

BSPE
17370
-044-13

BSPE17370-044-13

북극 해양 퇴적물의
와편모조류 시스템을
이용한
해양표층환경프록시
개발
예비연구
한국해양연구원
부설
극지연구소

북극 해양퇴적물의 와편모조류 시스템을 이용한 해양 표층 환경 프록시 개발 예비 연구

A pilot study on marine-terrestrial
proxies using organic micro-flora in
marine sediments

주 의
(편집순서8)

(16 포인트 고딕체)

↑
15cm
↓

2018. 06. 29

한 국 해 양 연 구 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 해양퇴적물의 외편모조류 시스트를 이용한 해양 표층 환경 프록시 개발 예비 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



보고서 초록

과제관리번호	BSPE17370-044-13	해당단계 연구기간	2017.05.01 ~ 2018.04.30	단계 구분	(1단계) / (총 1단계)
연구사업명	중 사업명	창의연구사업			
	세부사업명	신진연구원 지원사업			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	북극 해양퇴적물의 와편모조류 시스템을 이용한 해양 표층 환경 프록시 개발 예비 연구			
연구책임자	김 소 영	해당단계 참여연구원수	총 : 1명 내부 : 1명 외부 : 0명	해당단계 연구비	정부: 48,000 천원 기업: 천원 계: 48,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	43
<p><input type="checkbox"/> 척치-동시베리아 해역은 서북극해 해양-대기 순환 및 그에 따른 전 지구 기후환경 변화 기작을 연구할 수 있는 중요한 해역임</p> <p><input type="checkbox"/> 북반구 고위도 해양퇴적물에서 산출량이 높은 와편모조류 시스템은 북극해 환경변화 연구에 유용한 자료를 도출시킬 수 있는 중요한 환경지시자임</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 현재까지 와편모조류 시스템을 이용한 서북극해 환경변화 연구는 매우 부족함 ▪ 와편모조류 시스템을 활용한 서북극 해양표층 환경지시자 개발 및 검증·평가 작업이 필요함 <p><input type="checkbox"/> 본 연구에서는 서북극 척치-동시베리아 해역 표층퇴적물의 와편모조류 시스템 군집 분포와 해양표층 환경요인 간 상호연관성을 분석하고, 잠재적 환경지시자를 파악하고자 함</p> <p><input type="checkbox"/> 연구결과, 총 14속 29종의 와편모조류 시스템이 104~4,982 cysts/g의 범위로 관찰됨</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 전반적으로 수심이 얇은 대륙붕 해역에서 높은 산출량을 보였으며, 독립영양종과 종속영양종 (주로 Round Brown Spiny Cyst 중 군집)이 각각 척치해와 동시베리아 대륙붕에서 높은 농도를 보임 ▪ 다변량 통계분석을 수행한 결과, 척치-동시베리아 해역 간 대비 양상은 표층 분포도뿐만 아니라, 주요 종 군집 및 환경요인의 통계적 상관성에도 나타남을 확인함 <p><input type="checkbox"/> 향후, 와편모조류 시스템 군집 분석자료 축적 및 정밀한 통계 평가·검증 작업을 통해, 환경지시자로서 신뢰도 확립을 위한 추가 연구가 필요함</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	와편모조류 시스템, 해양퇴적물, 척치해, 동시베리아해, 해양 표층 환경			
	영 어	dinoflagellate cysts, seafloor sediments, Chukchi Sea, East Siberian Sea, sea-surface conditions			

요 약 문

I. 제 목

북극 해양퇴적물의 외편모조류 시스트를 이용한 해양 표층 환경 프록시 개발 예비 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적

척치-동시베리아해 표층퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 분포와 해양 표층 환경요인 간 상호 연관성 분석 및 서북극해 환경변화에 대한 잠재적 환경지시자 파악

2. 필요성

- 척치-동시베리아 해역은 서북극해 해양-대기 순환 및 그에 따른 전 지구 기후환경 변화 기작을 연구할 수 있는 중요한 해역임
- 북반구 고위도 해양퇴적물에서 산출량이 높은 외편모조류 시스트는 북극 해양 환경변화 연구에 유용한 자료를 도출시킬 수 있는 중요한 환경프록시이나, 현재까지 외편모조류 시스트를 이용한 서북극해 환경변화 연구는 매우 부족함
- 외편모조류 시스트를 이용한 서북극해 환경지시자 개발 및 검증·평가 작업이 필요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북반구 고위도 해양퇴적물의 외편모조류 시스트 및 해양 환경변화 연구 기초 자료 수집·분석
- 표준 시료 전처리-종 동정·분류 기법을 이용한 외편모조류 시스트 군집 및 분포 특성 분석

- 다변량 통계분석을 통한 외편모조류 시스트 군집 조성파 해양 환경요인 간 상관성 분석 및 잠재적 환경지시자 파악

IV. 연구개발결과

- 연구결과, 총 14속 29종의 외편모조류 시스트가 104~4,982 cysts/g의 범위로 관찰됨
- 전반적으로 수심이 얇은 대륙붕 해역에서 높은 산출량을 보였으며, 독립영양종과 종속영양종 군집은 각각 척치해와 동시베리아 대륙붕 퇴적물에서 높은 농도를 보임
- 다변량 통계분석 결과, 표층 분포도에서 관찰된 척치-동시베리아 해역 간 대비 양상이, 주요 종 군집 및 환경요인의 통계적 상관성에도 나타남을 확인함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 북반구 고위도 현생 외편모조류 시스트 표준 데이터베이스화 작업 및 북극 기후환경 변화 복원 연구를 위한 기초자료 제공
- 서북극해 기후환경 변동 정량화 기법 개발을 위한 미화석학적 연구접근 방식 제안

S U M M A R Y

I. Subject

A pilot study on marine-terrestrial proxies using organic micro-flora in marine sediments

II. Objectives and Necessities

1. Objectives

To investigate distributions of dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments of the Chukchi-East Siberian Seas, and to examine potential proxy indicators by exploring their relationships with environmental conditions of surface waters

2. Necessities

- The Chukchi - East Siberian Seas of the western Arctic Ocean is known to be highly sensitive to both climate variability and sea-level fluctuations, which affect its atmospheric and oceanographic linkages with the Pacific Ocean
- Despite a potential usefulness of dinoflagellate cysts in marine sediments as a proxy indicator for evaluating environmental conditions of surface waters, information to comprehend the associations between dinoflagellate cyst assemblages and hydrographic parameters in the western Arctic Ocean has been limited.

III. Contents and Scopes

- Investigating the composition and spatial distribution of dinoflagellate cyst

assemblages in surface sediments of the Chukchi-East Siberian Seas through the use of standard sample preparation techniques and taxonomical identification

- Examining major sea-surface parameters controlling the distribution of dinoflagellate cyst assemblages and exploring their potential utility as a proxy indicator by performing multivariate statistical analyses

IV. Results

- Geographic distribution maps of the most common and/or interesting dinocyst species in the surface sediments of the Chukchi-East Siberian Seas were produced.
- In total, 14 genera and 29 species dinoflagellate cysts were identified with concentrations of total dinoflagellate cysts ranging from 104~4,982 cysts/g.
- High dinoflagellate cyst concentrations occur in the shallow shelf environments: the autotrophic species generally have their high abundances in Chukchi Sea region, while the heterotrophic species dominantly occur in the East Siberian Sea region.
- The multivariate statistical analyses tested for the dinoflagellate cyst assemblages demonstrate a contrast between the autotrophic and heterotrophic species in the Chukchi-East Siberian shelf environments.

V. Application Plans

- Contribute the establishment of a reference database of modern dinoflagellate cyst assemblages for palaeoceanographical reconstructions in the Arctic Ocean
- Improve a micropaleontological approach for quantifying past environmental and climatic changes in the western Arctic Ocean on the basis of dinoflagellate cyst assemblages

C O N T E N T S

Cover.....	1
Abstract.....	2
Summary(Korean).....	3
Summary.....	5
Contents.....	7
Contents (Korean).....	8
Chapter 1 Introduction.....	9
Section 1 Objectives.....	9
Section 2 Necessity.....	10
1. Technical necessity.....	10
2. Economic/Industrial necessity.....	10
3. Scientific necessity.....	11
4. Societal/cultural necessity.....	11
제 3 절 Contents and Scope.....	11
Chapter 2 Domestic/Overseas Status of Technological Development.....	13
Section 1 Overseas Status.....	13
Section 2 Domestic Status.....	16
Chapter 3 Contents and Results.....	17
Section 1 Study area.....	17
Section 2 Materials and Methods.....	18
1. Laboratory procedures and taxonomical identification.....	18
2. Multivariate statistical analysis.....	19
Section 3 Results.....	21
1. Dinoflagellate cyst assemblage compositions.....	21
2. Distribution of dinoflagellate cysts in the surface sediments.....	24
3. <i>Islandinium minutum</i> subsp. <i>barbatum</i>	27
4. Multivariate statistical analysis.....	30
Chapter 4 Achievement of Goals and External Contributions.....	33
Section 1 Achievement of Goals.....	33
Section 2 External Contributions.....	33
Chapter 5 Plans for Utilization of Results.....	34
Chapter 6 Overseas Scientific and Technical Information Collected.....	35
Chapter 7 References.....	36

목 차

제출문.....	1
보고서 초록.....	2
요약문.....	3
영문요약문.....	5
영문목차.....	7
목차.....	8
제 1 장 서론.....	9
제 1 절 연구개발의 목적.....	9
제 2 절 연구개발의 필요성.....	10
1. 기술적 측면.....	10
2. 경제·산업적 측면.....	10
3. 과학적 측면.....	11
4. 사회·문화적 측면.....	11
제 3 절 연구의 내용 및 범위.....	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	13
제 1 절 국외 수준.....	13
제 2 절 국내 수준.....	16
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과.....	17
제 1 절 연구 지역.....	17
제 2 절 재료 및 방법.....	18
1. 시료 전처리 및 외편모조류 시스트 분류·동정.....	18
2. 다변량 통계 분석.....	19
제 3 절 결과.....	21
1. 외편모조류 시스트 종 군집 조성.....	21
2. 외편모조류 시스트 분포 특성.....	24
3. <i>Islandinium minutum</i> subsp. <i>barbatum</i>	27
4. 다변량 통계 분석.....	30
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	33
제 1 절 목표달성도.....	33
제 2 절 관련분야에의 기여도.....	33
제 5 장 연구개발 결과 활용계획.....	34
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	35
제 7 장 참고문헌.....	36

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

최근 지구온난화로 인한 급격한 북극해 환경변화가 심각한 사회·과학적 이슈가 되고 있는 가운데, 북극환경 변화가 향후 지구 생태계에 미칠 영향과 그에 대비한 정책 마련에 대한 관심이 높아지고 있다. 북반구 고위도와 중·저위도 지역 간, 그리고 육상-해양-대기 시스템 간의 복잡한 상호작용은 전 지구 기후 변화의 핵심 축을 이룬다 (IPCC, 2007; Anderson et al., 2008; Hu et al., 2012). 특히, 북반구 고위도 주변 대륙으로부터 북극해로 유입되는 담수량의 변화는 전 지구 열염순환의 변동을 야기하는 주요 요인으로 알려져 있으며, 대륙 주변에 형성된 빙하와 해빙은 주변 해역의 염분 환경에 직접적인 영향을 줌으로써, 외해역과의 해수교환 및 해류운동을 조절하는 요인으로 작용한다 (Aagaard and Carmack, 1994; Stein, 2008). 따라서 북극 기후변화 연구를 통해 도출되는 자료는 북반구 고위도 지역은 물론, 전 지구적 기후변화 기작을 밝히는데 중요한 정보를 제공한다.

반폐쇄적 대륙주변부 환경의 서북극 척치-동시베리아 해역은 빙하와 해빙의 발달과 쇠퇴, 주변 대륙에서 유입되는 담수와 베링해협을 통해 유입되는 북태평양 수괴와 영양염류 변화에 매우 민감하게 반응하는 해역으로 (Aagaard and Carmack, 1989; Hilmer et al., 1998; Marshall and Schott, 1999; Stein, 2008; Darby et al., 2012), 서북극 해역의 표층수 및 중·심층수 순환 및 그에 따른 전 지구 기후환경 변화 기작을 연구할 수 있는 중요한 해역이다 (Woodgate et al., 2005, 2010; Hu et al., 2010, 2012).

과거부터 현재까지의 해양환경 변화가 기록된 해양퇴적물 속 다양한 생물·화학적 성분은 주변 환경에 대한 유용한 정보를 제공한다. 그러나 해양퇴적물의 환경지시자는 서로 다른 환경 요인들 간 상호작용에 의해, 분석자료에서 복잡하게 뒤얽힌 양상을 보인다. 따라서 해양퇴적물을 이용하여 해양 환경변화를 연구하기 위해서는, 특정 환경요인에 대한 신뢰할 만한 잠재적 환경지시자를 개발하는 동시에, 지속적이고 일반화된 방법으로 연구에 활용될 수 있도록 검증하는 작업이 선행되어야 한

다.

해양퇴적물 내 와편모조류 시스트 (dinoflagellate cyst)는 해양 환경지시자로 (Marret et al., 2008; Mertens et al., 2009), 해빙 분포 및 표층 수온이나 염분과 같은 해양표층 환경요인의 변화 과정을 고해상도로 복원하고 분석하는 연구에 활발하게 이용되어왔다 (de Vernal and Hillaire-Marcel, 2000; Ager and Phillips, 2008; Rudenko et al., 2014). 본 과제에서는 쇄빙연구선 아라온을 활용하여 획득한 서북극 적치-동시베리아 해역 표층퇴적물의 와편모조류 시스트 군집 분포와 해양표층 환경요인 간 상호 연관성을 분석하고, 북극해 환경변화 연구를 위한 잠재적 환경지시자를 파악하고자 한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

- 내구성이 매우 강한 불활성 화학성분의 와편모조류 시스트는, 탄산·규산질 미소생물에 비해 고위도 해역 퇴적물에서 산출량 및 다양성이 높기 때문에 북극해 환경변화 연구에 유용한 자료를 도출시킬 수 있는 중요한 잠재적 환경지시자임
- 그러나 해양퇴적물의 와편모조류 시스트를 이용한 북극해 환경변화 연구는 현재까지 매우 부족함
- 따라서 와편모조류 시스트를 이용하여 해양 환경지시자를 개발하고, 북극해 환경변화 연구에 적용하고 검증·평가하는 작업이 필요함

2. 경제·산업적 측면

- 국내·외 여러 대학 및 연구기관에서 북극 환경변화 기작을 이해하기 위한 연구가 수행되어왔으나, 해양퇴적물 내 환경지시자 개발을 통한 다양한 연구접근 방법 마련 및 응용 노력이 요구됨
- 특히 해빙 변화 등 북극 해양표층 환경에 민감한 환경지시자를 연구·개발하고,

개별적으로 수행된 기존 연구 자료를 통합적으로 재분석할 필요가 있음

3. 과학적 측면

- 해양퇴적물 내 환경지시자의 활용이 상대적으로 제한적인 북극에서 와편모조류 시스템을 이용한 환경지시자 개발을 통해, 최근 급격하게 일어나고 있는 북극해 환경변화 양상을 이해할 수 있는 자료 도출이 필요함

4. 사회·문화적 측면

- 해양퇴적물 내 환경지시자 개발을 통한 북극해 환경 변화 연구는 미래 기후 변화 예측을 위해 선행되어야 할 중요한 과학적 과제 중 하나임
- 북극 해양퇴적물의 와편모조류 시스템 환경지시자 개발 연구를 통해 향후 국제공동 연구 과제 개발의 토대 마련

제 3 절 연구의 내용 및 범위

1. 북극 해양퇴적물의 와편모조류 시스템을 이용한 해양 환경변화 연구 자료 수집 및 분석
 - 기존 연구사례 및 관련 문헌 조사를 통한 기초자료 수집
 - 주요 해역의 와편모조류 시스템 분포 및 해양 환경 특성 연구자료 수집 및 분석
2. 해양퇴적물을 이용한 서북극해 와편모조류 시스템의 분포 특성 분석
 - 서북극 척치-동시베리아 해역 해양퇴적물 채취
 - 표준 시료 전처리 기법 및 중 분류·동정법을 이용한 와편모조류 시스템 중 군집 분석 자료 도출
3. 와편모조류 시스템과 해양 표층 환경요인 간 상호연관성 및 잠재적 서북극해 환경지시자 분석

- 다변량 통계 분석을 통해 와편모조류 시스트의 분포 특성과 해양 표층 환경요인 간 상관성 분석



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 수준

국외 주요 연구기관에서는 오래전부터 해양퇴적물을 이용한 환경지시자 개발 연구를 통해, 지화학 성분, 방사성 동위원소, 미화석 등 다양한 잠재적 환경지시자를 적용·검증하는 작업을 진행해왔다. 그 결과, 현재 다양한 환경지시자가 표준·일반화된 연구분석 방법으로 기후환경변화 연구에 활용되고 있다. 특히, 지난 수십 년간 캐나다와 독일을 중심으로 북반구 고위도 해역의 와편모조류 시스트 분포와 해양 표층 환경요인 간의 상관성을 밝히기 위한 연구가 활발히 수행되었다 (e.g. Durantou et al., 2012; de Vernal et al., 2013; Pieńkowski et al., 2016; Zonneveld and Siccha, 2016).

독일의 경우, 알프레드 베게너 연구소 (Alfred-Wegener Institute)와 브레멘 대학 (Bremen University)을 주축으로 전 세계 해역을 대상으로 한 현생 와편모조류 시스트 분포도 구축 작업을 수행해오고 있다. 그 결과, 현재 약 2400 개 연구정점에서 의 와편모조류 시스트 중 군집 분석 자료가 수집되어, 해양표층 환경요인 간 상관성 및 생태 친화도에 대한 연구가 진행 중이다 (Zonneveld 2003, 2013). 또한, 수집된 모든 현생 와편모조류 시스트 분포 자료를 PANGAEA 데이터베이스 (www.pangaea.de)를 통해 제공하고 있다 (그림 1).

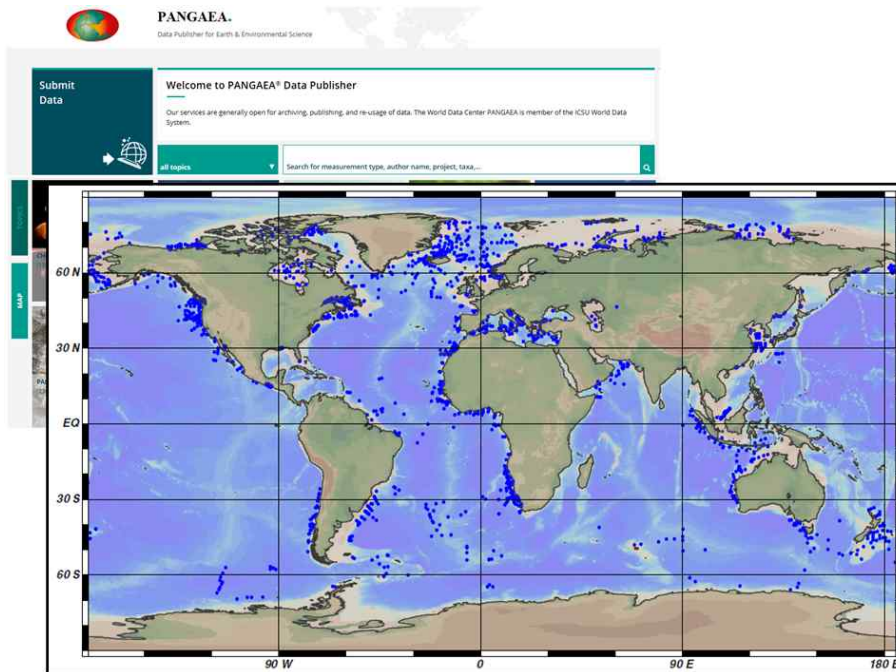


그림 1. 독일 알프레드 베게너 연구소에서 구축·운영 중인 PANGAEA 와편모조류 시스트 데이터베이스

캐나다 GEOTOP 연구소는 동북극해 및 캐나다 해역을 중심으로 해양퇴적물 내 와편모조류 시스트를 이용한 북극해 해양 표층 환경변화 연구를 수행하고 있으며, 북극해 와편모조류 시스트 Atlas 제작을 통해 해양환경변화 및 기후변화 연구에 적극 활용하고 있다 (그림 2).

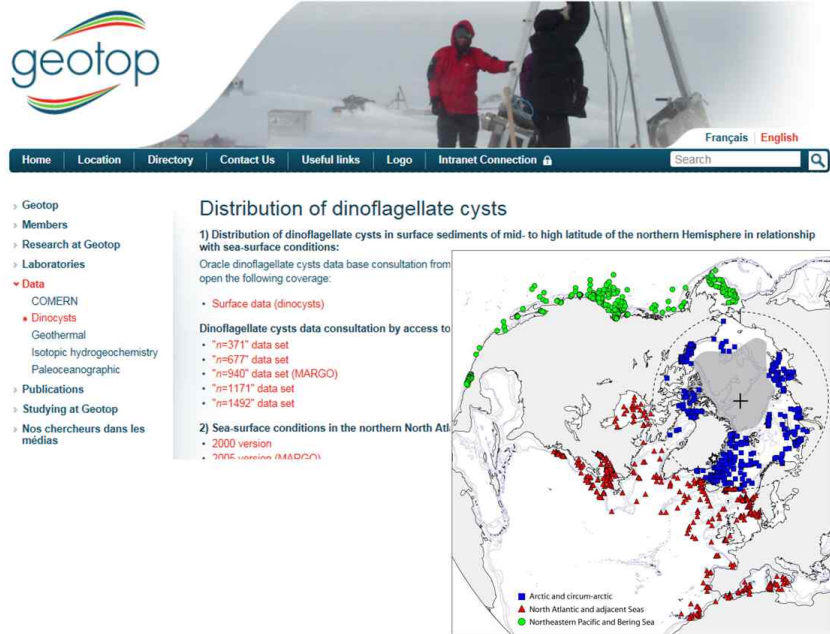


그림 2. 캐나다 GEOTOP 연구소에서 운영 중인 북극해 와편모조류 시스트 데이터베이스

그 결과, 와편모조류 시스트를 환경지시자로 활용한 북극 및 전 지구 기후 변화 기작을 다룬 논문들이 주요 학술지 (Nature, Science 등)에 발표되고 있다 (e.g., de Vernal and Hilaire-Harcel, 2008; Stein et al., 2017; 그림 3)

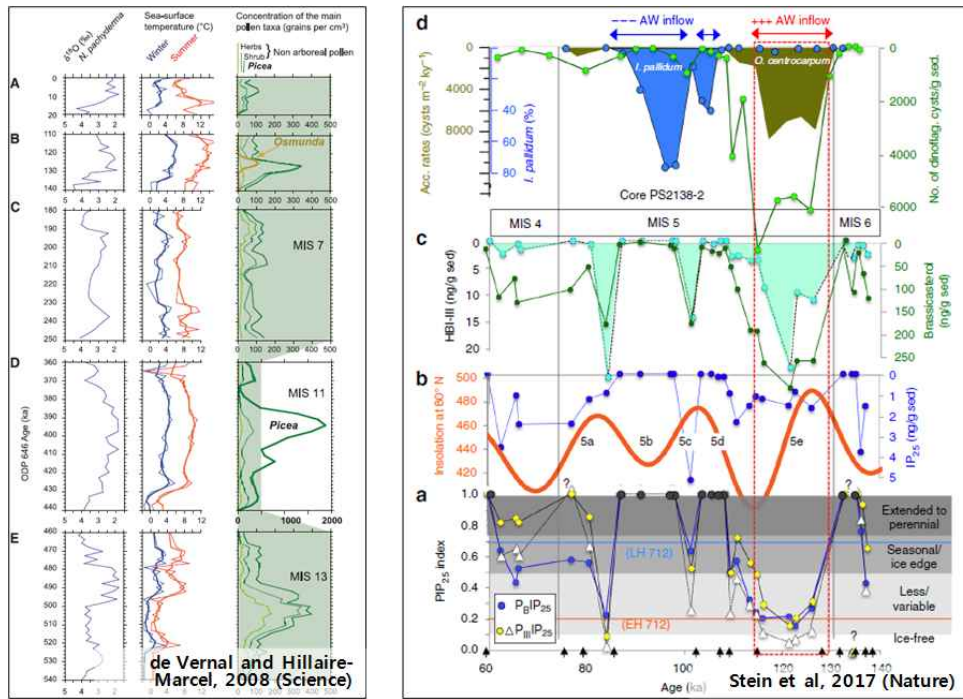


그림 3. 와편모조류 시스트를 환경지시자로 활용한 북극 기후변화 연구

제 2 절 국내 수준

국내에서 해양퇴적물 내 환경지시자를 활용한 북극환경변화 연구는 퇴적학적, 지화학적 성분 중심으로 단편적으로나마 수행된 바 있다 (Park et al., 2014). 그러나 와편모조류 시스트를 환경지시자로 활용한 연구는 거의 전무하다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 연구 지역

연구 해역은 서북극 척치해 대륙붕 및 동시베리아에 위치하고 있다 (Fig. 4). 척치해 대륙붕은 전반적으로 수심이 100m 이하로 얕으며, 베링해협으로부터 비교적 따뜻하고 염분이 낮은 태평양수가 유입되면서 복잡한 해류시스템을 이룬다 (Weingartner et al., 1998, 2005; Winsor and Chapman, 2004; Woodgate et al., 2005). 베링해협을 통해 서북극해로 유입되는 해류는 척치해를 지나 3개의 지류로 나뉘지며, 척치해 대륙붕 경계에서 보퍼트 환류와 만나 상호작용을 한다. 척치-동시베리아 대륙붕 해역은 지구온난화에 따른 전 지구적 기후변화에 가장 민감한 반응을 보이는 해역으로, 현재 북극 온난화의 영향으로 인한 지속적인 수온 상승과 함께 매우 복합적인 물리·화학·생물학적 변화가 일어나는 것으로 알려져 있다.

서북극해 주변 대륙으로부터 유입되는 강수와 상대적으로 염분이 낮은 태평양수의 공급은 척치해의 해빙의 형성과 분포에 중요한 역할을 한다 (Aagaard and Carmack, 1989; Carmack, 2000). 척치해 대륙붕에 분포하는 계절성 해빙의 지속 기간은 6개월에서 12개월이며, 주로 대기-해양 순환에 의해 그 규모와 두께가 결정된다 (Cavalieri and Martin, 1994; Roach et al., 1995). 최근에는 베링해협을 통한 태평양수의 유입이 증가함에 따라, 척치해의 여름철 해빙 면적이 현저하게 북쪽으로 후퇴한 것으로 보고되었다 (Woodgate et al., 2010).

연구해역의 퇴적물은 주로 유콘강 (Yukon River)과 아나다강 (Anadyr River), 그리고 연안침식 작용 기원의 미세한 퇴적입자들이 해류에 의해 베링해 북쪽으로부터 척치해 대륙붕으로 운반되어 형성된다 (e.g. Barnes and Reimnitz, 1974; Viscosi-Shirley et al., 2003). 한편, 알래스카 연안에서 해빙에 의해 연구해역까지 운반되는 퇴적물도 상당량을 차지하는 것으로 알려져 있다 (Darby, 2003; Eicken et al., 2005). 미립자 퇴적물은 저층 침식작용 등에 의해 해저 침하지 (depression), 혹은 대륙사면에 높은 분급도의 실트질 점토로 재분포된다 (Barnes and Reimnitz,

1974; Darby et al., 2009; Wang et al., 2015).

제 2 절 재료 및 방법

본 연구를 위하여 극지연구소 채빙선 ARAON 탐사를 통해 척치해 대륙붕 북부 및 동시베리아 대륙붕 해역에서 멀티코어러 및 박스코어러를 이용하여 총 28개 정점에서 표층 퇴적물 시료를 채취하였다 (Fig. 4).

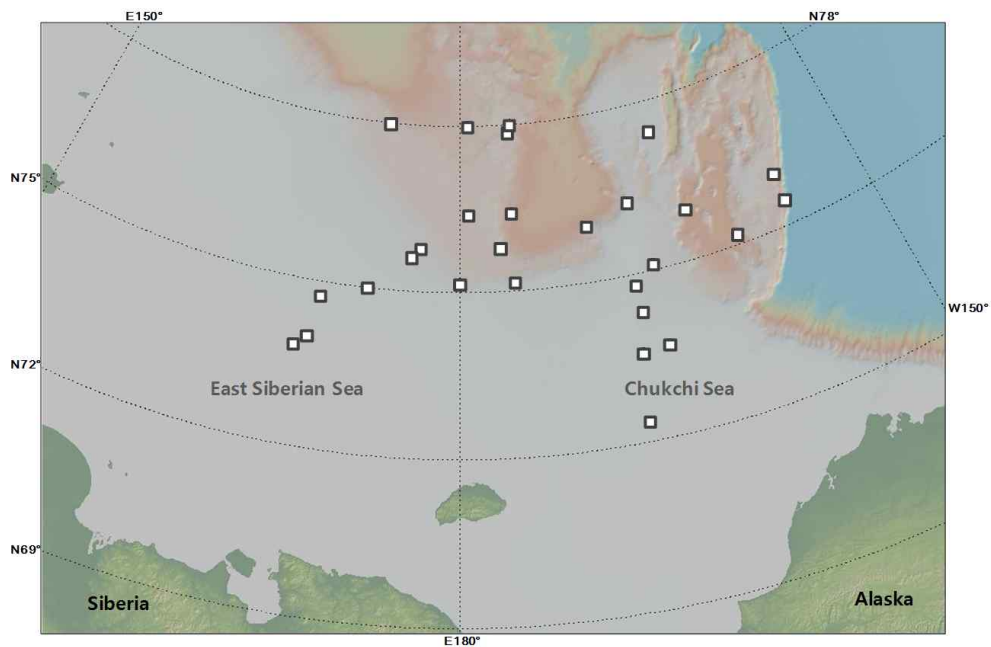


그림 4. 척치-동시베리아 주변 해역의 해양 표층퇴적물 시료 채취 정점도

1. 시료 전처리 및 외편모조류 시스트 분류·동정

외편모조류 시스트 군집 분석을 위해, 코어 시료의 상부 0~1cm를 부시료로 취하여, Stockmarr (1971)의 표지-입자 방법 (marker-grain method)에 따라 다음과 같이 전처리를 하였다. 먼저 탄산질(calcium carbonate)을 제거하기 위해 약 5~15g 무게의 건조된 부시료에 10% 염산(HCl)으로 처리하였다. 탄산질이 녹아있는 시료를 이온교환수로 세척하여 중성화시킨 다음, 규산질을 제거하기 위해 40% 불산(HF)을 넣어 24 시간 동안 처리하였다. 이 시료를 다시 이온교환수로 세척하여 중

성화시킨 다음, 10 μm 크기의 그물체(mesh sieve)로 걸러내었다. 이온교환수를 이용하여 체에 남아 있는 입자를 플라스틱 튜브에 옮겨 담은 후, 2~3 방울의 페놀을 첨가하였다. 각 현미경 시료를 잘 섞이게 한 다음, 일부를 취하여 glycerine jelly와 paraffin wax를 이용하여 현미경 슬라이드를 만들어 현미경으로 분석하였다. 그리고 Carl Zeiss (GmbH) 현미경을 이용하여 400과 1000 배율 하에서 와편모조류 시스트를 분석하였다. 분석한 퇴적물 시료 속 와편모조류 시스트의 농도(cysts/g, 건조 퇴적물 1g 당 시스트 개체수)는, *Lycopodium clavatum* 정제를 각 시료에 한 알씩 첨가하여 현미경 관찰 시 와편모조류 시스트와 함께 계수한 후, 결과 값의 상대적 비율을 이용하여 계산하였다. 시료 당 와편모조류 시스트 농도는 건조 퇴적물 1g 중 시스트 수(cysts/g)로 나타내었다. 와편모조류 시스트 종의 명명법은 Rochon et al. (1999), Head et al. (2001), Radi et al. (2001), de Vernal et al. (2001), Eric et al. (2018)을 따랐다.

2. 다변량 통계 분석

와편모조류 시스트 군집 분포와 해양 표층 환경 변수 간의 상관성을 알아보기 위하여, 다변량 통계 분석을 수행하였다. 다변량 통계 처리에 필요한 해양·해빙 관측 및 해양 기초생산력 측정자료는 World Ocean Atlas 2013-Version 2 (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13>)과 National Snow and Ice Data Center (<http://nsidc.org/data>)와 MODIS R2018 (Behrenfeld and Falkowski, 1997; <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>)로부터 각각 제공 받았으며, 연구 정점으로부터 반경 30 혹은 60 해리 내 포함되는 관측자료를 추출하여 분석에 이용하였다. 응용프로그램으로는 윈도우용 CANOCO5 프로그램 (Canonical Community Ordination: version 5 for Windows, Ter Braak and Šmilauer, 2002)을 이용하여 와편모조류 시스트 군집 조성 및 해양 환경요인에 대한 다변량 통계분석을 수행하였다. 데이터 유형에 적합한 통계 처리 기술을 파악하기 위해 데이터를 사전 분석하기 전, 먼저 다음과 같은 방법으로 데이터 변환 처리를 하였다. 로그변환 시 소수점 값을 피하기 위하여, 와편모조류 시스트 총 개체수 합계에 대한 각 종의 산출비를 천분율 값으로 변환하였다. '0' 이상의 데이터 값만 얻기 위하여, 각 종의 천분율 값에 '1'을 더하였다. 그 다음, 공백값 (=1)과 존재값 (<

5)을 구별하기 위하여, 산출비값이 2~5 범위인 경우, '5'를 더하였다. 연구해역 외편 모조류 시스트 군집 분포 유형을 판단하기 위해 수행한 Detrended Correspondence Analysis (DCA) 분석 결과에 따라, 자료변동을 변수들의 선형결합들로 이뤄진 새로운 변수로 표현해내는 주성분 분석 (Principal component analysis: PCA)을 이용하였다. 통계분석에 이용된 해양환경변수는 해빙, 질산염, 인산염, 규산염, 표층 염분 (2월, 8월), 표층 온도 (2월, 8월), 해양기초생산성 (6월, 8월), 경도값이다. 통계분석에 이용된 외편모조류 시스트 종 목록은 표 1에 나타내었다.

표 1. 척치-동시베리아 해역에서 관찰된 외편모조류 시스트 종 목록

Taxa name	Code	Notes
<i>Alexandrium</i> spp.	Alex	
<i>Pentapharsodinium dalei</i>	Pdal	
<i>Operculodinium centrocarpum</i>	Ocen	
<i>Operculodinium centrocarpum</i> -Arctic morphotype	Oarc	
<i>Bitectatodinium tepikiense</i>	Btep	
<i>Spiniferites bulloideus</i>	Sbul	Grouped with <i>Spiniferites</i> spp.
<i>Spiniferites bentori</i>	Sben	Grouped with <i>Spiniferites</i> spp.
<i>Spiniferites elongatus</i>	Selo	
<i>Spiniferites mirabilis</i>	Smir	Grouped with <i>Spiniferites</i> spp.
<i>Spiniferites membranaceus</i>	Smem	Grouped with <i>Spiniferites</i> spp.
<i>Spiniferites</i> spp.	Sspp	Grouped with <i>Spiniferites</i> spp.
<i>Nematosphaeropsis labyrinthus</i>	Nlab	
<i>Impagidinium sphaericum</i>	Isph	Grouped with <i>Impagidinium</i> spp.
<i>Impagidinium pallidum</i>	Ipal	Grouped with <i>Impagidinium</i> spp.
<i>Impagidinium</i> spp	I spp	Grouped with <i>Impagidinium</i> spp.
<i>Brigantedinium</i> spp	Bspp	
<i>Echinidinium karaense</i>	Ekar	
<i>Islandinium brevispinosum</i>	Ibre	
<i>Islandinium cezare</i>	Icez	
<i>Islandinium cezare</i> -morphotype1	Icezm1	
<i>Islandinium minutum</i>	Imin	
<i>Islandinium barbatum</i>	Ibar	
Unidentified Round Brown Spiny Cysts	RBSC	
<i>Polykrikos</i> sp. Arctic morphotype	Parc	
<i>Polykrikos kofoidii</i>	Pkof	
<i>Polykrikos schwartzii</i>	Psch	
<i>Protoperidinium americanum</i>	Pame	
<i>Selenopemphix quanta</i>	Squa	
<i>Selenopemphix nephroides</i>	Snep	
<i>Trinovantedinium applanatum</i>	Tapp	

제 3 절 결과

1. 와편모조류 시스트 중 군집 조성

연구해역의 표층 퇴적물에서는 총 14속 29종의 와편모조류 시스트가 관찰되었다 (Fig. 5, 6). 와편모조류 시스트는 gonyaulacoid 그룹 6속 14종, protopteridinioid 그룹 7속 12종, gymnodinioid 그룹 1속 3종이 동정되었다. Gonyaulacoid에 속하는 종은 독립영양종이며, *Pentapharsodinium dalei* 종을 제외한 protopteridinioid와 gymnodinioid 그룹에 속하는 종은 모두 종속영양종이다. 본 조사에서는 주로 gonyaulacoid와 protopteridinioid 그룹이 모든 정점에서 우세하는 양상을 보였다(Fig. 7). Gonyaulacoid 그룹이 전반적으로 우점하는 척치해 대륙붕 해역에서는 *P. dalei*, *O. centrocarpum*, *O. centrocarpum* Arctic morphotype, *S. elongatus* 종의 농도가 높았다 (Fig. 8). 특히 *P. dalei*의 경우, 척치해 북동부 대륙붕 해역에 위치한 조사 정점에서 전체 와편모조류 시스트 군집 중 70% 이상의 높은 산출빈도를 보였다.

극지연구소

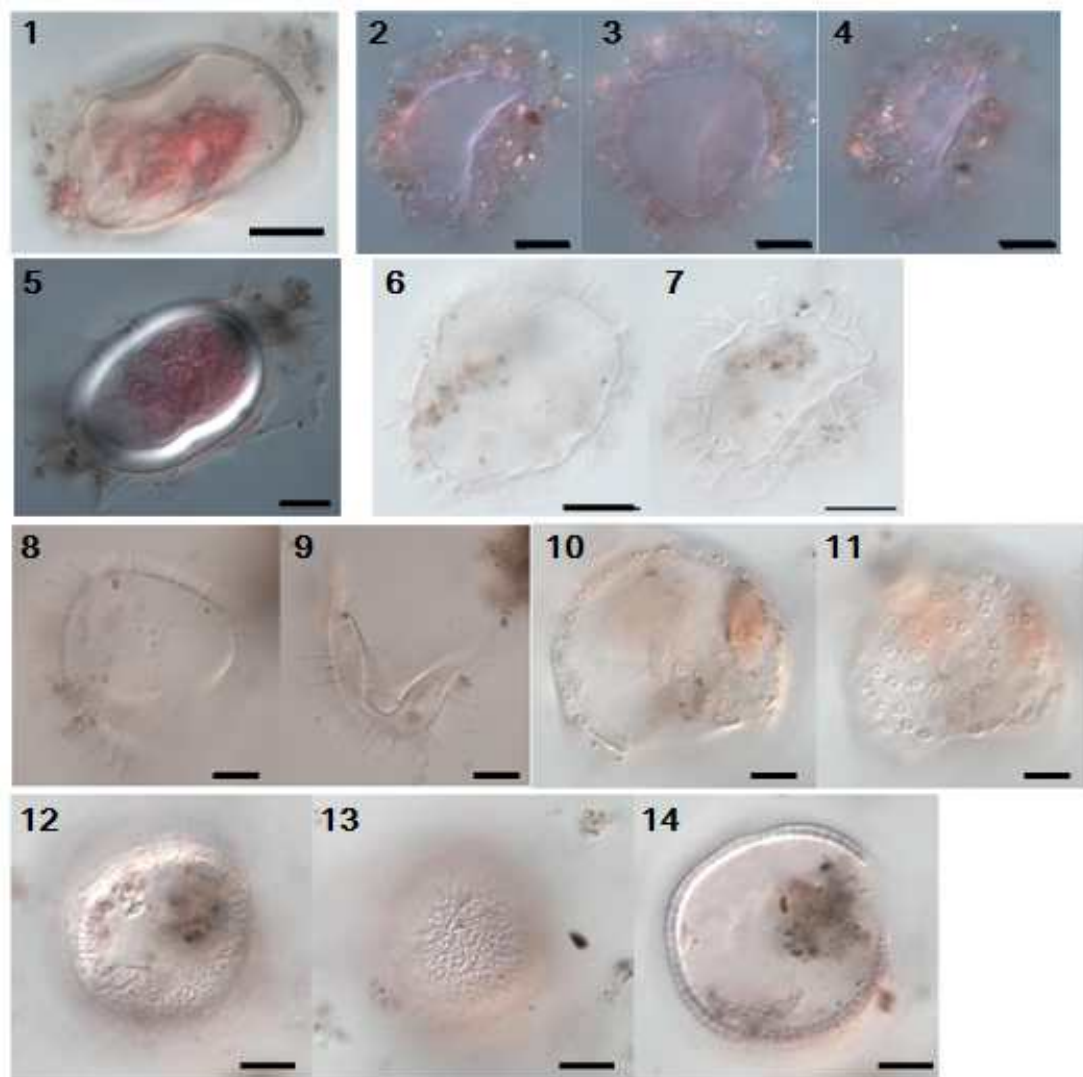


그림 5. 1) *Alexandrium* spp., 2-4) *Pentapharsodinium dalei*, 5) *Spiniferites elongatus*, 6-7) *Nemosphaeropsis labyrinthus*, 8-9) *Operculodinium centrocarpum*, 10-11) *Operculodinium centrocarpum*-Arctic morphotype, 12-14) *Bitectatodinium tepikiense* (Scale bar = 10 μ m)

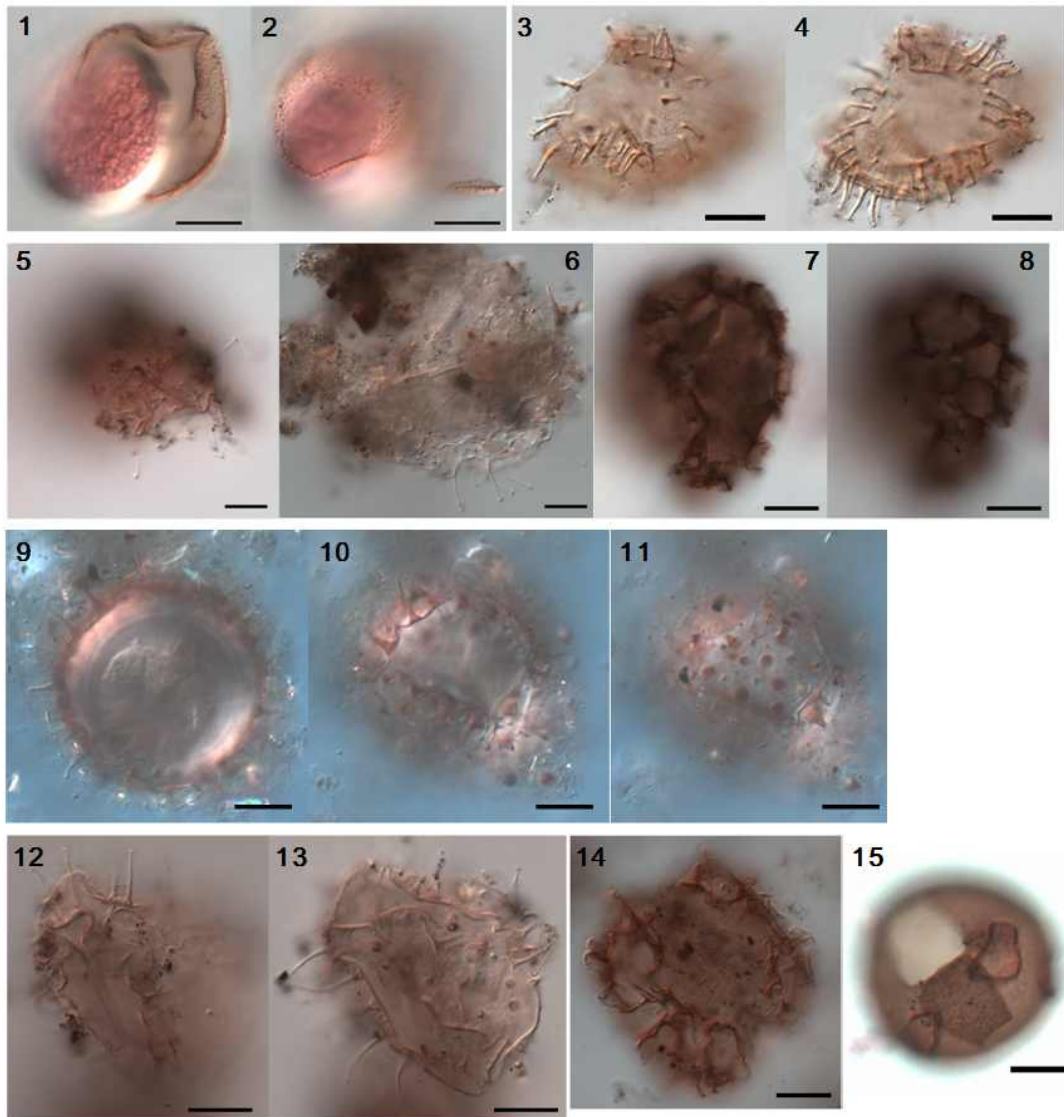


그림 6. 1-2) *Islandinium brevispinosum*, 3-4) *Islandinium cezare*, 5-6) *Islandinium cezare* morphotype 1, 7-8) *Polykrikos schwartzii*, 9-11) *Echinidinium karaense*, 12-13) *Islandinium barbatum*, 14) *Polykrikos* sp. Arctic morphotype, 15) *Brigantedinium* spp. (Scale bar = 10 μ m)

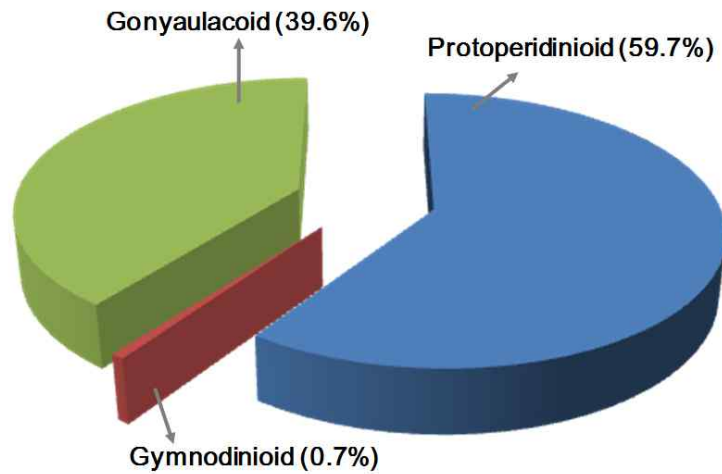


그림 7. 척치-동시베리아 해역 퇴적물의 주요 와편모조류 시스트 그룹의 상대적 산출빈도

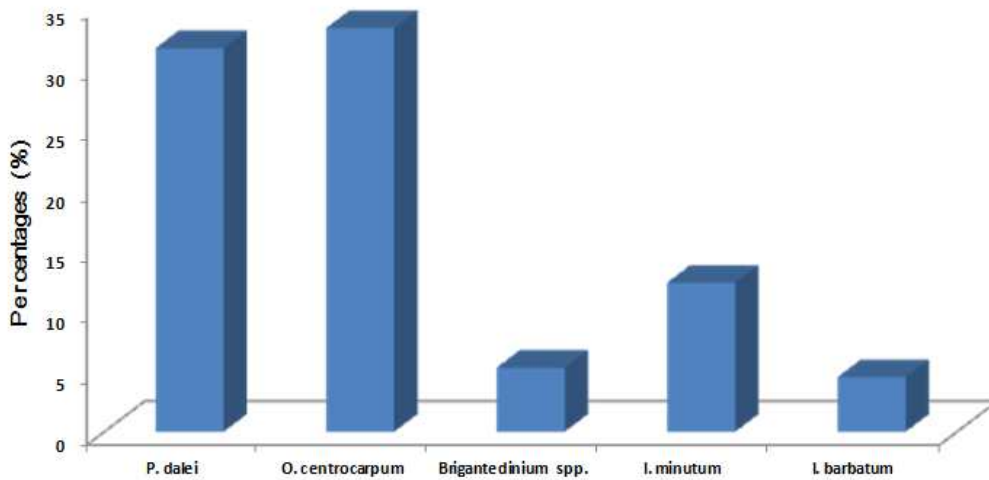


그림 8. 척치-동시베리아 해역 표층퇴적물의 주요 와편모조류 시스트 종의 상대적 산출빈도

2. 와편모조류 시스트 분포 특성

척치-동시베리아 주변 해역 표층퇴적물의 와편모조류 시스트 농도는 104~4,982 cysts/g의 범위로 조사정점에 따라 큰 변동 폭을 보였으며, 전반적으로 수심이 얇은 대륙붕 해역에 해당하는 정점에서 밀집되어 집적된 양상을 나타냈다(Fig. 9). 주요

와편모조류 시스트 그룹의 상대적 산출비율을 비교하였을 때, 독립영양종 그룹은 척치 대륙붕 해역에, 종속영양종 그룹은 동시베리아 대륙붕 해역에 상대적으로 더 높게 분포하는 양상이 관찰되었다(Fig. 10). 독립영양종 그룹이 전반적으로 우점하는 척치해 대륙붕 해역에서는 *P. dalei*, *O. centrocarpum*, *O. centrocarpum*-Arctic morphotype, *S. elongatus* 종의 농도가 높았다 (Fig. 11). 특히 *P. dalei*의 경우, 척치해 북동부 대륙붕 해역에 위치한 조사정점에서 전체 와편모조류 시스트 군집 중 70% 이상의 높은 산출빈도를 보였다. 이와 같이, 대륙주변부의 수심이 얇은 해역의 퇴적물에서 와편모조류 시스트 군집이 종속영양종 그룹으로 우점하는 현상은 북대서양 및 북태평양의 연구에서도 보고된 바 있다 (Novichkova and Polyakova, 2007; Radi et al., 2007). 기존 연구에 따르면, 대륙붕 해역 퇴적물의 와편모조류 시스트 군집은 영양염 조성 환경과 밀접한 상관이 있으므로, 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다 (Kim et al., 2012).

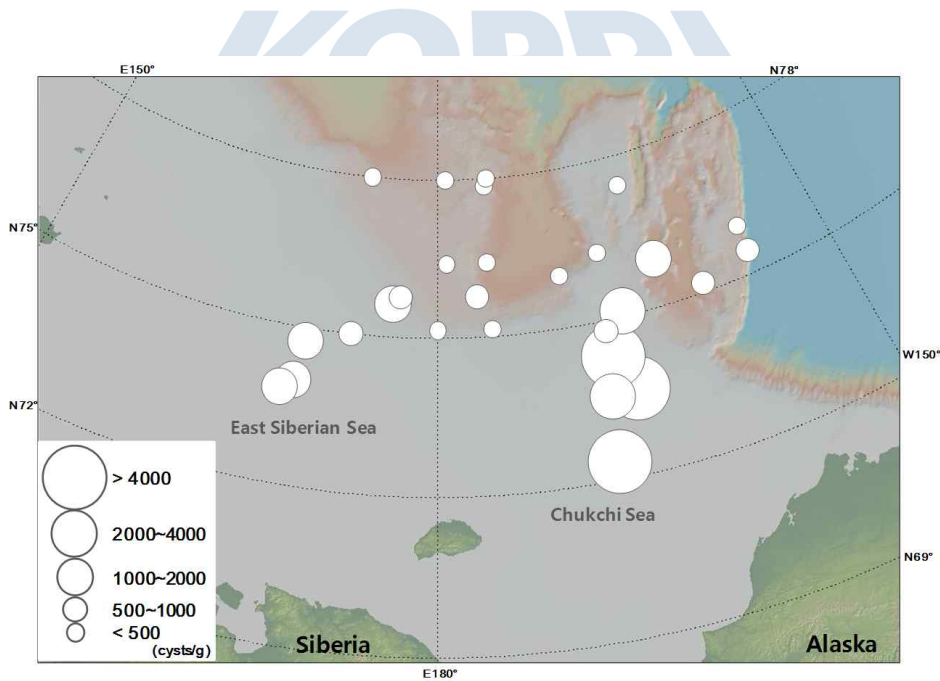


그림 9. 척치-동시베리아 해역 표층퇴적물 와편모조류 시스트의 총 농도 분포

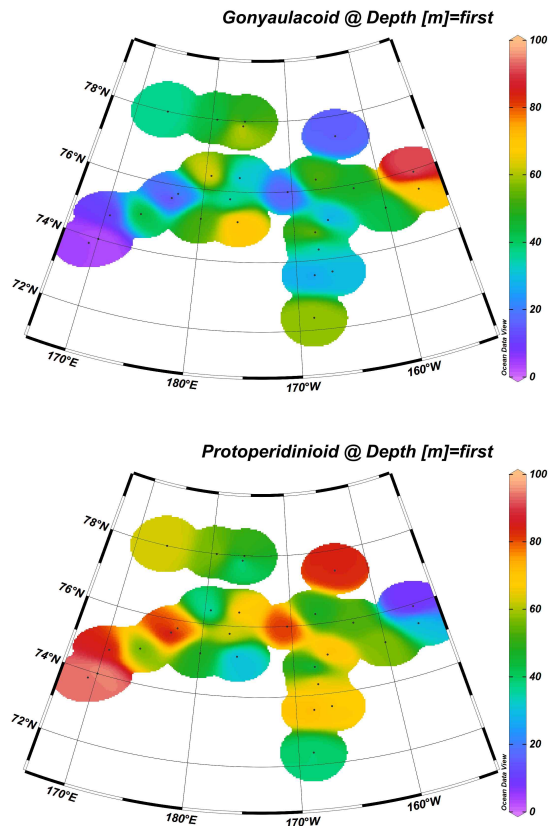


그림 10. 척치-동시베리아 해역의 와편모조류 시스트 gonyaulacoid 그룹과 protoperidinioid 그룹의 산출빈도

대표 우점종인 *P. dalei*는 3~2,980 cysts/g의 농도로 분포하였다. *O. centrocarpum*은 11~1911 cysts/g의 범위로, *I. minutum*은 0~1,098 cysts/g, *Brigantedinium* spp.은 0~1,035 cysts/g의 농도로 분포하였다 (Fig. 11).

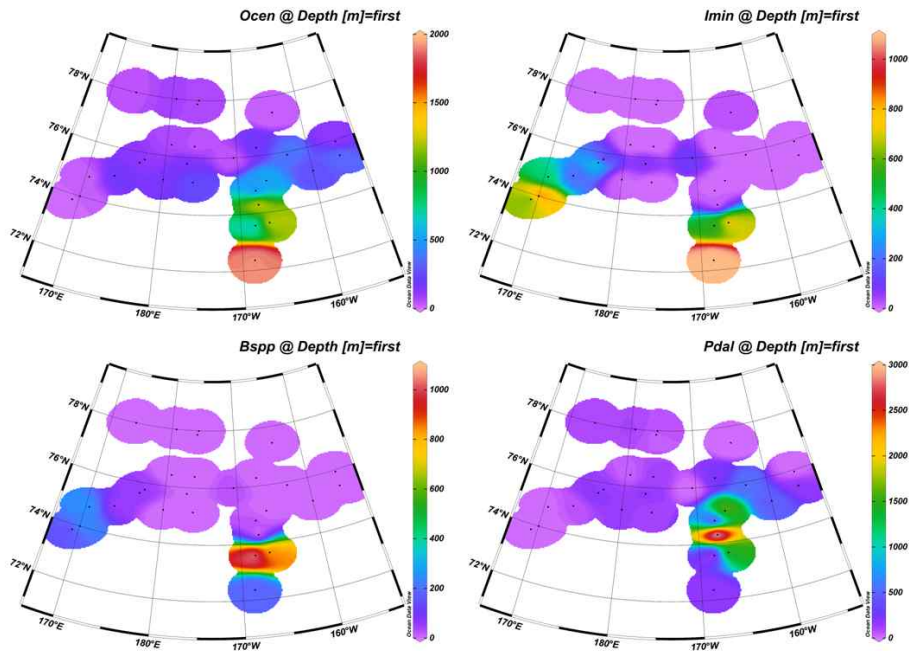


그림 11. 척치-동시베리아 해역 표층퇴적물의 주요 외편모조류 시스트 농도 분포

3. 동시베리아 대륙붕 퇴적물의 *Islandinium minutum* subsp. *barbatum*

외편모조류 시스트 중 ‘Round brown spiny cysts (RBSC)’ 군집은 북반구 다양한 해양환경(석호, 하구역, 연안 용승역 등)에서 관찰된다. 그러나 중·저위도 해역에서 RBSC 군집이 총 외편모조류 시스트 산출량의 55%를 초과하는 경우는 매우 드물다 (Bouimetarhan et al. 2009; Czarnecki et al. 2014; Holzwarth et al. 2010; Krepakevich and Pospelova 2010; Limoges et al. 2010; Miller et al. 2013; Pospelova and Kim 2010; Pospelova et al. 2004, 2005, 2008; Radi and de Vernal 2004; Vasquez-Bedoya et al. 2008; Zonneveld et al. 2009). 반면, 북극 및 아북극의 많은 해역에서 RBSC 외편모조류 시스트는 총 산출량의 55%를 상회하여 관찰된다 (Rochon et al. 1999; Kunz-Pirrung 2001; Mudie and Rochon 2001; Hamel et al. 2002; Bonnet et al. 2010, 2012; Ouellet-Bernier et al. 2014; Richerol et al. 2014; Gibb et al. 2015; Van Nieuwenhove et al. 2016). 북극해 해양퇴적물에서 가장 많이 산출되는 RBSC 군 외편모조류 시스트는 *Islandinium minutum*, *Islandinium? cezare* sensu lato, *Echinidinium karaense* 이다. *I. minutum*은 북극에 광범위하게 분포하며, 해역에 따라 전체 산출량의 최대 97%를 차지하기도 한다. *Islandinium?*

cezare sensu lato 는 White 해, Barents 해, Laptev 해에서 최대 32%의 산출량으로 관찰된다 (de Vernal et al. 2013c; GEOTOP database; Zonneveld et al. 2013). 상대적으로 산출량이 적은 *Echinidinium karaense*는 Beaufort 해에서 전체 군집의 8.5%의 산출비율로 관찰되었으며 (de Vernal et al. 2013c; GEOTOP database; Zonneveld et al. 2013), Laptev 해에서 최대 45%의 산출비율로 보고된 바 있다 (Kunz-Pirrung 1998). 한편, *I. minutum*과 *E. karaense*와 비교했을 때, *Islandinium? cezare* s.l.는 형태학적 분류가 어려운 종으로 알려져 있다. Head et al. (2001)에 따르면, Kara 해의 *Islandinium? cezare* s.l. 종은 형태학적 차이에 따라 두 개의 형태형으로 나뉜다. 형태형 1은 가시 (barb) 없는 돌기에 끝이 말린 평평한 말단을 가졌으며, 줄기의 두께가 일정하다 (그림 12). 형태형 1과 마찬가지로, 형태형 2도 돌기의 말단이 평평하고 끝이 말려 있으나, 돌기의 줄기가 말단으로 갈수록 가늘어지며 작은 가시가 관찰된다는 차이가 있다 (Head et al. 2001). 그러나 기존 연구 사례가 드물고, 발아공의 관찰이 어려운 점 때문에, 형태형 2의 분류학적 정립은 최근까지도 이뤄지지 않았다. 그러나, *Islandinium? cezare* s.l. 종의 분포는 해빙환경과 높은 상관성을 보이므로 (de Vernal et al. 2013c; GEOTOP database), *Islandinium? cezare* s.l. 형태형 1과 2에 대한 정확한 분류학적 조사 및 해양환경 지시자로서의 유용성 평가가 중요하다. 이와 관련하여, 최근 서북극해 해양퇴적물의 *Islandinium? cezare* s.l. 형태형 2에 대한 형태 및 유전적 특성에 대한 연구가 이뤄져, *Islandinium minutum* subsp. *barbatum*으로 명명되었다 (Eric et al., 2018). 본 연구에서 *Islandinium minutum* subsp. *barbatum* 의 산출비율은 0~30.8%이며, 농도는 0~451 cyst/g 범위로 분포하였다 (그림 13).

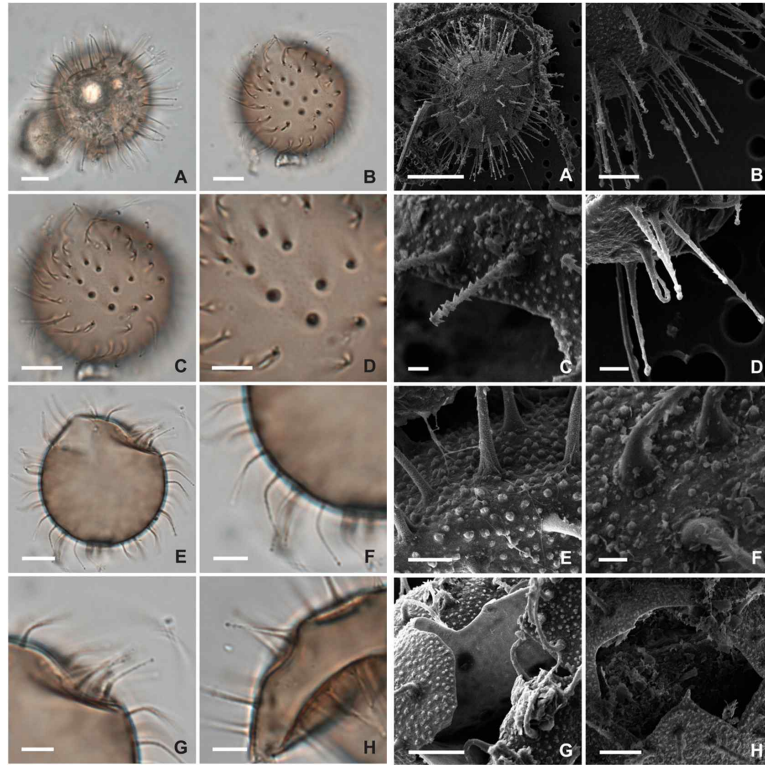


그림 12. 동시베리아 해역 표층퇴적물에서 높은 산출량을 보인 *Islandinium minutum* subsp. *barbatum*의 광학 및 주사전자 현미경 촬영 이미지 (Eric et al., 2018)

극지연구소

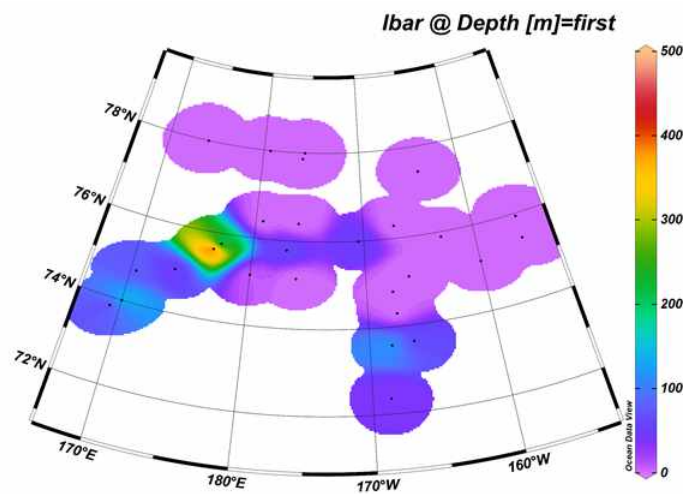


그림 13. 연구 해역 표층퇴적물에서의 *Islandinium minutum* subsp. *barbatum* 분포

4. 다변량 통계 분석

북극해 해양퇴적물에 쌓은 와편모조류 시스트는 해빙, 해양생산성, 염분, 수온 등의 다양한 해양 표층환경 요인과 밀접한 연관성을 보인다. 이와 관련하여, 다변량 통계 기법은 해양표층 퇴적물 와편모조류 시스트 분포 유형과 다양한 해양 표층환경 변수 간의 상관성을 파악하는데 유용한 것으로 알려져 있다. 특히, Principal component analysis (PCA)는 다변량 자료의 변동 양상을 변수들의 선형결합들로 이루어진 새로운 변수로 나타내는 방식으로, 종 군집 조성의 가장 큰 변동을 야기하는 알려지지 않은 이론상의 환경 gradient와 두 번째로 큰 변동을 야기하는 환경 gradient를 각각 1축과 2축에 나타내는 indirect gradient analysis이다. 본 연구에서는 PCA 분석을 위해, 주요 와편모조류 시스트 16개 종 및 11개 해양표층환경 변수를 사용하였다. 분석 결과, 1성분은 68.05%의 설명력을 가지고 있으며, 2성분은 9.94%, 3성분은 5.99%, 그리고 4성분은 5.99%의 설명력이 있는 성분으로 추출되었다.

그림 14~16은 1성분과 2성분으로 산포도를 작성한 결과로, 가로축은 1성분, 세로축은 2성분을 나타낸다. 성분 분석결과, 와편모조류 시스트 종에 따라 산포도에서 뚜렷한 분포 차이를 보여, 서로 다른 환경 친화도를 갖고 있는 것으로 파악되었다. *Alexandrium* spp.를 제외한 모든 독립영양종 와편모조류 시스트는 산포도 왼쪽 영역에 분포하였으며, PCA 가로축 (1성분)에 대하여 음의 부하량을 나타냈다. 특히, 우점종인 *O. centrocarpum* s.l., *P. dalei*, *S. elongatus*는 PCA 가로축 (1성분)과 세로축 (2성분) 양 축에 대하여 높은 음의 부하량을 보였다. 이와 반대로, 종속영양종 와편모조류 시스트는 PCA 가로축 (1성분)에 대하여 모두 양의 부하량을 나타냈으나, 세로축 (2성분)에 대하여 다양한 분포를 보였다. 종속영양종 중에서 우점종인 *I. minutum*과 *I. barbatum*은 2성분에 대하여 가장 높은 음의 값을 나타냈으며, *E. karaense*와 *I. cezare* s.l.는 2성분에 대하여 가장 높은 양의 값을 보였다 (그림 14).

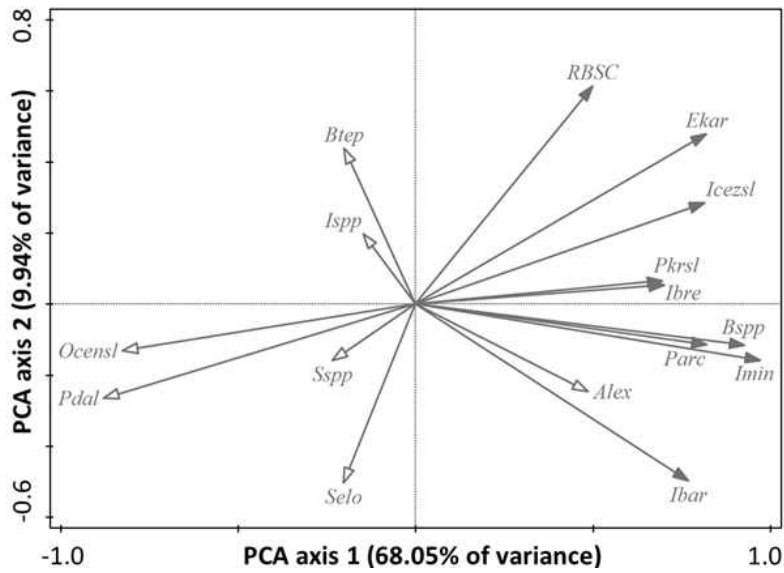


그림 14. 척치-동시베리아해 와편모조류 시스트의 PCA 1성분과 2성분에 대한 산포도 (white arrow = 독립영양종; black arrow = 종속영양종)

그림 15는 1성분과 2성분에 대한 11개 해양환경 변수의 산포도를 나타낸다. PCA 가로축 (1성분)은 해양생산성 (6월) 및 염분 (8월)에 대해 음의 상관관계를 보이는 반면, 규산염, 해양생산성 (8월), 경도값에 대해 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 세로축 (2성분)은 해빙과 해양생산성 (6월)을 제외한 모든 환경변수에 대하여 음의 상관관계를 보였다.

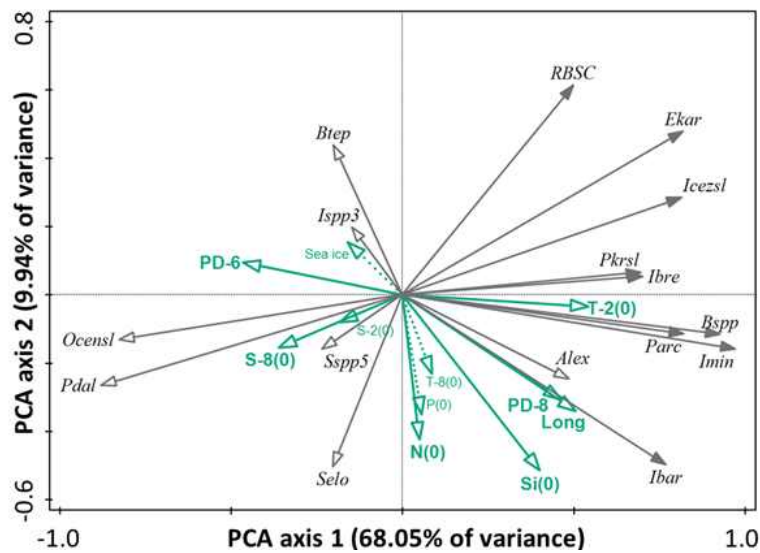


그림 15. 척치-동시베리아 해역의 주요 와편모조류 시스트 분석 자료 및 해양 표층 환경 관측 자료에 대한 PCA 1성분과 2성분에 대한 산포도

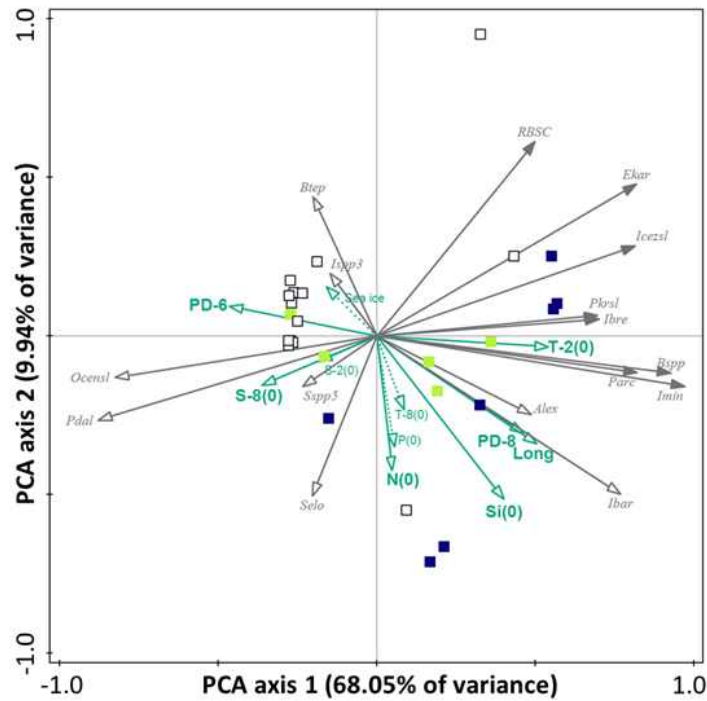


그림 16. 척치-동시베리아 해역의 주요 외편모조류 시스트 분석 자료, 해양 표층 환경 관측 자료, 시료 채집 정점 자료에 대한 PCA 1성분과 2성분에 대한 산포도

극지연구소

종합하면, 본 연구에서 서북극 해역 해양퇴적물 중의 외편모조류 시스트 군집 조성은 척치해 대륙붕과 동시베리아해 대륙붕 간 뚜렷한 차이를 보였다. 척치해 대륙붕에서 우점하는 군집 (*P. dalei*, *O. centrocarpum* s.l.)과 동시베리아해 대륙붕에서 우점하는 군집 (*I. barbatum*, *I. minutum*, *E. karaense*, *I. cezare* s.l.)은 통계상으로 거리가 멀게 나타났다. 11개 해양환경변수와의 상관관계를 분석한 결과, 척치해 대륙붕에서 크게 우점하는 *P. dalei*, *O. centrocarpum* s.l.는 6월 해양생산성과 8월 염분과 상관이 높았으며, 동시베리아해 대륙붕에서 우점하는 *I. minutum*과 *I. barbatum*은 8월 생산성과 규산염 농도와 강한 상관을 가지는 것으로 나타났다. 향후, 이들 해양환경 변수에 대한 통계 평가 확인 및 신뢰도 향상을 위하여, 연구해역의 외편모조류 시스트 중 군집 특성자료의 축적이 더욱 필요할 것으로 판단된다.

제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표달성도

- 기존 수행된 북극해 주요 해역의 외편모조류 시스트 군집 종 조성 및 분포, 환경지시자 개발 기초 연구자료를 수집하고, 현재까지의 연구 결과 및 동향을 파악함
- 캐나다 GEOTOP 연구소의 북극해 외편모조류 시스트 데이터베이스 구축 작업 기준에 따른 표준 시료전처리 및 종 분류·동정 기법을 이용, 외편모조류 시스트 종 조성 자료 및 분포도를 도출함
- 척치-동시베리아 주변 해역의 외편모조류 시스트 표층 분포도를 분석한 결과, 수심이 얕은 대륙붕 환경에서의 높은 산출량 및 독립-종속영양종 간 대비 양상을 관찰함
- 다변량 통계분석을 수행한 결과, 표층 분포도에서 관찰된 척치-동시베리아 해역 외편모조류 시스트 군집 간 대비 양상이, 종 조성 및 환경요인의 통계적 상관성에도 나타남을 확인함

제 2 절 관련분야에의 기여도

- 북극 해양퇴적물을 이용한 환경지시자 개발 연구를 통해 향후 서북극해 기후환경 장기변동 연구를 위한 기초자료 제공
- 환경지시자로서 해양 외편모조류 시스트 분석 기법을 제시하고, 북극 해양환경 변화를 이해하기 위한 표준화된 연구방법 정립 기반 마련
- 현재 가장 심각한 국제적 현안 중 하나인 인간활동 및 지구온난화에 따른 서북극해 기후환경의 장기변동 및 상호작용을 이해하는데 중요한 기초자료 제공
- 해양퇴적물을 이용한 환경지시자 개발 연구 자료는 향후 과거, 현재, 미래의 기후를 모델링하는데 있어 중요한 기초 정보로 활용 가능

제 5 장 연구개발 결과 활용계획

- 북반구 고위도 외편모조류 시스트 표준 데이터베이스 구축 작업 및 북극 과거 해양환경 변화 복원 연구를 위한 기초자료 제공
- 북극해 기후환경 변동 정량화 기법 개발을 위한 미화석학적 연구접근 방식 제안
- 향후 북극 해양·육상 환경변화 상호 작용 및 전 지구 기후변동 기작 규명 연구에 중요한 기초 자료 제공



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 전 지구 해양 와편모조류 시스트 분포도 구축 프로젝트 (PANGEA: DINO-ATLAS)의 핵심 참여자이자, 와편모조류 시스트를 이용한 기후변화 복원 연구 전문가인 영국 리버풀 대학의 Fabienne Marret 교수와의 협업을 통해, 다변량 통계분석 처리기법 및 자료 해석 기술 습득 (연구 결과를 활용한 공동논문 작성 추진 중)
- 해양퇴적물의 미화석을 환경지시자로 활용한 기후변화 복원 연구 분야에서 활발히 활동 중인 독일 브레멘 대학의 Sebastian Hötzel 박사로부터 통계분석에 필요한 해양 표층환경 관측자료 확보



제 7 장 참고문헌

- Aagaard K, Carmack EC. 1989. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research*, 94(C10):14485 - 14498.
- Barnes PW, Reimnitz E. 1974. Sedimentary processes on arctic shelves off the northern coast of Alaska. In: Reed JC and Sater JE (eds) *The Coast and Shelf of the Beaufort Sea*. Arlington, VA: Arctic Institute of North America, pp. 439-476.
- Behrenfeld MJ, Falkowski PG. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42:1-20.
- Bonnet S, de Vernal A, Hillaire-Marcel C, Radi T, Husum K. 2010. Variability of sea-surface temperature and sea-ice cover in the Fram Strait over the last two millennia. *Marine Micropaleontology*, 74:59-74.
- Bonnet S, de Vernal A, Gersonde R, Lembke-Jene L. 2012. Modern distribution of dinocysts from the North Pacific Ocean (37-64°N, 144°E - 148°W) in relation to hydrographic conditions, sea-ice and productivity. *Marine Micropaleontology*, 84-85:87-113.
- Bouimetarhan I, Marret F, Dupont L, Zonneveld K. 2009. Dinoflagellate cyst distribution in marine surface sediments off West Africa (17 - -6°N) in relation to sea-surface conditions, freshwater input and seasonal coastal upwelling. *Marine Micropaleontology*, 71:113-130.
- Carmack EC. 2000. The Arctic Ocean's freshwater budget: Sources, storage and export. In: Lewis EL, Jones EP, Lemke P, et al. (eds) *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. New York: Springer, pp. 91-126.
- Cavalieri DJ, Martin S. 1994. The contribution of Alaskan, Siberian and Canadian coastal polynyas to the halocline layer of the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 99(C9):18343-18362.
- Czarnecki JM, Dashtgard SE, Pospelova V, Mathewes RW, MacEachern JA. 2014. Palynology and geochemistry of channel-margin sediments across the

- tidal-fluvial transition, lower Fraser River, Canada: implications for the rock record. *Marine Petroleum Geology*, 51:152–166.
- Darby DA. 2003. Sources of sediment found in sea ice from the western Arctic Ocean, new insights into processes of entrainment and drift patterns. *Journal of Geophysical Research*, 108(C8):3257.
- Darby DA, Ortiz JD, Polyak L et al. 2009. The role of currents and sea ice in both slowly deposited central Arctic and rapidly deposited Chukchi - Alaskan margin sediments. *Global and Planetary Change*, 68:58–72.
- de Vernal A, Henry M, Matthiessen J, Mudie PJ, Rochon A, Boessenkool K, Eynaud F, Grøsfjeld K, Guiot J, Hamel D, Harland R, Head MJ, Kunz-pirrung M, Levac E, Loucheur V, Peyron O, Pospelova V, Radi T, Turon JL, Voronina E. 2001. Dinoflagellate cyst assemblages as tracers of sea-surface conditions in the northern North Atlantic, Arctic and sub-arctic seas: the new “n=677” database and application for quantitative paleoceanographical reconstruction. *Journal of Quaternary Science*, 16:681–99.
- de Vernal A, Hilaire-Marcel C. 2008. Natural variability of Greenland climate, vegetation, and ice volume during the past million years. *Science*, 320(5883):1622–1625.
- de Vernal A, Hillaire-Marcel C, Rochon A, Fréchette B, Henry M, Solignac S, Bonnet S. 2013a. Dinocyst-based reconstructions of sea ice cover concentration during the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North Atlantic Ocean and its adjacent seas. *Quaternary Science Reviews*, 79:111–121
- de Vernal A, Rochon A, Fréchette B, Henry M, Radi T, Solignac S. 2013b. Reconstructing past sea ice cover of the Northern Hemisphere from dinocyst assemblages: status of the approach. *Quaternary Science Review*, 79:122–134.
- Durantou L, Rochon A, Ledu D, Masse G, Schmidt S, Babin M. 2012. Quantitative reconstruction of sea-surface conditions over the last 150 yr in the Beaufort Sea based on dinoflagellate cyst assemblages: the role of

- large-scale atmospheric circulation patterns. *Biogeosciences*, 9:539–5406.
- Eicken H, Dmitrenko I, Tyshko K et al. 2005. Zonation of the Laptev Sea landfast ice cover and its importance in a frozen estuary. *Global and Planetary Change*, 48:55–83.
- Eric P, Kim SY, EJ Yang, MJ Head, HC Kim, SI Nam, JH Yim, SH Kang. 2018. *Islandinium minutum* subsp. *barbatum* subsp. nov. (Dinoflagellata), a New Organic Walled Dinoflagellate Cyst from the Western Arctic: Morphology, Phylogenetic Position Based on SSU rDNA and LSU rDNA, and Distribution. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, doi.org/10.1111/jeu.12518.
- Gibb OT, Steinhauer S, Frechette B, de Vernal A, Hillaire-Marcel C. 2015. Diachronous evolution of sea surface conditions in the Labrador Sea and Baffin Bay since the last deglaciation. *The Holocene*, 25:1882–1897.
- Hamel D, de Vernal A, Gosselin M, Hillaire-Marcel C. 2002. Organic-walled microfossils and geochemical tracers: sedimentary indicators of productivity changes in the North Water and northern Baffin Bay during the last centuries. *Deep Sea Research Part 2 Topical Studies in Oceanography*, 49:5277–5295.
- Head MJ, Harland R, Matthiessen J. 2001. Cold marine indicators of the late quaternary: the new dinoflagellate cyst genus *Islandinium* and related morphotypes. *Journal of Quaternary Sciences*, 16:621–636.
- Holzwarth U, Esper O, Zonneveld KAF. 2010. Organic-walled dinoflagellate cysts as indicators of oceanographic conditions and terrigenous input in the NW African upwelling region. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 159:35–55.
- Kim SY, Lim DI, Cho HJ. 2012. Dinoflagellate cyst assemblages from the northern shelf sediments of the East China Sea: an indicator of marine productivity. *Marine Micropaleontology*, 96–97:75–83.
- Krepakevic A, Pospelova V. 2010. Tracing the influence of sewage discharge on coastal bays of Southern Vancouver Island (BC, Canada) using sedimentary

- records of phytoplankton. *Continental Shelf Research*, 30:1924–1940.
- Kunz–Pirrung M. 1998. Rekonstruktion der Oberflächenmassen der östlichen Laptevsee im Holozän anhand aquatischen Palynomorphen. *Berichte zur Polarforschung*, 281:1–1117.
- Kunz–Pirrung M. 2001. Dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments of the Laptev Sea region (Arctic Ocean) and their relationship to hydrographic conditions. *Journal of Quaternary Sciences*, 16:637–649.
- Limoges A, Kieft JF, Radi T, Ruz–Fernandez AC, de Vernal A. 2010. Dinoflagellate cyst distribution in surface sediments along the south–western Mexican coast (14.76°N to 24.75°N). *Marine Micropaleontology*, 76:104–123.
- Miller CS, Leroy SAG, Izon G, Lahijani HAK, Marret F, Cundy AB, Teasdale PA. 2013. Palynology: a tool to identify abrupt events? An example from Chabahar Bay, southern Iran. *Marine Geology*, 337:195–201.
- Mudie PJ, Rochon A. 2001. Distribution of dinoflagellate cysts in the Canadian Arctic marine region. *Journal of Quaternary Sciences*, 16:603–620.
- Novichkova EA, Polyakova EI. 2007. Dinoflagellate cysts in the surface sediments of the White Sea. *Oceanology*, 47:660–670.
- Ouellet–Bernier MM, de Vernal A, Hillaire–Marcel C, Moros M. 2014. Paleooceanographic changes in the Disko Bugt area, West Greenland, during the Holocene. *The Holocene*, 24:1573–1583.
- Park, YH, Yamamoto M, Nam SI, Irino T, Polyak L, Harada N, Nagashima K, Khim BK, Chikita K, Saitoh SI. 2014. Distribution, source and transportation of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surface sediments from the western Arctic Ocean and the northern Bering Sea. *Marine Chemistry*, 165:10–24.
- Pieńkowski AJ, Gill NK, Furze MF, Mugo SM, Marret F, Perreux A. 2017. Arctic sea–ice proxies: Comparisons between biogeochemical and micropalaeontological reconstructions in a sediment archive from Arctic Canada. *The Holocene*, 27(5):665–682.

- Pospelova V, Kim SJ. 2010. Dinoflagellate cysts in recent estuarine sediments from aquaculture sites of southern South Korea. *Marine Micropaleontology*, 76:37-751.
- Pospelova V, Chmura GL, Walker HA. 2004. Environmental factors influencing the spatial distribution of dinoflagellate cyst assemblages in shallow lagoons of southern New England (USA). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 128:7-134.
- Pospelova V, Chmura GL, Boothman WS, Latimer JS. 2005. Spatial distribution of modern dinoflagellate cysts in polluted estuarine sediments from Buzzards Bay (Massachusetts, USA) embayments. *Marine Ecology Progress Series*, 292:23-40.
- Pospelova V, de Vernal A, Pedersen TF. 2008. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments from the northeastern Pacific Ocean (43-25°N) in relation to sea-surface temperature, salinity, productivity and coastal upwelling. *Marine Micropaleontology*, 68:21-48.
- Radi T, de Vernal A. 2004. Dinocyst distribution in surface sediments from the northeastern Pacific margin (40 - 60°N) in relation to hydrographic conditions, productivity and upwelling. *Review of Paleobotany and Palynology*, 128:169-193.
- Radi T, de Vernal A, Peyron O. 2001. Relationships between dinocyst assemblages in surface sediment and hydrographic conditions in the Bering and Chukchi seas. *Journal of Quaternary Science*, 16:667-680.
- Radi T, Pospelova V, de Vernal A, Barrie JV. 2007. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British Columbia estuarine environments. *Marine Micropaleontology*, 62:269-297.
- Richerol T, Pienitz R, Rochon A. 2014. Recent anthropogenic and climatic history of Nunatsiavut fjords (Labrador, Canada). *Paleoceanography*, 29:869-892.
- Roach AT, Aagaard K, Pease CH et al. 1995. Direct measurements of transport and water properties through Bering Strait. *Journal of Geophysical Research*, 100: 18443-18457.

- Rochon A, de Vernal A, Turon JL, Matthiessen J, Head MJ. 1999a. Distribution of dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent basins and quantitative reconstruction of sea-surface parameters. Special Contribution Series of the American Association of Stratigraphic Palynologists 35.
- Rochon A, de Vernal A, Turon JL, Matthiessen J, Head MJ. 1999b. Distribution of recent dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic ocean and adjacent seas in Relation to Sea-surface Parameters. AASP Contributions Series 35. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas, TX. p. 1-1146.
- Stein R. 2008, Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, and Paleoenvironment, Developments in Marine Geology, 2. Elsevier, Amsterdam, 587 p.
- Stein R, Fahl K, Gierz P, Niessen F, Lohmann G. 2017. Arctic Ocean sea ice cover during the penultimate glacial and the last interglacial. Nature communications, 8(1). DOI: 10.1038/s41467-017-00552-1
- Stockmarr J. 1971. Tablets with Spores Used in Absolute Pollen Analysis. Pollen et Spores, 13:615-621.
- ter Braak CJF, Šmilauer P. 2002. CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca, New York.
- Van Nieuwenhove N, Baumann A, Matthiessen J, Bonnet S, de Vernal A. 2016. Sea surface conditions in the southern Nordic Seas during the Holocene based on dinoflagellate cyst assemblages. The Holocene, 26:722-735.
- Vasquez-Bedoya LF, Radi T, Ruiz-Fernandez AC, de Vernal A, Machain-Castillo ML, Kielt JF, Hillaire-Marcel C. 2008. Organic-walled dinoflagellate cysts and benthic foraminifera in coastal sediments of the last century from the Gulf of Tehuantepec, South Pacific Coast of Mexico. Marine Micropaleontology, 68:49-65.
- Viscosi-Shirley C, Mammone K, Pias N et al. 2003. Clay mineralogy and

- multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic shelf: Implications for sediment provenance and grain size sorting. *Continental Shelf Research*, 23:1175 - 1200.
- Wang C, Liu Y, Dong L et al. 2015. The distribution pattern of the surface sediments in the Bering Sea and the western Arctic and its environmental implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(3):1-9.
- Weingartner TJ, Cavalieri DJ, Aagaard K et al. 1998. Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf. *Journal of Geophysical Research*, 103(C4):7647-7661.
- Weingartner TJ, Aagaard K, Woodgate R et al. 2005. Circulation on the north central Chukchi Sea shelf. *Deep Sea Research: Part II*, 52:3150-3174.
- Winsor P, Chapman DC. 2004. Pathways of Pacific water across the Chukchi Sea: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research*, 109:C03002.
- Woodgate RA, Aagaard K, Swift JH et al. 2005. Pacific ventilation of the Arctic Ocean's lower halocline by upwelling and diapycnal mixing over the continental margin. *Geophysical Research Letters*, 32:L18609.
- Woodgate RA, Weingartner T and Lindsay R. 2010. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice Retreat. *Geophysical Research Letters*, 37:L01602.
- Zonneveld KAF, Chen L, Melobius J, Mahmoud MS. 2009. Environmental significance of dinoflagellate cysts from the proximal part of the Po-river discharge plume (off southern Italy, Eastern Mediterranean). *Journal of Sea Research*, 62:189-213.
- Zonneveld KAF, Marret F, Versteegh, GJM, Bogus K, Bonnet S, Bouimetarhan I, Crouch E, de Vernal A, Elshanawany R, Edwards L, Esper O, Forke S, Grøsfjeld K, Henry M, Holzwarth U, Kielt JF, Kim SY, Ladouceur S, Ledu D, Chen Li, Limoges A, Londeix L, Lu SH, Mahmoud MS, Marino G, Matsouka K, Matthiessen J, Mildenhall DC, Mudie PJ, Neil HL, Pospelova V, Qi Y, Radi T, Richerol T, Rochon A, Sangiorgi F, Solignac S, Turon JL, Verleye T, Wang Y, Wang Z, Young Marty. 2013. Atlas of modern

dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points. Review of Palaeobotany and Palynology, 191:1-197.

Zonneveld KAF, Siccha M. 2016. Dinoflagellate cyst based modern analogue technique at test- A 300 year record from the Gulf of Taranto (Eastern Mediterranean). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 450:17-37.



주 의

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