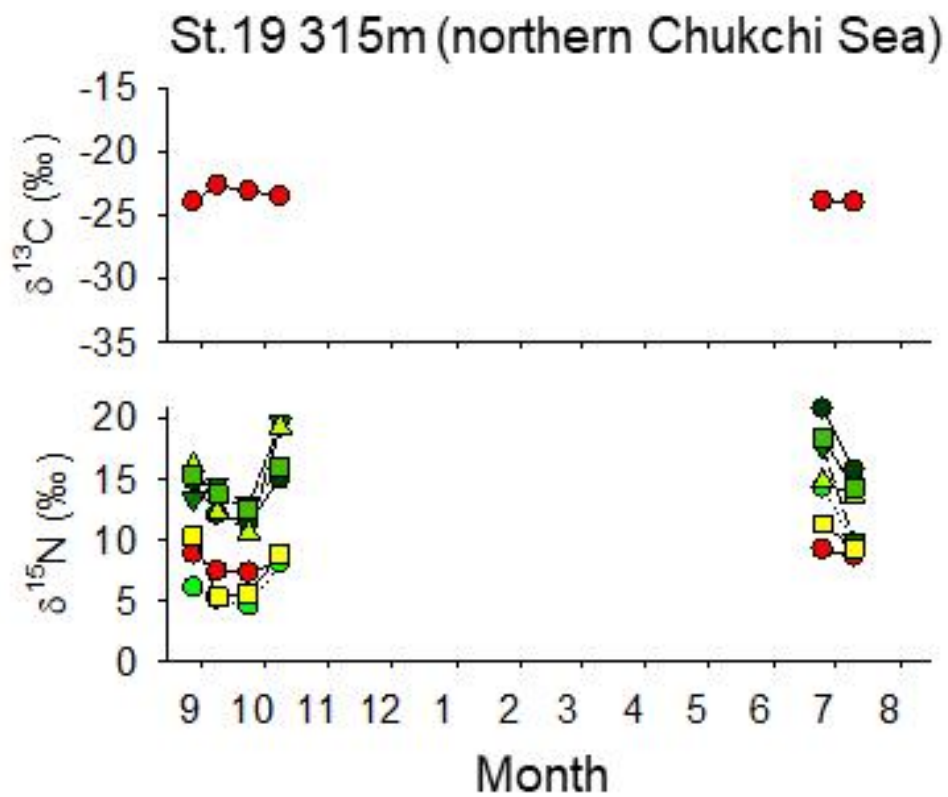
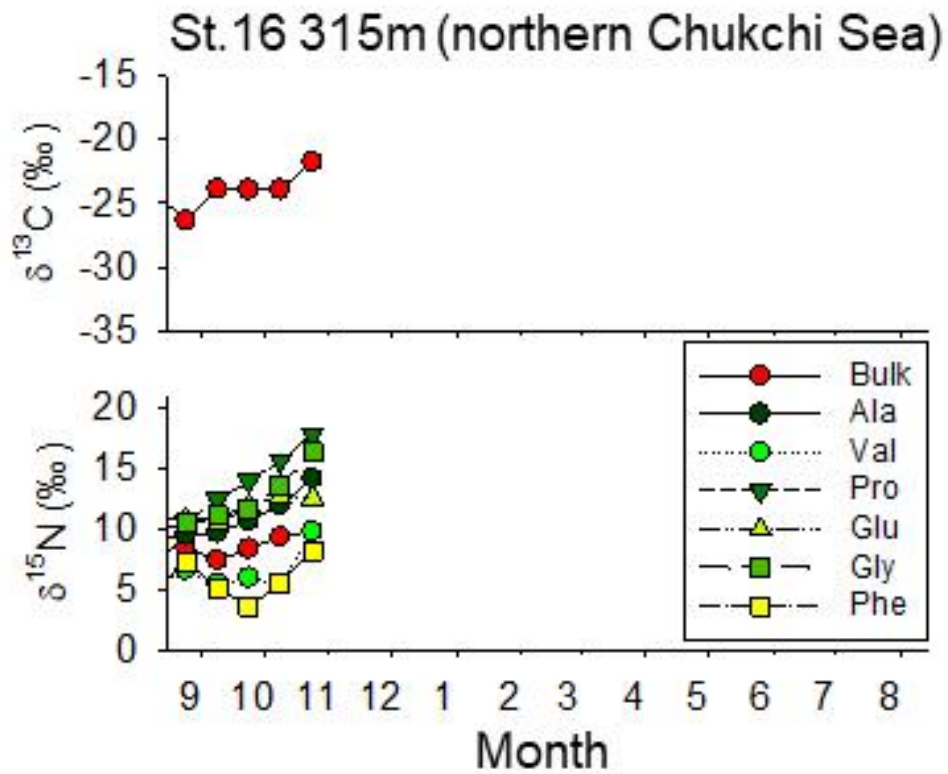


그림 27 2018~2019년에 채집된 침강입자의 Bulk 질소 및 탄소 안정동위원소 및 아미노산의 질소 안정동위원소비.

ARA08B (2017.08~2018.08)

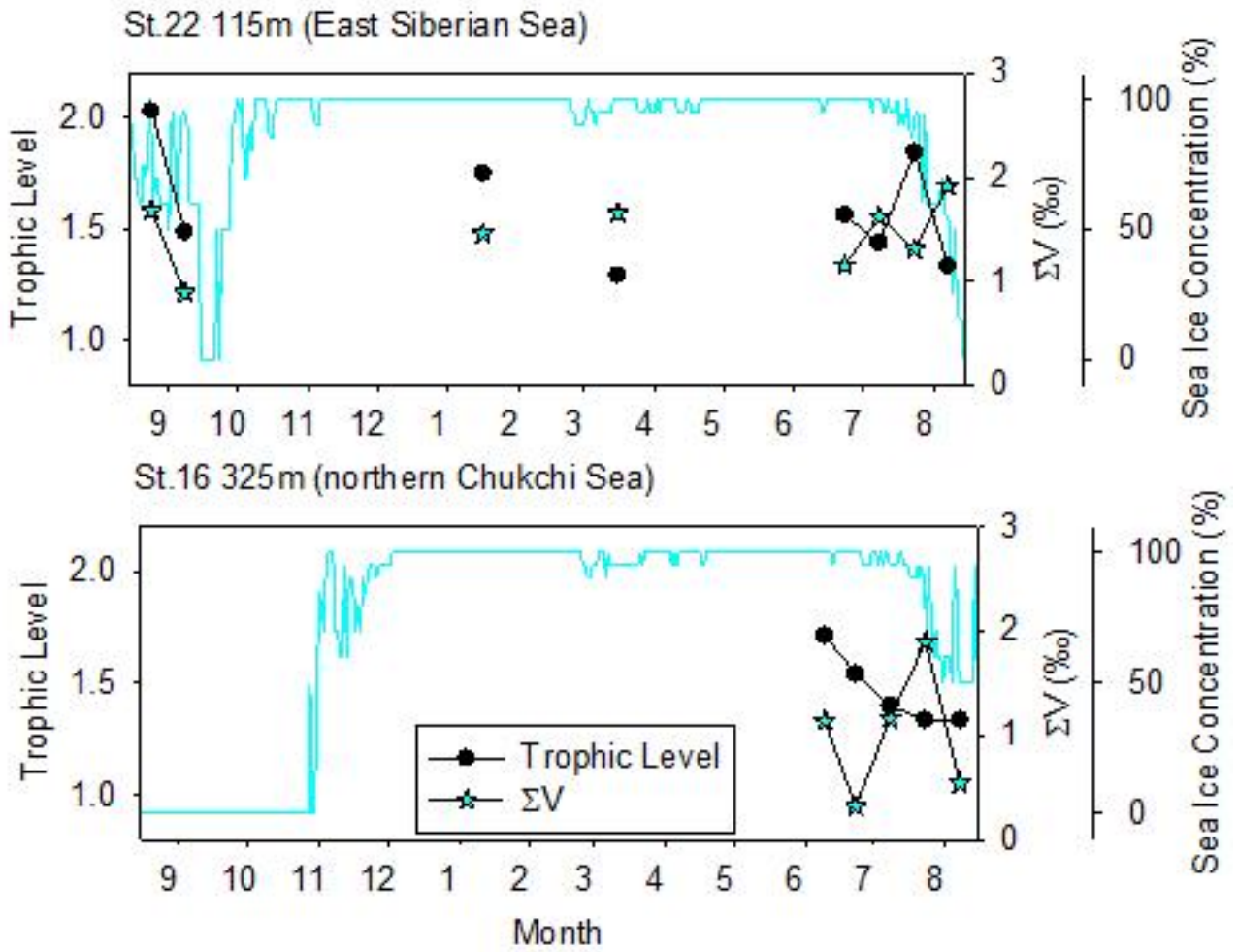


그림 28. 2017~2018년에 채집된 침강입자의 아미노산 질소 안정동위원소비로부터 계산된 영양 단계 및 ΣV 값.

ARA09B (2018.08~2019.08)

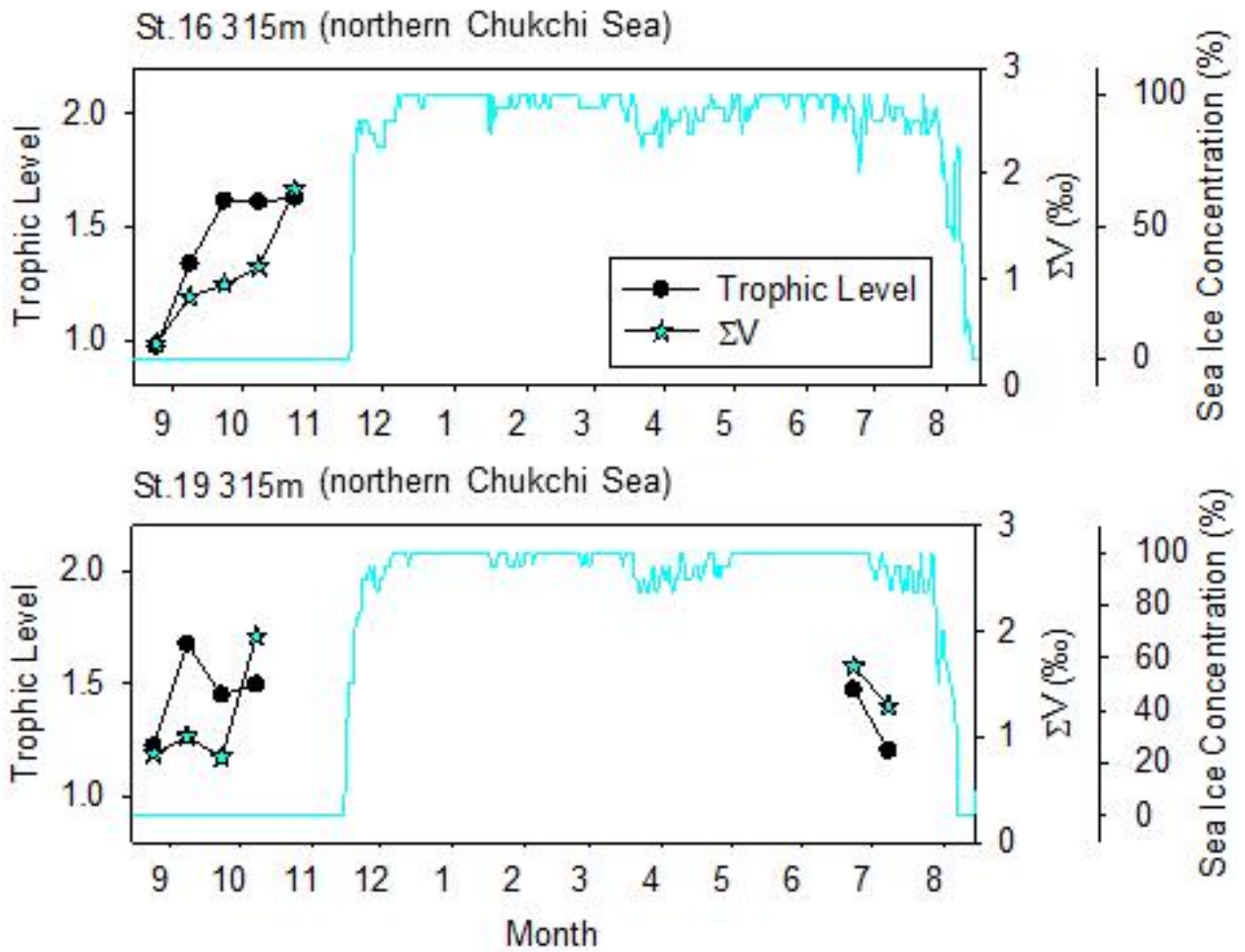


그림 29. 2018~2019년에 채집된 침강입자의 아미노산 질소 안정동위원소비로부터 계산된 영양 단계 및 ΣV 값.

(3) 배경 질소의 안정동위원소비 변화를 통한 질소원의 계절 변동

아미노산은 미생물 분해 과정을 통해 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 상승이 일어나고, 분석되는 유기물 시료에 미생물이 포함됨에 따라 계산되는 영양단계의 변동을 일으킨다 (Steffan et al., 2017). 이로 인해 해수 중의 입자성 유기물은 평균적으로 1.4의 영양단계를 갖는 것으로 보고된다 (Goto et al., 2018). 본 연구결과에서 계산된 침강입자들의 영양단계 또한 침강입자를 구성하는 생물 또는 유기물의 조성에 따라 변화할 수 있는 것을 확인하였다. 침강입자 내에 존재하는 유기물들은 다양한 종류의 생물들로부터 유래한 것일 수 있기 때문에, 침강입자의 아미노산 질소 안정동위원소비를 통해 계산되는 배경질소 (그림 30)는 일차생산자 뿐만 아니라 여러 종류의 생물군을 포함하는 질소원으로 생각할 수 있으며, 배경질소를 구성하는 생물들의 조성은 계절에 따라 달라질 수 있는 것으로 가정하고 결과를 해석하였다.

침강입자 시료들의 배경질소 안정동위원소비는 bulk 또는 phenylalanine 질소 안정동위원소비와 유사하게 결빙기간에 접어들며 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 상승하고, 일차생산이 활발해지기 시작하는 시기에 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 감소하는 양상을 보인다. 2017~2018년의 두 침강입자 시료들은 2018년 6~7월 사이에 배경질소 안정동위원소의 값이 차이를 보이다가 이후 두 시료 간의 차이가 크게 감소하는 것이 확인된다. 이는 동일 시기, 동일 정점에서 채집된 요각류에서도 배경질소 안정동위원소비가 유사하게 나오는 것과 일치한다 (그림 21). 두 정점은 동시베리아해와 척치해의 중간 수역에 위치하고 있으며, 규모의 차이는 있으나 비슷한 시기에 POC flux가 증가하는 공통점이 있었다. 이에 두 정점은 8월에 증가한 용빙수에 의해 표층수가 성층화되고, Chl-a, 영양염 농도 등의 수괴 특징이 유사하였는데, 이러한 특징이 배경질소 안정동위원소에도 반영되었을 것으로 생각된다. 2019~2020년에 두 정점에서 채집된 침강입자 시료들은 위도상의 차이로 결빙시기 및 일조량의 차이가 존재하여 질소원의 계절변동에 차이가 있을 것으로 생각하였고, 두 침강입자 시료 간의 TN, THAA/TN 비율 등에서 뚜렷한 차이가 존재하였다. 그럼에도 불구하고 두 정점에서의 시료는 실제로 매우 작은 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이만을 보이며, 두 정점 간에 유사한 배경질소의 계절변동이 반영되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 두 정점이 보퍼트 환류의 영향권에 있었기 때문에, 표층수가 성층화되면서 두 정점 간의 배경질소의 지역적 차이가 뚜렷하지 않았을 수 있다.

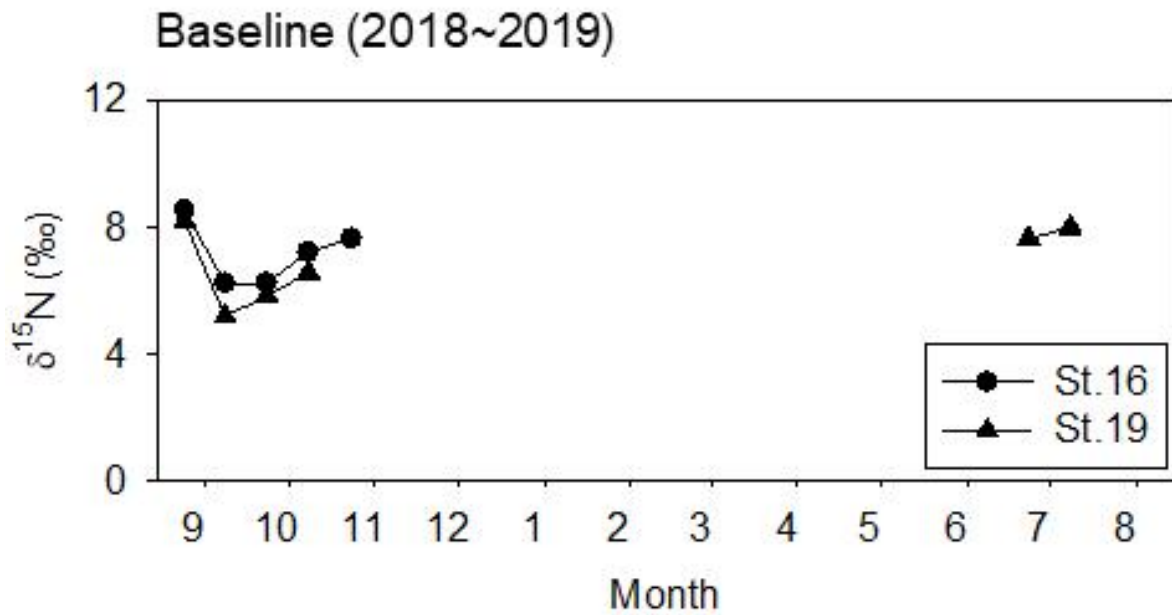
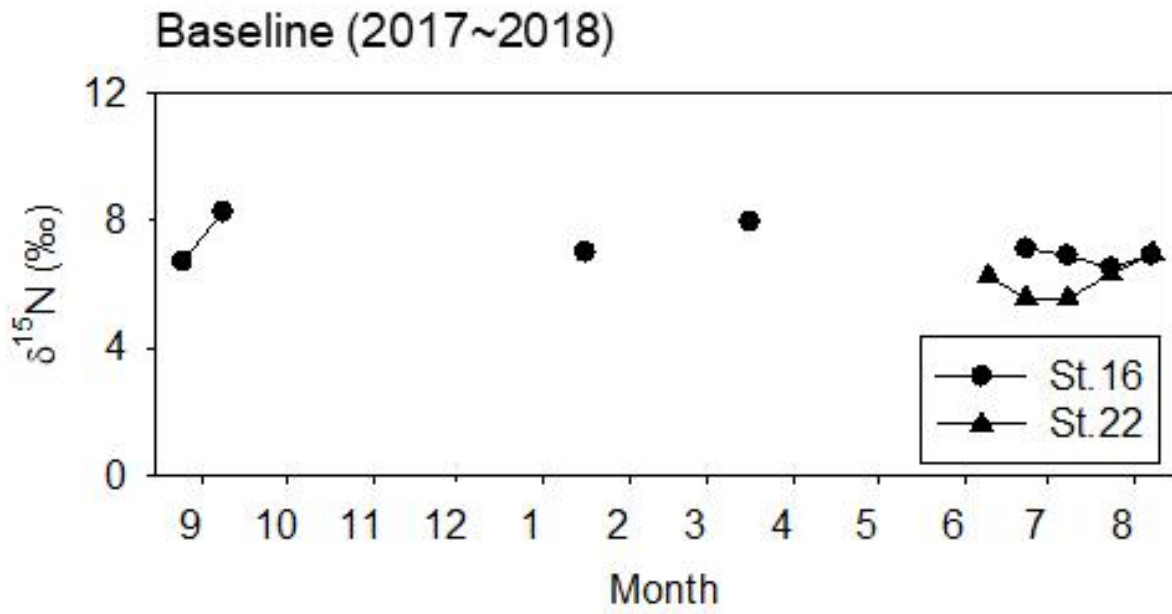


그림 30 침강입자 시료들의 배경질소 질소 안정동위원소비.

제 4 절 요약

본 연구에서는 시료들의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 통해 북극해에 존재하는 질소원 (배경질소)에 대한 정보를 보다 정확하게 파악할 수 있었다. 2015년부터 2018년까지 채집된 동물플랑크톤 시료를 통해 해역에 따른 배경질소의 차이를 확인하였고, 2017년부터 2018년, 2019년부터 2020년까지 채집된 침강입자 시료를 통해 결빙기간을 비롯한 계절별 배경질소의 변동을 확인하였다.

요각류 *Calanus*속의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 통하여 배경질소 안정동위원소비를 계산하였고, 베링해에서의 배경질소 안정동위원소비 ($5.67 \pm 1.64\%$)는 기존에 알려진 무기질소의 안정동위원소비와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 북극해역에서는 무기질소가 결핍되어 타 자료와 비교할 수 없었으나, 이 때는 유광층 내 질소원의 지속적인 사용 등에 의해 $4.63 \sim 8.68\%$ 의 배경질소 안정동위원소비 값을 확인할 수 있었다. 이는 이례적으로 저층의 영양염이 유광층으로 공급되는 조건 하에서 배경질소 안정동위원소비를 변화시킬 수 있었는데, 2018년 동시베리아해 북부 해역에서 $2.88 \sim 5.63\%$ 의 범위로 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

침강입자 시료의 아미노산 조성 및 질소 안정동위원소비를 통해 시료 내의 유기물의 분해 여부를 파악할 수 있었고, 결빙기와 bloom 시기에 특징적인 질소 안정동위원소비의 변화 패턴을 확인할 수 있었다. 결빙기에 접어들면서 일차생산의 감소와 미생물 활동의 상대적 증가에 의해 배경질소의 안정동위원소비가 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 여름철 bloom이 시작되면 일시적으로 감소하였다가 다시 증가하는 현상이 나타났으며, 이러한 현상은 초여름에 해빙이 완전히 융빙되기 전부터 확인할 수 있었다. 동일한 기간 동안 획득된 침강입자 시료들 간의 배경질소 안정동위원소비의 시간적 변동을 보았을 때, 2017~2018년 침강입자 시료에서는 6~7월 사이에 배경질소 안정동위원소비가 구분되는 경향을 보였으며, 이는 두 해역 간의 수괴 특징의 차이가 줄어드는 8월에 유사한 배경질소 안정동위원소비를 나타내게 되었다. 2019~2020년 침강입자 시료의 경우 유사한 배경질소 안정동위원소비의 계절 변동이 나타나, 두 정점의 지역적 차이가 뚜렷하지 않음을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 서북극해역의 질소원의 계절적, 공간적 변동을 아미노산의 질소 안정동위원소비를 통해 새로이 확인할 수 있었고, 추후의 연구를 통해 본 연구에서 밝혀낸 배경질소의 변동이 일시적인 현상인지, 혹은 보다 장기적인 변화가 존재하는지 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

본 연구에서는 북극해에서의 요각류 시료와 침강입자 시료를 확보하여 아미노산 질소 안정 동위원소비 분석을 수행하였으며, 이를 통해 북극해역에서 배경질소의 시공간적인 변동을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 확보한 시료들의 배경질소 안정동위원소의 분석과 해석은 북극해역 뿐만 아니라 전 해양생지화학 연구 분야에서 처음 시도되었다. 요각류 시료로부터의 배경질소 분석 및 해석은 기존에 무기질소 또는 입자성 유기물로부터 얻기 어려웠던 배경질소 정보를 보다 수월하게 확보할 수 있으며, 이는 해양생지화학에서 질소순환 연구의 지평을 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구내용을 극지 분야의 연구 발표가 이루어지는 국제학회 (ISAR-5)에 참석하여 연구 결과에 대해 국외 연구자들과 교류할 수 있었으며, 이를 통해 국내의 극지해양 분야 연구 역량을 알릴 수 있었다. 이는 보다 많은 국외 연구진들과의 교류에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

○ 극지역을 활용한 기후변화 연구의 기초자료 제공

- 지구온난화에 따른 기후변화가 북극해 해양-해빙생태계와 해양-해빙 환경 변화에 미치는 영향을 파악하기 위한 자료로 사용 가능하며, 향후 미래 예측을 위한 모델 입력 자료로 활용 가능
- 다년간 축적된 북극해의 배경질소 안정동위원소비는 지구온난화에 의한 해빙의 후퇴 및 융빙기간의 증가에 의한 북극 환경의 변화에 의한 질소원 이용의 변화 모니터링을 위한 기초자료로써 활용도가 높을 것으로 기대됨

○ 분자단위 안정동위원소 분석 기법의 해양학 분야 활용에 대한 연구기반 조성

- 본 연구과제에서 북극해 생물로부터 확보된 아미노산 질소 안정동위원소비는 배경질소의 정보 뿐만 아니라 영양단계의 정보 또한 포함하고 있기 때문에, 기존에 확보된 자료를 통한 질소 순환 연구와 더불어 해양생태 연구에도 접목시킬 수 있음
- 이에 추후 후속 과제들을 통해 북극해역에서 채집되는 동물플랑크톤들의 생태적 위치 정보를 확보함에 따라, 분자단위의 안정동위원소 분석 기법의 활용범위를 넓히고 보다 심도 있는 북극 해양생태 분야의 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 기대됨

○ 북극 연안국 중심의 연구 체계가 강세인 북극권에서 협력관계 구축을 위한 연구자료 활용

- 분자단위 안정동위원소 분석 기법은 세계적으로 소수의 연구실만이 분석 기법을 보유하고 있으며, 이를 극지 해양분야에 접목하여 활용하고 있는 연구실은 보다 적은 실정임
- 이에 극지 해양생지화학 또는 해양생태 분야의 국외 연구기관과 공동 연구를 위해 본 연구과제의 분석 결과가 활용될 수 있을 것으로 기대됨

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 분자 단위 생체 지표의 안정동위원소 분석 기법의 활용
 - 분자 단위 생체 지표의 안정동위원소 분석 기법을 확보하여 연구에 활용하고 있는 연구팀은 점차 증가추세에 있으며, 해양생태학 분야 뿐만 아니라 해양생지화학 분야에서도 질소원 또는 탄소원에 대한 정보를 얻을 수 있는 사례들이 보고되어 향후의 활용 가능성이 높은 것으로 사료됨.
 - 여러 생태계에서 미생물에 의해 이루어지는 아미노산의 안정동위원소 분석을 통해, 미생물이 먹이 사슬 내에서 영양 단계에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구와(Steffan et al., 2017) 미생물의 유기물 분해 및 재합성 과정에서 각 아미노산의 물질 대사를 해석한 연구가 보고된 바 있음(Yamaguchi et al., 2017). 최근에는 영양 단계를 구하는 식에 사용되는 glutamic acid 및 phenylalanine의 질소 안정동위원소 이외에, 다른 아미노산의 질소 안정동위원소비로부터 물질 대사 과정을 추적하고자 하는 시도가 이루어지고 있음 (Decima et al., 2017; Decima et al., 2020).
 - 또한, 아미노산의 질소 안정동위원소비 분석 기법을 통해 해양 질소 순환에 대한 새로운 정보를 제시한 논문 또한 보고되고 있음. Gerringer et al (2017)은 아미노산의 질소 안정동위원소비와 위 내용물 분석법을 통해 심해 어류의 먹이원이 수심에 따라 상이하게 나타남을 보고하였으며, Yamaguchi and McCarthy (2018)은 입자성 유기 질소와 용존성 유기 질소의 기원을 아미노산의 질소 안정동위원소 분석을 통해 규명한 바 있음. 또한, 동물플랑크톤의 서식 수심에 따라 먹이원으로 사용되는 입자 크기가 상이할 수 있음이 보고되었음 (Romero-Romero et al., 2020; Hannides et al., 2020).

제 7 장 참고문헌

- Barreto-Curiel F, Focken U, D'Abramo LR, Viana MT (2017) Metabolism of *Seriola lalandi* during Starvation as Revealed by Fatty Acid Analysis and Compound-Specific Analysis of Stable Isotopes within Amino Acids. *PLoS ONE*, 12(1).
- Bowes RE, Thorp JH (2015) Consequences of employing amino acid vs. bulk tissue, stable isotope analysis: a laboratory trophic position experiment. *Ecosphere*, 6(1), 1-12.
- Chikaraishi Y, Ogawa NO, Kashiyama Y, Takano Y, Suga H, Tomitani A, Ohkouchi N (2009). Determination of aquatic food web structure based on compound specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography: methods*, 7(11), 740-750.
- Choi B, Ha SY, Lee JS, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, Shin KH (2017) Trophic interaction among organisms in a seagrass meadow ecosystem as revealed by bulk $\delta^{13}\text{C}$ and amino acid $\delta^{15}\text{N}$ analyses. *Limnology and Oceanography*, 62, 1426-1435.
- Choi B, Lee C, Takizawa Y, Chikaraishi Y, Oh HJ, Chang KH, Shin KH (2020) Trophic response to ecological conditions of habitats: Evidence from trophic variability of freshwater fish. *Ecology and evolution*, 10(14), 7250-7260.
- Choi H, Ha SY, Lee S, Kim JH, Shin KH (2020) Trophic dynamics of zooplankton before and after polar night in the Kongsfjorden (Svalbard): Evidence of Trophic position estimated by $\delta^{15}\text{N}$ analysis of amino acids. *Frontiers in Marine Science*, 7, 489.
- Cowie GL, Hedges JI (1992) Sources and reactivities of amino acids in a coastal marine environment. *Limnology and Oceanography*, 37(4), 703-724.
- Dauwe B, Middelburg JJ (1998) Amino acids and hexosamines as indicators of organic matter degradation state in North Sea sediments. *Limnology and Oceanography*, 43(5), 782-798.
- Decima M, Landry MR, Bradley CJ, Fogel ML (2017) Alanine $\delta^{15}\text{N}$ trophic fractionation in heterotrophic protists. *Limnology and Oceanography*, 62, 2308-2322.
- Decima M, Landry MR (2020) Resilience of plankton trophic structure to an eddy-stimulated diatom bloom in the North Pacific Subtropical Gyre. *Marine Ecology Progress Series*, 643, 33-48.
- Goto AS, Miura K, Korenaga T, Hasegawa T, Ohkouchi N, Chikaraishi Y. (2018) Fractionation of stable nitrogen isotopes ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) during enzymatic deamination of glutamic acid: Implications for mass and energy transfers in the biosphere. *Geochemical Journal*, 52(3), 273-280.
- Gerringer ME, Popp BN, Linley TD, Jamieson AJ, Drazen JC (2017) Comparative feeding

- ecology of abyssal and hadal fishes through stomach content and amino acid isotope analysis. *Deep-Sea Research Part 1*, 121, 110-120.
- Granger J, Prokopenko M, Sigman DM, Mordy C, Morse Z, Morales L, Plessen B (2011) Coupled nitrification denitrification in sediment of the eastern Bering Sea shelf leads to ^{15}N enrichment of fixed N in shelf waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C11).
- Granger J, Sigman DM, Gagnon J, Tremblay JE, Mucci A (2018) On the properties of the Arctic halocline and deep water masses of the Canada Basin from nitrate isotope ratios. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5443-5458.
- Hannides CCS, Popp BN, Close HG, Benitez-Nelson CR, Ka'apu-Lyons CA, Gloeckler K, Wallsgrove N, Umhau B, Palmer E, Dragen JC (2020) Seasonal dynamics of midwater zooplankton and relation to particle cycling in the North Pacific Subtropical Gyre. *Progress in Oceanography*, 182, 102266.
- Kedra M, Cooper LW, Zhang M, Biasatti D, Grebmeier JM (2019) Benthic trophic sensitivity to on-going changes in Pacific Arctic seasonal sea ice cover - Insights from the nitrogen isotopic composition of amino acids. *Deep Sea Research Part II*, 162, 137-151.
- Kim D, Hong S, Choi H, Choi B, Kim J, Khim JS, Park H, Shin KH (2019) Multimedia distributions, bioaccumulation, and trophic transfer of microcystins in the Geum River Estuary, Korea: Application of Compound-specific isotope analysis of amino acids. *Environmental International*, 133, 105194.
- Matthews CJ, Ferguson SH (2014) Spatial segregation and similar trophic-level diet among eastern Canadian Arctic/north-west Atlantic killer whales inferred from bulk and compound specific isotope analysis. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 94(6), 1343-1355.
- McCarthy MD, Benner R, Lee C, Fogel ML (2007) Amino acid nitrogen isotopic fractionation patterns as indicators of heterotrophy in plankton, particulate, and dissolved organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(19), 4727-4744.
- Pomerleau C, Heide-Jorgensen MP, Ferguson SH, Stern HL, Hoyer JL, Stern GA (2017) Reconstructing variability in West Greenland ocean biogeochemistry and bowhead whale (*Balaena mysticetus*) food web structure using amino acid isotope ratios. *Polar Biology*, 40, 2225-2238.
- Romero-Romero S, Ka'apu-Lyons CA, Umhau BP, Benitez-Nelson CR, Hannides CCS, Close HG, Dragen JC, Popp BN (2020) Deep zooplankton rely on small particles when particle fluxes are low. *Limnology and Oceanography Letters*, 5, 410-416.
- Sherwood OA, Guilderson TP, Batista FC, Schiff JT, McCarthy MD (2014) Increasing subtropical North Pacific Ocean nitrogen fixation since the Little Ice Age. *Nature*,

505, 78–81.

- Steffan SA, Chikaraishi Y, Dharampal PS, Pauli JN, Guédot C, Ohkouchi N (2017) Unpacking brown food webs: Animal trophic identity reflects rampant microbivory. *Ecology and evolution*, 7(10), 3532–3541.
- Takano Y, Kashiyama Y, Ogawa NO., Chikaraishi Y, Ohkouchi N (2010) Isolation and desalting with cation exchange chromatography for compound specific nitrogen isotope analysis of amino acids: application to biogeochemical samples. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 24(16), 2317–2323.
- Vokhshoori NL, McCarthy MD (2014) Compound-Specific $\delta^{15}\text{N}$ Amino Acid Measurements in Littoral Mussels in the California Upwelling Ecosystem: A New Approach to Generating Baseline $\delta^{15}\text{N}$ Isoscapes for Coastal Ecosystems. *PLOS One*, 9(6), e98087.
- Won EJ, Choi B, Lee CH, Hong S, Lee JH, Shin KH (2020) Variability of trophic magnification factors as an effect of estimated trophic position: Application of compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids. *Environment International*, 135, 105361.
- Yamaguchi. YT, Chikaraishi Y, Takano Y, Ogawa NO, Imachi H, Yokoyama Y, Ohkouchi N (2017) Fractionation of nitrogen isotopes during amino acid metabolism in heterotrophic and chemolithoautotrophic microbes across Eukarya, Bacteria, and Archaea: Effects of nitrogen sources and metabolic pathways. *Organic Geochemistry*, 111, 101–112.
- Yamaguchi YT, McCarthy MD (2018) Sources and transformation of dissolved and particulate organic nitrogen in the North Pacific Subtropical Gyre indicated by compound-specific $\delta^{15}\text{N}$ analysis of amino acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220, 329–347.

별첨자료 (연구성과)

1. 논문 (국내외 전문 학술지) 게재 실적

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Distribution of long chain alkyl diols along a south-north transect of the northwestern Pacific region: Insights into a paleo sea surface nutrient proxy	Organic Geochemistry	갈종구	119	네덜란드	Elsevier	SCI	2018.02.18	0146-6380	40
2	Trophic dynamics of <i>Calanus hyperboreus</i> in the Pacific Arctic Ocean	Journal of Geophysical Research: Oceans	최현태	126	미국	American Geophysical Union	SCI	in press	2169-9291	100

2. 국내 및 국제 학술회의 발표 실적

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	East Asia GEOTRACES Workshop	신경훈	2017.01.16	삿포로	일본
2	한국해양학회 춘계 학술대회	원해민	2017.04.20	부산	한국
3	한국해양학회 추계 학술대회	원해민	2017.11.03	경주	한국
4	ISAR-5	원해민	2018.01.16	도쿄	일본
5	한국해양학회 추계 학술대회	원해민	2018.10.26	부산	한국
6	The 25 th international symposium on Polar Sciences	원해민	2019.05.13	인천	한국

3. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1		2016~2021	2	3			2	3	5				

(최보형, 갈종구, 원해민, 김솔빈, 최지수)

4. 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	수상	Best Student Poster Award in Chemical Oceanography	우수포스터 발표상	원해민	2018.10.26	사단법인 한국해양학회
2	수상	Early Carrer Best Poster	우수포스터 발표상	원해민	2019.05.15	극지연구소



부 록

부록 1 2015년 향차 정점별 위도 및 경도	55
부록 2 2016년 향차 정점별 위도 및 경도	56
부록 3 2017년 향차 정점별 위도 및 경도	57
부록 4 2018년 향차 정점별 위도 및 경도	58
부록 5 2015년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소비	59
부록 6 2016년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소비	60
부록 7 2017년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소비	61
부록 8 2018년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소비	62
부록 9 2017-18년 침강입자 시료의 아미노산 함량	63
부록 10 2018-19년 침강입자 시료의 아미노산 함량	64
부록 11 2017-18년 침강입자 시료의 bulk 탄소 및 질소 안정동위원소, 아미노산의 질소 안정동 위원소비	65
부록 12 2017-18년 침강입자 시료의 bulk 탄소 및 질소 안정동위원소, 아미노산의 질소 안정동 위원소비	66

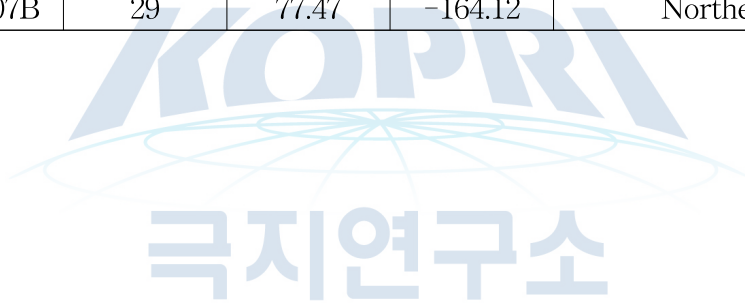


부록 1. 2015년 항차 정점별 위도 및 경도.

Year	Cruise	Station	Latitude	Longitude	Area
2015	ARA06A	PO1	42.30	151.16	North Pacific
2015	ARA06A	PO2	44.38	155.35	North Pacific
2015	ARA06A	PO3	46.62	159.43	North Pacific
2015	ARA06A	PO4	48.86	163.52	North Pacific
2015	ARA06A	PO5	51.10	167.60	North Pacific
2015	ARA06A	PO6	53.08	171.64	North Pacific
2015	ARA06A	PO7	55.07	175.68	North Pacific
2015	ARA06A	PO8	57.05	179.73	North Pacific
2015	ARA06A	PO9	59.03	-176.23	North Pacific
2015	ARA06B	1	65.17	-168.69	Bering
2015	ARA06B	2	66.63	-168.69	Bering
2015	ARA06B	3	67.33	-168.83	Bering
2015	ARA06B	6	67.88	-167.63	Bering
2015	ARA06B	9	69.17	-168.67	Bering
2015	ARA06B	11	71.43	-168.67	Bering
2015	ARA06B	13	73.58	-168.28	Northern Chukchi
2015	ARA06B	14	74.80	-167.90	Northern Chukchi
2015	ARA06B	16	75.15	-176.00	Northern East Siberian
2015	ARA06B	18	75.76	177.15	Northern East Siberian
2015	ARA06B	21	76.01	173.61	Northern East Siberian
2015	ARA06B	22	77.01	173.62	Northern East Siberian
2015	ARA06B	23	78.00	173.22	Northern East Siberian
2015	ARA06B	24	79.00	172.76	Northern East Siberian
2015	ARA06B	25	80.00	172.35	Northern East Siberian
2015	ARA06B	26	80.77	172.85	Northern East Siberian
2015	ARA06B	27	78.98	-179.93	Northern East Siberian
2015	ARA06B	29	78.00	-174.93	Northern East Siberian
2015	ARA06B	31	77.47	-164.12	Northern Chukchi
2015	ARA06B	32	76.58	-165.38	Northern Chukchi
2015	ARA06B	34	77.00	-175.00	Northern East Siberian
2015	ARA06B	35	77.00	-179.98	Northern East Siberian
2015	ARA06B	36	76.01	-179.97	Northern East Siberian
2015	ARA06B	38	76.00	-170.51	Northern East Siberian
2015	ARA06B	39	75.71	-166.86	Northern Chukchi

부록 2. 2016년 항차 정점별 위도 및 경도.

Year	Cruise	Station	Latitude	Longitude	Area
2016	ARA07B	1	65.17	-168.69	Bering
2016	ARA07B	2	66.63	-168.69	Bering
2016	ARA07B	3	67.67	-168.96	Bering
2016	ARA07B	10	70.50	-168.67	Bering
2016	ARA07B	12	72.36	-168.67	Northern Chukchi
2016	ARA07B	14	74.80	-167.90	Northern Chukchi
2016	ARA07B	16	75.15	-176.00	Northern East Siberian
2016	ARA07B	18	75.77	177.07	Northern East Siberian
2016	ARA07B	19	76.00	173.60	Northern Chukchi
2016	ARA07B	20	77.00	176.57	Northern East Siberian
2016	ARA07B	21	78.00	177.28	Northern East Siberian
2016	ARA07B	22	78.52	178.85	Northern East Siberian
2016	ARA07B	23	77.87	-175.91	Northern East Siberian
2016	ARA07B	24	77.00	-175.00	Northern East Siberian
2016	ARA07B	26	76.00	-170.50	Northern East Siberian
2016	ARA07B	28	77.70	-169.50	Northern Chukchi
2016	ARA07B	29	77.47	-164.12	Northern Chukchi



부록 3. 2017년 항차 정점별 위도 및 경도.

Year	Cruise	Station	Latitude	Longitude	Area
2017	ARA08A	1	42.30	151.16	North Pacific
2017	ARA08A	2	44.38	155.35	North Pacific
2017	ARA08A	3	46.62	159.43	North Pacific
2017	ARA08A	4	48.86	163.52	North Pacific
2017	ARA08A	5	51.10	167.60	North Pacific
2017	ARA08A	6	53.08	171.64	North Pacific
2017	ARA08A	7	55.07	175.68	North Pacific
2017	ARA08A	8	57.05	179.72	North Pacific
2017	ARA08A	9	59.03	-176.24	North Pacific
2017	ARA08A	10	61.02	-172.19	North Pacific
2017	ARA08A	11	62.95	-168.25	North Pacific
2017	ARA08B	1	65.17	-168.69	Bering
2017	ARA08B	2	66.63	-168.69	Bering
2017	ARA08B	3	67.67	-168.96	Bering
2017	ARA08B	6	68.01	-167.87	Bering
2017	ARA08B	8	68.24	-167.12	Bering
2017	ARA08B	9	69.17	-168.67	Bering
2017	ARA08B	10	70.50	-168.67	Northern Chukchi
2017	ARA08B	11	71.43	-168.67	Northern Chukchi
2017	ARA08B	12	72.36	-168.67	Northern Chukchi
2017	ARA08B	14	73.58	-168.28	Northern Chukchi
2017	ARA08B	15	74.80	-167.89	Northern Chukchi
2017	ARA08B	16	75.24	-171.98	Northern East Siberian
2017	ARA08B	17	75.15	-176.02	Northern East Siberian
2017	ARA08B	18	76.00	-175.50	Northern East Siberian
2017	ARA08B	19	77.00	-175.00	Northern East Siberian
2017	ARA08B	20	77.99	-174.95	Northern East Siberian
2017	ARA08B	21	77.71	179.99	Northern East Siberian
2017	ARA08B	22	75.77	177.16	Northern East Siberian
2017	ARA08B	23	75.00	173.61	Northern East Siberian
2017	ARA08B	27	77.00	-170.05	Northern East Siberian
2017	ARA08B	28	76.00	-170.50	Northern East Siberian
2017	ARA08B	29	75.69	-166.64	Northern Chukchi
2017	ARA08B	30	76.58	-165.38	Northern Chukchi
2017	ARA08B	31	77.47	-164.12	Northern Chukchi
2017	ARA08B	32	77.50	-158.89	Northern Chukchi
2017	ARA08B	33	76.53	-159.97	Northern Chukchi
2017	ARA08B	34	75.50	-161.13	Northern Chukchi
2017	ARA08B	35	74.50	-162.25	Northern Chukchi

부록 4. 2018년 항차 정점별 위도 및 경도.

Year	Cruise	Station	Latitude	Longitude	Area
2018	ARA09B	2	73.58	-168.28	Northern Chukchi
2018	ARA09B	4	74.52	-161.93	Northern Chukchi
2018	ARA09B	5	75.50	-161.13	Northern Chukchi
2018	ARA09B	6	75.69	-166.64	Northern Chukchi
2018	ARA09B	7	76.00	-170.50	Northern Chukchi
2018	ARA09B	8	76.00	-175.50	Northern East Siberian
2018	ARA09B	9	76.00	-180.00	Northern East Siberian
2018	ARA09B	10	76.50	176.50	Northern East Siberian
2018	ARA09B	11	77.00	173.60	Northern East Siberian
2018	ARA09B	12	76.00	173.60	Northern East Siberian
2018	ARA09B	13	75.00	173.60	Northern East Siberian
2018	ARA09B	14	74.00	170.00	Northern East Siberian
2018	ARA09B	15	74.64	174.92	Northern East Siberian
2018	ARA09B	16	75.80	177.06	Northern East Siberian
2018	ARA09B	17	75.15	-180.00	Northern East Siberian
2018	ARA09B	18	75.15	-176.00	Northern East Siberian
2018	ARA09B	19	75.24	-171.97	Northern Chukchi
2018	ARA09B	20	74.80	-167.90	Northern Chukchi
2018	ARA09B	21	76.60	-166.30	Northern Chukchi
2018	ARA09B	22	77.47	-164.12	Northern Chukchi
2018	ARA09B	23	78.95	-164.63	Northern Chukchi
2018	ARA09B	26	76.50	-160.00	Northern Chukchi
2018	ARA09B	27	76.33	-156.38	Northern Chukchi

부록 5. 2015년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소 분석결과.

Cruise	Station	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TL	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Baseline}}$
ARA06A	PO1	7.45	19.71	4.95	2.49	3.71
ARA06A	PO2	4.03	13.94	0.12	2.37	0.60
ARA06A	PO3	4.69	15.87	0.28	2.60	0.68
ARA06A	PO4	4.61	17.49	0.72	2.76	0.21
ARA06A	PO5	6.02	15.83	0.21	2.61	2.00
ARA06A	PO6	6.90	17.15	0.03	2.81	2.38
ARA06A	PO7	5.39	16.50	-0.32	2.77	0.97
ARA06A	PO8	6.37	17.64	2.30	2.57	2.44
ARA06A	PO9	5.34	16.42	1.28	2.55	1.47
ARA06B	1	8.39	21.57	4.28	2.83	3.82
ARA06B	2	8.99	21.08	5.14	2.65	4.87
ARA06B	3	9.33	22.67	5.97	2.75	4.96
ARA06B	6	10.02	21.55	5.54	2.66	5.87
ARA06B	9	12.33	22.46	5.42	2.79	7.84
ARA06B	11	11.49	24.26	5.07	3.08	6.30
ARA06B	13	12.07	25.92	5.47	3.24	6.46
ARA06B	14	10.69	20.50	4.87	2.61	6.67
ARA06B	16	11.42	20.55	3.83	2.75	7.04
ARA06B	18	11.35	22.50	5.60	2.78	6.91
ARA06B	21	11.11	22.69	6.50	2.68	6.91
ARA06B	22	11.03	21.03	4.96	2.67	6.86
ARA06B	23	11.14	24.23	4.27	3.18	5.70
ARA06B	24	10.88	24.17	9.47	2.49	7.16
ARA06B	25	11.33	23.93	5.66	2.96	6.44
ARA06B	26	11.66	24.07	6.22	2.90	6.91
ARA06B	27	11.29	25.49	7.89	2.87	6.62
ARA06B	29	11.98	24.43	9.90	2.46	8.32
ARA06B	31	11.74				
ARA06B	32	10.50	20.26	3.81	2.72	6.20
ARA06B	34	10.30	24.13	6.19	2.91	5.52
ARA06B	35	11.48	21.69	5.07	2.74	7.13
ARA06B	36	11.27	22.46	5.87	2.73	6.94
ARA06B	38	11.39	20.83	6.45	2.44	7.78
ARA06B	39	11.69	20.37	6.26	2.41	8.16

부록 6. 2016년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소 분석결과.

Cruise	Station	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TL	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Baseline}}$
ARA07B	2	11.30	21.61	4.85	2.76	6.90
ARA07B	12	10.70	21.85	7.66	2.42	7.15
ARA07B	14	9.90	21.15	5.16	2.66	5.76
ARA07B	16	9.40	21.26	6.03	2.56	5.51
ARA07B	18	8.90	20.88	5.34	2.60	4.91
ARA07B	20	9.60	20.95	5.96	2.52	5.79
ARA07B	21	9.70	21.75	7.15	2.47	6.01
ARA07B	24	10.40	20.50	6.32	2.42	6.85
ARA07B	26	10.40	24.81	5.56	3.09	5.19
ARA07B	29	11.90	23.95	4.94	3.05	6.76



부록 7. 2017년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소비 (‰).

Cruise	Station	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TL	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Baseline}}$
ARA08A	1	6.95	20.91	2.82	2.93	2.11
ARA08A	2	4.73	14.38	1.71	2.22	1.69
ARA08A	3	3.56	14.97	-1.07	2.66	-0.60
ARA08A	4	3.56	15.52	-0.66	2.68	-0.64
ARA08A	5	5.19	13.45	1.66	2.10	2.43
ARA08A	6	6.27	18.93	4.46	2.46	2.63
ARA08A	7	4.14	15.53	0.77	2.50	0.40
ARA08A	8	6.22	16.06	-0.97	2.79	1.74
ARA08A	9	7.45	18.80	2.42	2.71	3.18
ARA08A	10	11.53	25.13	9.26	2.64	7.43
ARA08A	11	10.68	25.55	9.11	2.72	6.39
ARA08B	1	6.75	22.32	6.35	2.65	2.61
ARA08B	2	11.92	24.93	8.68	2.69	7.70
ARA08B	3	9.51	21.34	4.55	2.76	5.11
ARA08B	6	9.41	22.64	5.01	2.87	4.73
ARA08B	8	11.21	23.82	10.03	2.37	7.79
ARA08B	9	11.13	22.85	5.27	2.87	6.47
ARA08B	12	10.00	24.85	7.56	2.83	5.44
ARA08B	14	10.65	23.70	6.85	2.77	6.23
ARA08B	15	9.42	24.03	6.06	2.92	4.63
ARA08B	16	9.43	22.09	7.65	2.45	5.80
ARA08B	17	9.85	22.33	7.74	2.47	6.16
ARA08B	18	10.31	22.83	8.52	2.43	6.72
ARA08B	19	9.99	18.74	5.31	2.32	6.69
ARA08B	20	9.37	17.72	6.50	2.03	6.80
ARA08B	21	10.32	23.93	7.35	2.73	5.99
ARA08B	22	10.41	24.19	7.36	2.77	5.99
ARA08B	23	12.06	25.99	10.11	2.64	7.95
ARA08B	27	11.54	23.20	6.09	2.80	7.03
ARA08B	28	9.77	19.76	3.99	2.63	5.70
ARA08B	29	10.44	18.99	4.51	2.46	6.79
ARA08B	30	10.29	21.62	6.29	2.57	6.36
ARA08B	31	11.00	21.88	5.89	2.66	6.86
ARA08B	32	10.22	19.18	5.63	2.33	6.88
ARA08B	33	11.97	19.62	5.30	2.44	8.38
ARA08B	34	11.81	20.45	5.42	2.53	7.98
ARA08B	35	13.02	21.97	5.36	2.74	8.68

부록 8. 2018년 향차 정점별 요각류 시료의 bulk 및 아미노산 질소 안정동위원소비 (‰).

Cruise	Station	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TL	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Baseline}}$
ARA09B	2		20.08	2.82	2.82	
ARA09B	4	12.02	22.91	3.80	3.05	6.89
ARA09B	5	11.24	23.40	4.00	3.10	5.98
ARA09B	6	10.61	23.13	3.86	3.09	5.38
ARA09B	7	11.63	22.68	5.72	2.78	7.17
ARA09B	8	7.12	20.12	5.45	2.48	3.41
ARA09B	9	9.97	18.58	1.96	2.74	5.63
ARA09B	10	7.50	19.33	2.39	2.60	3.50
ARA09B	11	7.74	22.17	4.00	2.94	2.88
ARA09B	12	7.43	20.16	3.58	2.73	3.10
ARA09B	13	8.25	19.10	3.86	2.56	4.36
ARA09B	15	9.09	22.75	3.26	3.04	4.00
ARA09B	16	9.06	21.36	5.89	2.59	5.09
ARA09B	17	8.19	22.06	6.00	2.67	4.03
ARA09B	18	7.72	21.44	5.10	2.70	3.46
ARA09B	19	8.41	21.72	5.47	2.69	4.18
ARA09B	20	11.97	21.83	5.57	2.69	7.74
ARA09B	21	11.38	22.99	3.93	3.06	6.23
ARA09B	22	12.46	22.85	4.78	2.93	7.63
ARA09B	23	14.24	23.85	4.46	3.10	8.98
ARA09B	26	10.63	22.64	1.90	3.28	4.93
ARA09B	27	10.53	22.00	5.39	2.74	6.18

부록 9. 2017-18년 침강입자 시료의 아미노산 함량 ($\mu\text{g}/\text{mg}$ dry weight)

Sample	Ala	Gly	BALA	Val	Leu	Ile	GABA	Pro
St.16-01	0.23	0.28	0.06	0.14	0.42	0.12	0.10	0.44
St.16-02	0.43	0.47	0.09	0.28	0.79	0.22	0.14	0.78
St.16-09	0.21	0.24	0.07	0.13	0.76	0.21	0.14	0.75
St.16-11	0.19	0.22	0.06	0.11	0.26	0.09	0.10	0.40
St.16-17	0.15	0.15	0.08	0.12	0.28	0.11	0.13	0.29
St.16-18	0.58	0.59	0.12	0.38	1.05	0.29	0.19	0.93
St.16-19	0.56	0.58	0.11	0.28	0.92	0.19	0.18	0.92
St.16-20	0.23	0.28	0.07	0.12	0.35	0.10	0.13	0.42
St.22-16	0.15	0.20	0.06	0.08	0.21	0.07	0.10	0.27
St.22-17	0.12	0.13	0.06	0.05	0.17	0.05	0.11	0.24
St.22-18	0.11	0.14	nd	0.07	0.15	0.07	0.10	0.22
St.22-19	0.17	0.20	0.05	0.10	0.23	0.08	0.12	0.30
St.22-20	0.37	0.49	0.07	0.20	0.64	0.16	0.16	0.64
Sample	Asp	Thr	Ser	Met	Glu	Phe	Lys	Total
St.16-01	0.64	0.36	0.45	0.20	0.60	0.29	0.29	4.62
St.16-02	1.14	0.55	0.73	0.34	1.15	0.49	0.44	8.05
St.16-09	1.10	0.53	0.71	0.32	1.11	0.47	0.42	7.16
St.16-11	0.37	0.26	0.37	0.13	0.43	0.20	0.24	3.42
St.16-17	0.37	0.26	0.35	0.15	0.40	0.21	nd	3.06
St.16-18	1.55	0.90	1.28	0.44	1.53	0.69	0.57	11.08
St.16-19	1.29	0.77	1.26	0.33	1.33	0.62	0.55	9.89
St.16-20	0.52	0.35	0.61	0.21	0.56	0.24	0.29	4.49
St.22-16	0.34	0.24	0.39	0.12	0.37	0.16	0.23	2.99
St.22-17	0.14	0.19	0.27	0.13	0.21	0.13	nd	2.01
St.22-18	0.24	0.21	0.34	0.16	0.26	0.13	nd	2.22
St.22-19	0.27	0.23	0.42	0.22	0.33	0.18	0.21	3.10
St.22-20	0.84	0.49	1.03	0.38	0.87	0.40	0.33	7.07

부록 10. 2018-19년 침강입자 시료의 아미노산 함량 ($\mu\text{g}/\text{mg}$ dry weight)

Sample	Ala	Gly	BALA	Val	Leu	Ile	GABA	Pro
St.16-01	0.77	0.75	0.66	1.19	1.19	0.84	1.15	1.06
St.16-02	1.03	1.12	0.11	0.80	1.97	0.67	0.29	1.20
St.16-03	0.37	0.49	0.10	0.29	0.65	0.26	0.26	0.57
St.16-04	0.55	0.71	0.10	0.42	0.91	0.37	0.29	0.64
St.16-05	0.53	0.65	0.11	0.40	0.76	0.33	0.27	0.57
St.19-01	0.77	0.76	nd	1.10	1.23	0.83	1.04	1.07
St.19-02	1.28	1.32	0.10	1.48	2.75	1.19	0.34	1.67
St.19-03	0.66	0.81	0.10	0.67	1.35	0.61	0.35	1.06
St.19-04	0.44	0.55	0.10	0.37	0.69	0.32	0.29	0.61
St.19-17	0.72	0.81	0.10	0.71	1.33	0.60	0.30	0.97
St.19-18	0.75	0.87	0.10	0.58	1.29	0.48	0.35	0.90

Sample	Asp	Thr	Ser	Met	Glu	Phe	Lys	Total
St.16-01	1.45	0.69	0.84	1.23	1.50	1.52	nd	14.84
St.16-02	3.18	0.60	0.88	0.73	3.23	1.17	0.56	17.55
St.16-03	1.46	0.29	0.58	0.35	1.20	0.60	0.25	7.72
St.16-04	1.75	0.37	0.59	0.43	1.67	0.71	0.29	9.82
St.16-05	1.46	0.31	0.49	0.38	1.48	0.63	0.26	8.65
St.19-01	1.62	0.75	0.86	1.18	1.80	1.48	nd	14.50
St.19-02	4.46	1.64	1.59	0.87	5.11	1.56	1.02	26.39
St.19-03	2.67	0.69	0.89	0.52	2.71	0.99	0.36	14.45
St.19-04	1.60	0.42	0.62	0.36	1.38	0.59	0.25	8.58
St.19-17	2.48	0.75	0.85	0.50	2.56	0.93	0.39	14.01
St.19-18	2.51	0.53	0.80	0.55	2.44	0.87	0.30	13.33

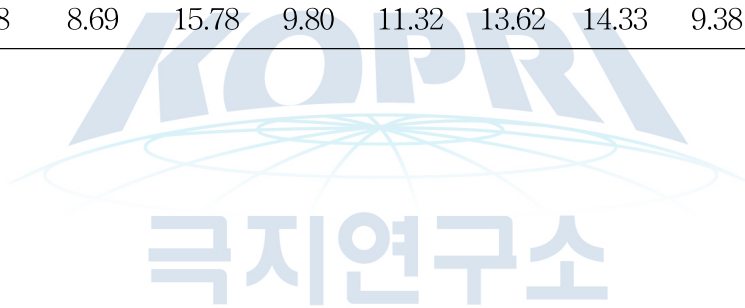
부록 11. 2017-18년 침강입자 시료의 bulk 탄소 및 질소 안정동위원소, 아미노산의 질소 안정 동위원소비 (‰).

Sample	$\delta^{13}\text{C}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$						TL	ΣV
			Ala	Gly	Val	Pro	Glu	Phe		
St.16-01	-34.10	10.22	12.78	5.96	17.08	11.99	13.04	1.81	2.03	1.59
St.16-02	-26.00	9.94	14.77	8.48	17.08	16.31	15.08	7.96	1.49	2.25
St.16-09	-25.40	9.58	15.02	7.77	15.35	18.52	17.68	8.56	1.75	2.56
St.16-11	-23.86	8.97	15.43	9.12	12.81	17.19	17.66	8.90	1.71	2.52
St.16-17	-25.06	9.04	14.32	8.90	17.97	15.58	14.81	7.13	1.56	2.23
St.16-18	-26.22	8.40	10.61	5.74	14.92	14.94	12.78	6.06	1.44	2.51
St.16-19	-25.43	9.40	14.66	7.16	16.95	18.17	15.23	5.39	1.85	2.63
St.16-20	-24.08	8.07	10.02	3.59	16.77	13.81	12.90	6.08	1.45	2.80
St.22-16	-19.14	8.69	12.54	4.37	15.22	16.24	14.38	5.56	1.71	2.77
St.22-17	-15.41	7.41	11.65	4.60	4.91	12.19	11.30	3.79	1.54	3.06
St.22-18	-19.23	6.91	9.24	4.31	9.82	12.05	11.65	5.23	1.40	2.77
St.22-19	-18.95	7.47	10.37	4.46	14.14	12.70	11.32	5.37	1.34	2.85
St.22-20	-23.91	8.11	9.04	5.19	9.47	10.81	9.62	4.52	1.22	1.72

극지연구소

부록 12. 2018-19년 침강입자 시료의 bulk 탄소 및 질소 안정동위원소, 아미노산의 질소 안정 동위원소비 (‰).

Sample	$\delta^{13}\text{C}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AA}}$						TL	ΣV
			Ala	Gly	Val	Pro	Glu	Phe		
St.16-01	-26.37	8.44	9.49	6.60	10.58	10.64	10.42	7.23	0.97	0.40
St.16-02	-23.90	7.39	9.64	5.44	12.35	10.45	11.09	5.11	1.34	0.84
St.16-03	-23.96	8.32	10.60	5.92	13.87	11.77	11.60	3.54	1.61	0.96
St.16-04	-23.93	9.29	11.93	5.41	15.56	12.64	13.50	5.47	1.61	1.12
St.16-05	-21.78	9.77	14.12	9.75	17.72	12.47	16.27	8.10	1.63	1.85
St.19-01	-23.96	8.95	14.93	6.16	13.36	16.21	15.44	10.33	1.22	0.84
St.19-02	-22.66	7.49	12.14	5.21	14.62	12.31	13.84	5.29	1.68	1.00
St.19-03	-23.11	7.37	11.54	4.62	12.92	10.62	12.45	5.62	1.45	0.80
St.19-04	-23.50	8.27	15.02	8.12	19.63	19.30	16.09	8.90	1.50	1.95
St.19-17	-23.92	9.26	18.28	10.17	17.68	14.85	18.36	11.35	1.48	1.22
St.19-18	-23.98	8.69	15.78	9.80	11.32	13.62	14.33	9.38	1.20	1.29





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