

북극해 동물플랑크톤 분포의
장기 변동성 파악을 위한 계류형 다중주파수
음향시스템 활용연구

Long-term observation of zooplankton distribution
in the Arctic Ocean using mooring-based multifrequency



한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 동물플랑크톤 분포의 장기 변동성 파악을 위한 계류형 다중주파수 음향시스템 활용 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



보고서 초록

과제관리번호	BSPE16320-093-13	해당단계 연구기간	2016.5.1. ~ 2017.4.30	단계 구분	(1단계)/(총1단계)
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명	기본연구사업(신진연구자)			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	북극해 동물플랑크톤 생태계의 장기 변동성 파악을 위한 계류형 다중주과수 음향시스템 활용 연구			
연구책임자	나 형 술	해당단계 참여연구원수	총 : 1 명 내부 : 1 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 48,000 천원 기업: 천원 계: 48,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지기후변화연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수 94
<p>○ 연구개발의 목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목적: 계류형 다중주과수 음향시스템을 활용하여 북극해 주요 동물플랑크톤 분포 변화 장기 변동성 파악 - 필요성: 북극 해양생태계에서 중위영양단계에 속하는 동물플랑크톤은 먹이 생태계의 주요 연결 고리로써 해양생태계의 건강상태를 압축 표현하는 평가 지표로 활용됨. 이들 생태계가 지구온난화에 따른 급격한 해빙 면적 감소와 수온상승으로 종 분포, 생물량, 그리고 군집 구성에 큰 변화를 겪고 있음. 따라서 주변 해양환경의 제한을 적게 받으며 경제적 장기적으로 동물플랑크톤 분포 변화를 연속 관측할 수 있는 새로운 관측 방법이 요구됨. <p>○ 연구개발의 내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> - 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석 - 북극해 아라온 관측 해역에서의 동물플랑크톤 군집 특성 파악 - 계류형 다중주과수 음향시스템 설치 및 회수 - 다중주과수 음향데이터 분석 및 주요 동물플랑크톤 분포 장기 변동성 파악 <p>○ 연구개발결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2016년 서북극해 하계기간 수층 구조의 물리적 특성 확인 - 동물플랑크톤 군집 구성 파악. <i>Calanus glacialis</i>이 우점 동물플랑크톤 종임을 확인. - 베링해 북부, 척치해, 북극해 주변 중형동물플랑크톤 군집 구조의 지역적 차이 확인. - 단기 계류형 음향시스템 활용 해빙아래 서식하는 동물플랑크톤 행동 변화 관측 - 해빙아래 <i>Calanus</i> 종의 뚜렷한 일주기 주야 수직 이동 확인. 수괴의 안정성이 중요한 서식수심을 결정하는 요인임을 확인 - 계류형 음향시스템의 활용 가치 확인 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 동물플랑크톤, 다중주과수 음향시스템			
	영 어	Arctic Ocean, Zooplankton, Multifrequency acoustic system			

요 약 문

I. 제 목: 북극해 동물플랑크톤 생태계의 장기 변동성 파악을 위한 계류형 다중 주파수 음향시스템 활용 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 동물플랑크톤은 북극해 해양생태계의 하위영양단계와 상위영양단계를 연결하는 가장 중요한 연결 고리 역할을 하고 있음.
- 지구온난화에 따라서 급격하게 변화하는 북극해 해양환경에 대한 동물플랑크톤의 반응을 파악하는 것이 필수적임.
- 북극해 동물플랑크톤 연구는 해빙의 시공간적인 변화로 인하여 관측 데이터가 많지 않으며
- 또한 동물플랑크톤의 광대역 분포 파악에 장점이 있는 기존 연구선 기반 음향시스템의 제한점 (결빙해역 관측의 어려움, 하계 기간에 국한됨, 시간에 따른 연속 관측 어려움, 고비용)을 보완하기 위한 새로운 관측 플랫폼의 활용 필요.
- 계류형 다중주파수 음향시스템을 활용하여 북극해 주요 동물플랑크톤 분포의 장기 변동성 파악

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석
- 북극해 아라온 관측 해역에서의 동물플랑크톤 군집 특성 특성 파악
- 계류형 다중주파수 음향시스템 설치 및 이해

- 다중주파수 음향데이터 분석 및 주요 동물플랑크톤 분포(주요 서식 수심 및 생물량)의 장기 변동성 파악

IV. 연구개발결과

- 하계기간 북극 베링해협을 통해서 유입되는 수괴들 (Melt Water; Alaska Coastal Water, Bering Shelf Water, Pacific Summer Water, Pacific Winter Water, Atlantic Water)의 물리적 특성 확인

- 동물플랑크톤 군집 구성 파악. *Calanus glacialis*이 우점 동물플랑크톤임을 확인
- 동물플랑크톤 군집 구조의 베링해 북부, 척치해, 북극해 주변 지역적 차이 확인. 수온, 염분, 영양염이 지역적 차이의 주요 해양환경인자임을 파악.

- 단기 계류형 음향시스템 활용 해빙아래 서식하는 주요 동물플랑크톤인 *Calanus* 종의 행동변화 관측

- 해빙아래 *Calanus* 종의 뚜렷한 일주기 주야 수직 이동 확인하였으며 수심 20 - 40 m 주로 분포하였음. 수괴의 안정성이 서식 수심을 결정하는 중요한 환경요인임을 파악.

- 본연구를 통해서 북극해 해양생태계에서의 동물플랑크톤 역할을 파악에 계류형 음향시스템의 활용가치 확인

V. 연구개발결과의 활용계획

- 첨단기술을 활용한 기후변화와 북극해 해양생태계 (플랑크톤, 어류, 고래) 반응 연구에 활용 (예, 다중음향관측시스템 구축; 연구선 음향시스템, 계류형 능/수동 음향시스템, 수중 글라이더 음향시스템)

- 북극해 해양생태계 변동 관측을 위한 종합 모니터링 체계 구축에 활용: 대기 자료 - 해양 자료 - 수중 음향관측 자료를 이용한 종합적인 데이터 네트워크 구축에 활용 될 수 있음

SUMMARY

I. Subject

- A study on the application of mooring-based multi-frequency acoustic system for long term variability of zooplankton behaviour

II. Objectives and Necessities

- Zooplankton is the most important link between the lower and upper trophic levels in the Arctic Ocean marine ecosystem.
- It is essential to understand the response of zooplankton to the rapidly changing Arctic Ocean environment due to global warming.
- There are less observational data due to the harsh weather conditions and dramatic change of sea ice condition.
- A new observation platform is necessary to supplement the limitations of the existing research methods including vessel-based acoustic system, which has a difficulty in observation of sea ice covered region with high cost.

III. Contents and Scopes

- Understand Arctic Ocean environments based on previous observed data
- Observe the zooplankton community structure in the Arctic Ocean
- Experiment: Deploy and recovery the mooring-based multifrequency acoustic systems
- Identify the long-term variability in major zooplankton distributions (major habitat depth and biomass) and the essential environmental variables

IV. Results

- Characterize water mass properties from the Bering Strait to Arctic Ocean during summer season (surface melt water; alaska coastal water, bering shelf water, pacific summer water, pacific winter water, atlantic water)
- Identify three different zooplankton community structures in the Bering Strait, Chuckchii Sea, and around Arctic Ocean based on zooplankton compositions and environmental variables
- Water temperature, salinity, and nutrients are the essential environmental factors affecting regional difference of zooplankton community..

- Observe the vertical behavior of major Calanus species under sea ice using the short-term mooring-based acoustic system
- Calanus species under the sea ice showed clear diel vertical migration, which was distributed between 20 and 40 m depth. Water mass stability and food quality were the important environmental factors to determine the vertical habitat of zooplankton.
- This study would help to understand the role of zooplankton in the marine ecosystem of the Arctic Ocean.

V. Application Plans

- Apply to understand the causes and consequences of Arctic marine ecosystems related to climate change.
- Apply to observe the long-term variability of mid- to high-trophic levels from zooplankton to marine mammals in the Arctic Ocean through observation using the bioacoustic systems.
- Apply to build a comprehensive Arctic Ocean Monitoring System using the multiplatform acoustic systems such as vessel-based acoustic system, mooring-based acoustic system, and unmanned mobile vehicle system.



<CONTENTS>

Chapter 1	Introduction-----	1
Chapter 2	Domestic and Overseas Status of Technological Development-----	4
Section 1	Domestic Status-----	4
Section 2	Overseas Status-----	9
Chapter 3	Contents and Reults-----	13
Section 1	Arctic Ocean environmental data -----	13
Section 2	Zooplankton community structure in the Arctic Ocean-----	34
Section 3	Experiment: Recovery and deploy for the long-term mooring-based acoustic system -----	51
Section 4	Short-term vertical variability of Arctic zooplankton -----	60
Chapter 4	Achievement of Goals and External Contributions-----	82
Section 1	Achievement of Goals-----	82
Section 2	External Contributions-----	84
Chapter 5	Plans for Utilization of Results-----	86
Chapter 6	References-----	89

〈목 차〉

제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 연구개발 현황	4
제 1 절 국내수준	4
제 2 절 국제수준	9
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	13
제 1 절 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석	13
1. 서북극해 해양환경	13
2. 관측방법	15
3. 연구결과	18
제 2 절 북극해 동물플랑크톤 분포 및 생태학적 특성 파악	34
1. 연구목적	34
2. 연구수행 방법	35
3. 데이터 분석	37
4. 연구결과	41
제 3 절 해상실험: 계류형 다중주파수 음향시스템 회수 및 계류	51
1. 해상실험	52
2. 데이터 분석 방법	57
제 4 절 북극해 주요 동물플랑크톤의 단기 변동성 파악	60
1. 북극 해빙 아래 동물플랑크톤의 일주기 분포	61
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	82
제 1 절 목표달성도	82
1. 연구개발 목표 및 내용	82
2. 추진전략 및 목표 달성도	82
제 2 절 관련분야에의 기여도	84
1. 기술적 파급효과	84
2. 사회적 경제적 과학적 파급효과	85
제 5 장 연구개발 결과 활용 계획	86
제 6 장 참고문헌	89

<표 목차>

표 1. 다변량 통계분석 방법-----	37
표 2. 채집된 동물플랑크톤 중 구성과 개체수 -----	42
표 3. 해양환경에 따라서 구분된 서식지간 (Habitat 1: 정점 1-8, Habitat 2: 정점 10-12, Habitats 3: 14-31) 유의성 검증.-----	46
표 4. 동물플랑크톤 중 구성으로 구분된 서식지간 (Habitat 1: 정점 1-8, Habitat 2: 정점 10-12, Habitats 3: 14-31) 유의성 검증-----	46
표 5. 동물플랑크톤과 해양환경과의 유의성 검증 (Mantel test)-----	49
표 6. 동물플랑크톤 개체수에 영향을 미치는 주요 환경인자-----	50
표 7. 입자성 유기물질 총중량과 유기탄소-----	69



〈그림 목차〉

그림 1. 북극해 해양생태계-----	1
그림 2. 감성돔의 주파수 (120, 200, 420 kHz) 와 측면 자세각별 음향표적강도 변화---	5
그림 3. 남해 아산만에 서식하는 멸치 생물량의 시공간 분포 변화-----	6
그림 4. 크릴 군집의 수평 분포 (2003년 12월 1일-6일)-----	7
그림 5. 미국해양대기관리처 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 수산과학센터 (Northeast Fisheries Science Center, NEFSC)에서 운용하는 수산 음향조사 개념도-----	10
그림 6. 남극해 연구선과 상업어선의 운항경로. 관측된 모든 음향데이터는 Southern Ocean Network of Acoustics (SONA) 멤버 (호주, 영국, 노르웨이, 뉴질랜드, 프랑스, 미국)-----	11
그림 7. 영국남극연구소 (British Antarctic Survey, BAS)의 RRS James Clark Ross에서 획득한 생물음향데이터의 에코그램 (Echogram). 에코그램은 호주의 Integrated Marine Observing System (IMOS)의 데이터 처리기법-----	12
그림 8. 서북극해 해저지형과 하계 기간 (2014 - 2016년 8월) 수행한 해양환경 관측 정점. 녹색 실선들은 하계기간 평균 해빙 경계가 시간에 따라서 북쪽으로 이동하는 변화를 보여주며 노란색 굵은 실선은 북극해로 유입되는 태평양 기원수의 주요 경로-----	17
그림 9. 수온-염분 그래프 (T-S diagram) -----	19
그림 10. 서북극해 8월 6개의 수괴로 구분된 수직 수온 구조 (0 - 200 m). ACW: Alaskan coastal water, BSW: summer Bering sea water, PSW: Pacific summer water, PWW: Pacific winter water, AW: Atlantic water, MW: Surface melt water-----	20
그림 11. 서북극해 8월 6개의 수괴로 구분된 수직 염분 구조 (0 - 200 m). ACW: Alaskan coastal water, BSW: summer Bering sea water, PSW: Pacific summer water, PWW: Pacific winter water, AW: Atlantic water, MW: Surface melt water-----	21
그림 12. 2014년 서북극해 해양환경 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 인산염, 질산염+아질산염, 암모니아, 규산염)의 수직 분포-----	24

그림 13. 2015년 서북극해 해양환경 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 인산염, 질산염+아질산염, 암모니아, 규산염)의 수직 분포-----	27
그림 14. 2016년 서북극해 해양환경 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 인산염, 질산염+아질산염, 암모니아, 규산염)의 수직 분포-----	30
그림 15. 서북극해 수심 평균된 (depth averaged) 수온 (temperature), 염분 (salinity), 밀도 (density), 엽록소 (Chl-a)의 수평 분포-----	32
그림 16. 서북극해 수심 평균된 (depth averaged) 질산염+아질산염 (NO ₂ +NO ₃), 규산염 (SiO ₂), 인산염 (PO ₄), 암모니아 (NH ₄)의 수평 분포-----	33
그림 17. 2016년 8월 북극해 (베링 해협, 척치해, 북극해 주변) 동물플랑크톤 군집 파악을 위한 네트와 해양환경 관측 위한 CTD 정점-----	36
그림 18. 동물플랑크톤 개체수 (abundance), 생물량 (biomass), 종 다양성 (species diversity), 종 균등성 (Species evenness), 종 풍부도 (species richness)-----	43
그림 19. 정점 별 동물플랑크톤 군집 분포-----	44
그림 20. 북극해 서식 지역에 따른 동물플랑크톤 군집 분포 (Shade plot)-----	45
그림 21. 북극해 해양환경에 따른 동물플랑크톤 서식지 분포. CAP (Canonical analysis of principal coordinates) 분석 결과-----	47
그림 22. 북극해 동물플랑크톤 종 구성에 따른 서식지 분포. CAP (Canonical analysis of principal coordinates) 분석 결과-----	48
그림 23. 북극해 해빙역 장기 계류형 다중주파수 음향시스템 운용 개념도-----	51
그림 24. 북극해 조사해역의 해빙농도 분포 (2016.8.9) 및 CTD (검은색 원), 네트 (붉은색 원), 무어링 관측 정점 (하얀색 별)-----	53
그림 25. 장기 계류형 무어링 디자인 (PM16040). 계류형 다중주파수 음향시스템은 수심 175 m 에 고정하여 표층부터 175 m 수심내에 분포하는 동물플랑크톤의 생물량 및 서식 수심 변화 관측 (변경 전)-----	54
그림 26. 북극해 해빙역 단기 계류형 음향시스템 운용 개념도 (변경 후)-----	56
그림 27. 데이터 분석 흐름도-----	58
그림 28. (a) 하계 기간 북극해 해빙 분포 (AMSR2, 2014년 8월 13일)와 음향 실험 위치 (하얀 점). (b) 해빙위 퇴적물 트랩과 음향 도플러 유속계 (acoustic Doppler	

current profiler, ADCP)의 위치. 각 지점은 아라온으로부터 약 200 m 떨어진 지점에 설치되었음-----	63
그림 29. (a) 퇴적물 트랩과 (b) 음향 도플러 유속계의 설치 모습-----	64
그림 30. (a) 관측 기간 동안 광량의 일 주기 변동성. (b) CTD로 관측된 광합성 유효방사 (Photosynthetically active radiation, PAR)의 시간에 따른 변동성 (c) 해빙 유무에 따른 수층내 광합성 유효방사의 수직 분포-----	66
그림 31. 수층 해양환경의 시간에 따른 수직 분포 특성. (a) 수온, (b) 염분, (c) 엽록소, (d) 용존산소량-----	67
그림 32. 수층내 해류 속도 수직 구조의 시간에 따른 변동성. (a) 동-서 방향 해류 속도. (b) 남북 방향 해류 속도. 빨간색은 해류가 동쪽 그리고 북쪽으로 강하게 흐르고 있음을 의미 -----	68
그림 33. 퇴적물 트랩으로 획득한 동물플랑크톤 (북극 요각류, Arctic copepod)-----	70
그림 34. (a) 음향 도플러 유속계로 관측된 음향 세기 (Automatic gain control, AGC)의 시간에 따른 변동성. (b) 수심 30 m 음향 세기의 시간에 따른 변동성과 (c) 수심 30 m 음향 세기의 주기성-----	72
그림 35. 광량의 일주기 변화에 따른 동물플랑크톤의 평균 일주기 수직 변화. (a) 대기중 평균 순방사량의 일주기 변화 (b) 음향 도플러 유속계로 측정된 AGC (automatic gain control) 의 평균 일주기 수직 변화-----	73
그림 36. 연구 해역과 무어링 정점 (74° 29.535'N, 158° 01.093'W) 그리고 JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science And Technology)의 해저면 계류형 무어링 디자인-----	75
그림 37. 음향 도플러 유속계 (300 kHz)로 관측된 해류와 음향산란층 수직 구조의 시간에 따른 변화 (2002. 9월 - 2003년 8월). 유속의 방향 (velocity direction)과 세기 (velocity magnitude), 동-서 방향 유속 (Eastward velocity), 남-북 방향 유속 (Northward velocity), 그리고 상대적인 음향 세기 (Echo intensity, automatic gain control)-----	78
그림 38. 2002년 9월 15 - 30 일 음향 도플러 유속계 (300 kHz)로 관측된 해류와 음향산란층 수직 분포 변화. 유속의 방향 (velocity direction)과 세기 (velocity	

	magnitude), 동-서 방향 유속 (Eastward velocity), 남-북 방향 유속 (Northward velocity), 그리고 상대적인 음향 세기 (Echo intensity, automatic gain control)--79	
그림 39.	음향산란층의 평균 월 변동-----80	
그림 40.	북극해 해빙 변화에 따른 음향산란층의 일주기 반응. 해빙 농도 (sea ice concentration, SIC), 광합성 유효 방사 (photosynthetic active radiation, PAR), 상대적인 음향 세기 (echo intensity, automatic gain control). 노란색 점선은 음향산란층 최대 수심의 계절 변화를 나타내며 흰색 원은 요각류 oil sac의 계절 변화 (Pasternak et al., 2001)를 나타냄-----81	
그림 41.	남극해와 북극해 주요 해양생물 자원-----87	
그림 42.	Korea Arctic Ocean Observing System (K-AOOS)에 구상중인 해빙-해양 관측 시스템 개념도-----88	



제 1 장 서 론

급격한 지구온난화는 북극해 해양환경과 해양생태계 변화를 야기시키고 있다. 기후 변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 보고서에 따르면 (IPCC, 2007) 지구온난화에 의해서 기후 및 해양환경변화가 전 지구적으로 발생하고 있으며, 북극해 대기 온도의 상승, 해빙 면적 감소, 태평양으로부터의 따뜻한 해수유입 증가, 그리고 해양산성화의 진행은 북극해 해양생물의 생리, 생태 그리고 서식 분포에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 해양의 생지화학적 물질 순환과 생태계 구조와 기능에도 큰 변화를 야기할 것으로 전망하고 있다. 따라서 북극해 하위영양단계 (식물플랑크톤) - 중위영양단계 (동물플랑크톤) - 상위영양단계 (어류, 고래)에 이르는 해양생물의 변화를 확인하고 원인을 파악하는 것이 필수적이며 이를 위해 기후변화-해양환경 변화가 해양생태계에 미치는 영향을 평가할 수 있는 장기 관측 자료가 요구된다. 그러나 북극해의 경우 해빙의 분포 변화가 시공간적으로 크기 때문에 현장 관측의 어려움으로 인하여 장기 관측 자료가 아직 충분히 확보되지 못한 실정이다.

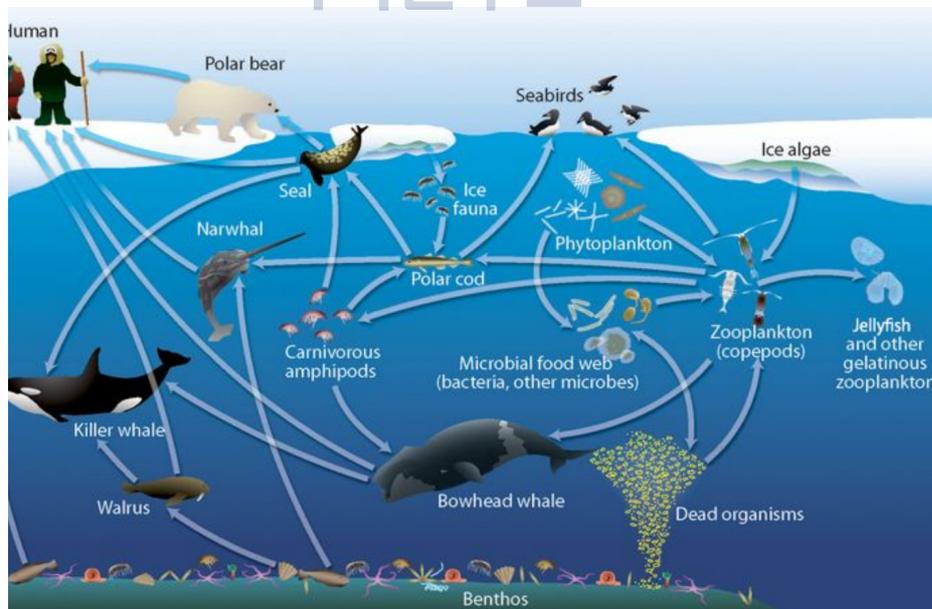


그림 1. 북극해 해양생태계 (<https://kr.pinterest.com>)

북극해 해양생태계는 해빙의 분포 변화, 해빙의 용빙에 따른 담수화, 북극해 주변 대륙의 강으로부터 유입되는 담수에 의해서 직접적인 영향을 받는다. 일차생산자를 위한 영양염 공급이 충분한 반면 부족한 일사량, 낮은 수온 그리고 해빙 분포 때문에 하계를 제외하면 식물플랑크톤 생물량이 적다. 특히 최근 가속화되는 지구온난화에 의해 북극해 해빙면적과 두께 감소는 용빙수 증가에 따른 북극해 담수 양의 증가 그리고 유기물질과 무기물질 양의 증가를 초래하여 식물플랑크톤과 동물플랑크톤에게 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 입자성 부유물질 (Particulate Organic Matter, POM)은 해빙하부의 식물플랑크톤과 생물기원의 유기물질 (non-living detritus)로 구성되어 있다. 해수내 유기물질 (organic materials)과 무기물질 (inorganic materials)의 양은 대기-해빙-해수 간의 물질 플럭스, 해수내 이산화탄소 순환, 그리고 해양생태계에 중요한 영향을 끼칠 수 있다. 대양의 경우 입자성 부유물질의 기원은 주로 식물플랑크톤으로 제한되고 (Duce and Duursma, 1977) 하계 기간 급격한 용빙이 진행되는 북극해에서는 해빙으로 부터 유입되는 입자성 부유물질이 많은 기여를 하게된다. 입자성 부유물질은 동물플랑크톤의 먹이로 사용되고 분해된 후에는 식물플랑크톤의 영양원으로 활용되기 때문에 해양생태계내 에너지 전달에 있어 중요한 역할을 수행한다 (Parsons et al., 1984).

북극 해양생태계에서 중위영양단계에 속하는 동물플랑크톤은 하위영양단계 (식물플랑크톤)와 상위포식자 (어류, 새, 고래)를 연결하는 먹이 생태계의 주요 연결 고리로서 해양생태계 전체의 건강상태를 압축 표현하는 평가 지표로 활용될 수 있다. 이들 생태계가 지구온난화에 따른 급격한 해빙면적 감소 (~10%/10년)와 수온상승으로 심각한 위협을 받으며 종 분포, 군집 구성, 생물량, 생리학적 기능에 큰 변화를 겪고 있다. 예를 들어 북극해 온난화로 해빙면적의 감소와 일차생산자의 대량 번식 시기가 앞당겨지면 식물플랑크톤을 먹이로 하는 동물플랑크톤 생물량의 증가와 함께 번식 시기가 달라지게 되며 아북극권에 서식하는 동물플랑크톤 종이 따뜻해진 북쪽으로 이동할 수 있다. 그에 따른 북극해 동물플랑크톤 군집 구조가 달라지게 되며 북극해 주요 수산 어종의 생물량 증감과 어류의 서식처 변화 등 먹이 공급 변화에 따른 상위 포식자 생활의 변화가 예상된다. 그리고 북극해는 지구온난화, 해빙 면적의 감소와 함께 전지구에서 가장 빠르게 산성화되고 있다. 해양산성화란 해수내 이산화탄소 증가에 따라서 수소 이온의 농도가 감소하는 현상으로 해수내 탄산칼슘으로 구성되어 있는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 성장에 심각한 문제를 발생시킬수 있다. 봄과 여름 대량번식이 일어나는 시기에 식물플랑크

톤과 동물플랑크톤 성장 둔화에 따른 생물량 감소는 북극해 상위영양단계의 먹이 활동에 심각한 위협을 줄수 있으며 북극해 해양생태계가 큰 위협에 빠질수 있다. 하지만 이러한 동물플랑크톤의 중요한 역할에도 불구하고 이들의 시공간 변화가 크고 해빙에 따른 접근성의 제한으로 장기적인 연속 관측이 어려운 실정이다.

동물플랑크톤 군집 분포 및 생물량 변화를 파악하기 위한 목적으로 네트와 선박의 선저에 부착된 음향시스템이 많이 활용되었다. 생물의 종 구성과 군집 파악 등 정성분석에 적합한 네트 채집과 상대적으로 짧은 시간 동안 넓은 공간에 서식하는 생물의 수직/수평 분포 관측에 효율적인 음향시스템은 해양생물의 생물량 및 주요 어종의 자원량 분석의 표준화된 방법으로 제시되어 왔다. 하지만 이들 관측 방법은 해빙이 없는 하계에만 활용이 가능하며 하계 기간에도 해빙농도가 높은 지역의 동물플랑크톤 관측에 어려움이 있기 때문에 해빙하부에 서식하는 동물플랑크톤의 생물량 및 시간에 따른 행동 변화(일주기-년 주기)를 파악하고 북극해 환경변화에 따른 원인을 이해하기에는 큰 제약이 있다. 따라서 북극해 해빙의 시공간 변동에 제한되지 않고 동물플랑크톤 생물량 변화를 장기적으로 연속 관측할 수 있는 새로운 관측 플랫폼이 요구된다.

본 연구에서는 고정 정점에서 장기간 동물플랑크톤 생물량의 분포 변화를 연속적으로 관측할 수 있는 계류형 다중주파수 음향시스템의 활용을 제안하며 북극해 해빙 하부에 서식하는 동물플랑크톤의 시간에 따른 수직 분포 변화를 관측하고 원인 파악을 위한 이들 시스템의 활용성을 확인해 보고자 한다. 북극해 해양환경 기초 자료 수집, 분석에 대한 결과와 서북극해 (아래온 조사 지역)에 서식하는 동물플랑크톤 군집의 공간 분포 및 공간 분포에 영향을 미치는 주요 해양환경인자를 확인하였다. 그리고 기존 연구 방법인 연구선 선저에 장착된 음향시스템을 활용하여 관측한 동물플랑크톤의 수직/수평 분포 특성을 확인하였으며 계류형 음향시스템을 활용하여 연구선으로 관측이 불가능한 해빙 아래에 분포하는 동물플랑크톤의 시간에 따른 변동성과 이들 변화에 영향을 미치는 주요 환경인자를 파악하였다.

제 2 장 국내외 연구개발 현황

해양생태계를 구성하는 동물플랑크톤과 어류는 해양의 주요 생물자원으로써 일본과 노르웨이와 같은 수산 선진국은 자국 영해뿐만 아니라 전 세계 해양에 걸쳐 적극적으로 관리·보호하여 왔다. 1920년대 체계적이고 과학적인 해양생물 조사를 위한 음향시스템의 효율성이 밝혀진 이후 (Kimura, 1929) 제2차 세계 대전 동안 관측장비와 분석 기술이 발전하면서 해양에 분포하는 동물플랑크톤과 어류 군집 변동성을 파악하기 위한 많은 연구가 시도되었다 (Midttun and Hoff, 1962; Bary, 1966). 음향센서개발, 음향조사 기법, 어종식별 등에 대한 연구활동이 수행되어 1990년대에는 해양생물자원의 분포 및 생물량 추정에 음향시스템이 필수 방법으로 사용되었다 (Chapman and Hawkins, 1973; Love, 1977; Clay, 1983; Foote, 1987; MacLennan and MacKenzie, 1988; Jolly and Hampton, 1990; Brodeur and Wilson, 1996). 한국 반도 연안의 멸치, 베링해 명태, 북대서양 청어, 남아프리카 연안의 멸치, 남극해 크릴 등 다양한 생물자원의 분포 및 자원량 조사에 활용되고 있다. 그리고 생물량 자체를 파악하는 목적 뿐만 아니라 해양생태계와 해양환경과의 상호작용을 파악하여 생물자원의 분포 및 생물량의 변동 원인을 이해하는 중요한 수단으로 사용되고 있다.

제 1 절 국내수준

국외 선진국들이 1970년대부터 음향시스템을 활용해온 반면 국내 음향시스템을 활용한 해양생태계에 대한 연구는 1990년대부터 다양한 연구 목적으로 실용화되기 시작하였다. 1990년 이전, 국내 담수역을 포함하는 연근해 수산 자원의 분포 및 자원량의 시공간 변동 파악을 위한 과학적 연구는 네트와 트롤과 같은 어구를 이용하였다 (Choi, 1971; Cha et al., 2004). 어구를 활용한 방법은 어종 식별과 종 조성 파악을 위한 정성적인 자료로서의 장점이 있지만 채집 수층과 면적의 제한성으로 정량적인 결과 도출에 오차를 만들어 낼 수 있다. 이들 문제점을 극복하기 위해 음향시스템 활용이 시작되었으며 현재 네트 채집에 의한 통계적 방법에 의존하지 않고 넓은 해역에 분포하는 해양생물의

실제 현존량을 단시간에 추정할 수 있는 음향시스템과 네트 채집을 함께 활용하고 있다. 국내에서는 주요 수산 식량 자원인 어류의 분포와 정확한 현존량을 파악하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 최근 연근해 수산 자원의 감소와 원양 자원 개발의 어려움으로 어업 자원의 관리와 보호를 위해 수산 자원의 현존량 파악이 시급한 실정이기 때문이다. 국내 연안은 해역별 (동해, 서해, 남해)/ 계절별 (봄, 여름, 가을, 겨울) 다양한 어류 종이 함께 분포하기 때문에 정확한 자원량 산출에 어려움이 있다. 때문에 음향시스템을 활용한 많은 연구가 주요 상업 어종의 개별 음향표적강도 (Target strength, TS)를 파악하는 것에 목적을 두었다 (Cho et al., 2006). 어류의 개체별 음향표적강도는 음향신호의 세기를 어류의 생물량으로 환산하는데 필요한 변수로써 정확한 자원량 산출을 위한 가장 중요한 단계이다 (Simmonds et al., 1992).

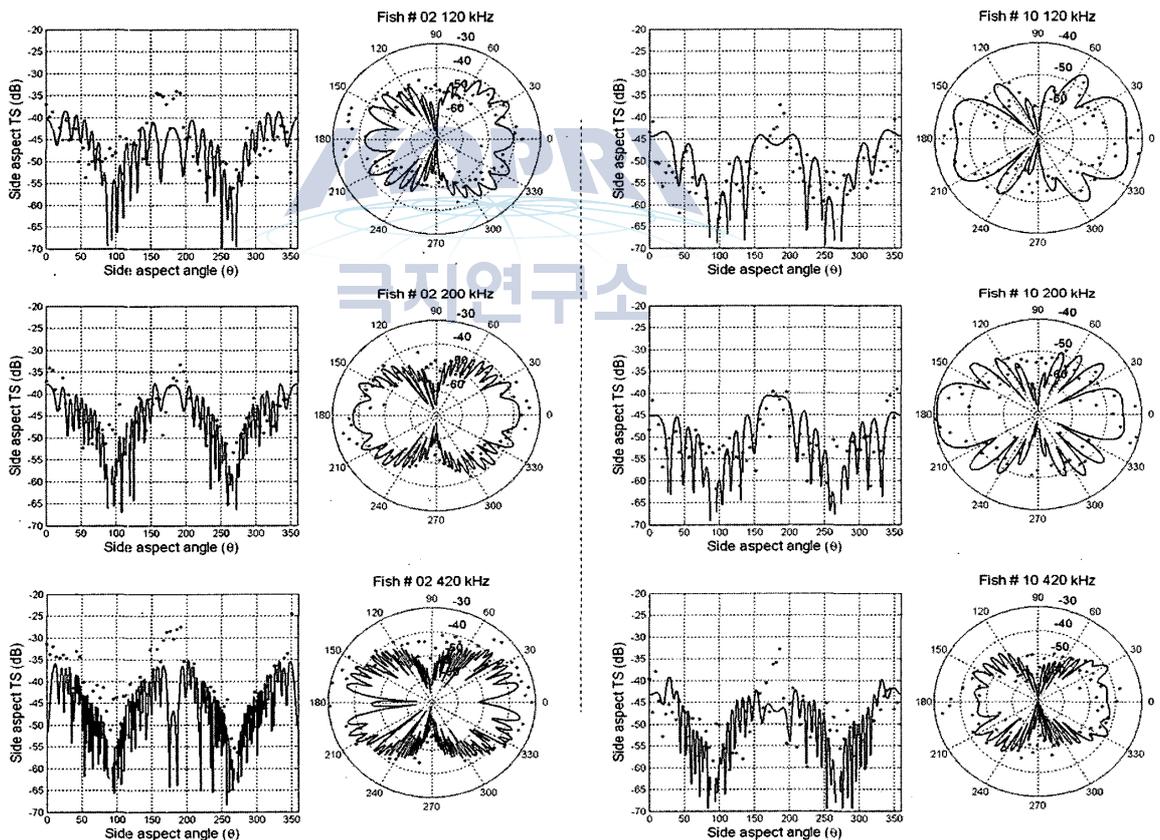


그림 2. 감성돔의 주파수 (120, 200, 420 kHz) 와 측면 자세각별 음향표적강도 변화 (Cho et al., 2006)

국내 해역에서는 이러한 음향표적강도 연구를 기반으로 주요 어종의 공간 분포와 생물량 변동을 파악하며 동해, 서해, 남해의 수산 자원량을 모니터링 하였다. 동중국해, 통영, 제주도 해역에서 동물플랑크톤, 멸치, 어류의 자원량 추정과 (Kang et al., 2003; Kim et al., 2008; Lee et al., 2012; Lee et al., 2014) 통영, 여수 남단의 다도해 지역, 제주도 연안에 조성되어 있는 바다목장 해역에 주요 어종의 공간 분포 변화에 음향시스템의 활용이 증가되고 있다 (MOF, 2002; MOF, 2006; MOF, 2007).

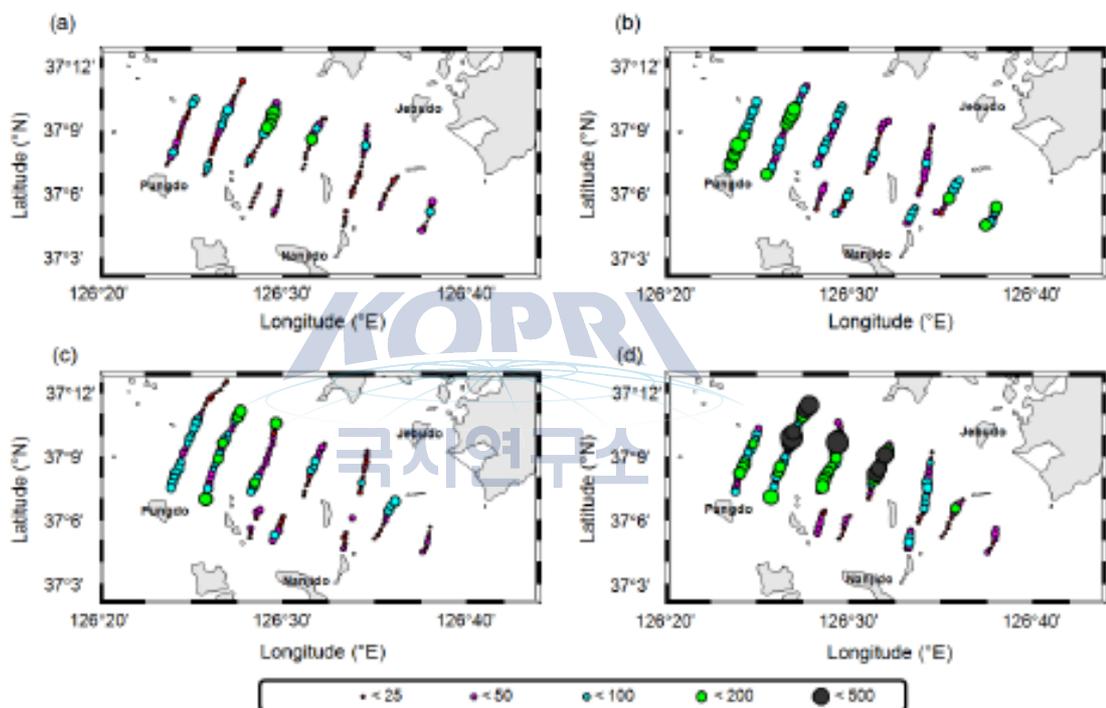


그림 3. 남해 아산만에 서식하는 멸치 생물량의 시공간 분포 변화 (Lee et al., 2014)

해양생물의 생물량 조사와 분포 파악을 위한 음향시스템 활용은 국내연안 뿐만 아니라 남극해에서도 수행된바 있다. 1998-2006년 수행된 남극해 유용생물 자원 개발 연구의 일환으로 남극반도 주변의 크릴 생물량 분포를 음향시스템을 이용하여 관측하고 크릴 자원량을 추정하는 연구를 수행하였다 (김 등, 1998). 남극해 크릴의 생물량은 지난 10년간 큰 폭으로 변화하며 그 원인에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 남극해에 서식

하는 모든 해양동물들에게 가장 중요한 먹이며 동시에 어획대상이기 때문에 크릴 생물량의 변동을 관측하고 변화 원인을 이해하는 것은 남극해 자원 관리에 있어 매우 중요한 문제이다. 크릴 자원량의 증감에 영향을 미치는 주요 해양환경인자를 파악하기 위하여 음향 조사와 해양 환경 조사를 병행하였으며 크릴에서 발생하는 다중주파수의 평균 체적산란강도 차이를 이용하여 크릴만의 음향신호를 분리하였다. 특히 기존의 관측 자료를 기반으로 다양한 형태의 크릴 음향신호를 구분하여 크릴 군집의 형태와 해양환경과의 상관성을 연구하였다. CTD로 관측된 주요 해양환경 인자 (수온, 염분)의 수직/수평 분포를 함께 관측하여 크릴 분포와 해양환경 특성을 파악하였다. 크릴 생물량과 분포 변화는 서식처의 해양환경 특성과 월동기간 동안의 변동이 큰 영향을 미친다. 때문에 하계기간 크릴 분포와 생물량의 변화를 해양환경인자와 크릴 생물량의 상관관계를 인지하고 크릴의 주요 포식자인 펭귄의 번식 성공률에 미치는 영향을 확인하였다.

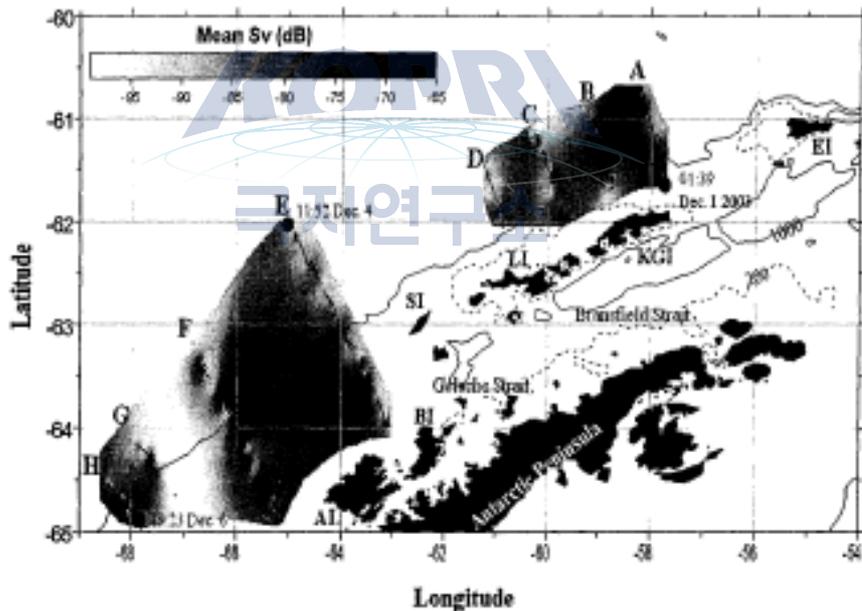


그림 4. 크릴 군집의 수평 분포 (2003년 12월 1일-6일)

음향시스템을 활용한 조사 방법은 어군 뿐만 아니라 해양생태계의 중요 연결 고리인 동물플랑크톤의 수직 운동과 생물량의 수평 분포 연구에도 활용되었다. 국내 주변해역에서는 대한해협과 동해에서 동물플랑크톤 군집으로부터 수신된 음향산란층의 신호를

이용하여 처음 동물플랑크톤의 수직 분포 변화를 관측하였다 (Na and Park, 1989; Kang and Na, 1994). 심해의 음향산란층은 전세계 해양에서 관측되는 현상으로 동물플랑크톤과 소형 어류로부터 산란된 음향신호가 연속적인 띠 모양으로 나타나는 현상으로 해양생물들의 일주기 수직 변화와 같은 시간에 따른 변동성을 파악할 수 있다. 그러므로 음향산란층을 연속 관측함으로써 주요 해양생물의 먹이 생태계내 역할을 이해하는데 활용할 수 있다. 동물플랑크톤의 수직 변동을 일으키는 주요 요인은 빛과 먹이 (Issacs et al., 1974; Mackas and Bohrer, 1976; Simrad et al., 1985; Peterson et al., 1990; Atkinson et al., 1996; Dagg et al., 1998), 포식자 회피 (Zaret and Suffern, 1976; Fancett and Kimmerer, 1985; Gliwicz, 1986; Bollens and Frost, 1991), 수온 변화에 따른 생물학적 대사를 (McLaren, 1963)이 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 국내 동물플랑크톤의 수직 변동 연구를 위한 장기 관측 자료가 매우 부족한 상황이며 현상 확인에 머물러 있기 때문에 해양생물과 해양환경과 상호 관계를 파악하기 위한 다학제적 연구가 필요하다.



제 2 절 국제수준

미국해양대기관리처 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 북동수산과학센터 (the Northeast Fisheries Science Center, NEFSC)는 미국 연안은 물론 전 세계 해양의 수산자원 연구를 수행하고 있는 대표 수산자원 연구 센터이다.

1998년 중층에 분포하는 주요 수산 어류 Atlantic herring (*Clupeaharengus*), Atlantic mackerel (*Scomberscombrus*)의 생물량 변동 파악을 위해서 수산음향 조사 프로그램을 처음 시작하였다. 이 프로그램은 Atlantic herring의 어업 활동 증가에 따른 생물량을 파악하고 어종 변동을 평가하기 위한 목적으로 개발되었다. 기존에는 저층 트롤 조사 결과를 Atlantic herring 생물량 변동 파악의 지표로 활용해 왔지만 중층에 분포하는 어종에 대한 샘플은 고려하지 못하였다. 음향시스템을 활용은 수층 생물량의 공간적인 분포 파악에 제한이 있는 전통적인 네트 채집 결과를 보완하며 수산자원 평가에 중요한 데이터를 제공할 수 있다. 초기 음향시스템을 활용한 연구는 1995-1997에 수행된 미국해양대기관리처의 연안 해양 프로그램에서 수행되었다. 연구 기간 동안 북동수산과학센터에서는 중층 트롤과 수중 영상 카메라를 처음 개발하여 Atlantic mackerel과 주요 수산 어종의 상대적인 생물량과 분포를 파악하는데 활용하였다. 이후 1998-2001 동안 위해 처음 생물음향시스템을 도입하여 Atlantic Herring 조사를 위한 연간 모니터링 조사를 시행하였다.

북동수산과학센터는 기술연구그룹을 창설하여 보다 정확한 수산자원량을 평가하고 향상시키기 위한 최첨단 음향/광학 기술력을 축적하였고 생물음향시스템의 활용성과 가능성을 파악하기 위해 선행 연구와 음향 실험이 1995-1997에 수행되었다. 북동수산과학센터의 음향조사는 음향도플러유속계 (acoustic Doppler current profiler), 트롤 모니터링 시스템, 전방향탐지 소나와 같은 음향시스템과 중층트롤, 생물 샘플링을 위한 플랑크톤 채집, 수중 영상 비디오와 해양환경 파악을 위한 conductivity-temperature-depth (CTD) 수직 구조 관측이 함께 수행되었다. 북동수산과학센터의 연구조사에서 가장 중요한 관측 장비는 심라드사의 EK500 에코사운더 (Scientific echo sounder) 이다. 심라드는 수산자원의 조사를 목적으로 EK500 에코 사운더 를 최초 개발하였다. EK500은 저전력 소모, 고

출력 파워, 거리 보상, 내구성이 좋은 음향센서, 다양한 주파수 (12 - 200 kHz)의 특성을 가지고 있으며 수산 연구와 평가에 전세계적으로 가장 널리 활용되고 있는 음향시스템이다. 1996년 알바트로스 (FR/V Albatross) 선저에 38과 120 kHz 음향센서를 부착하였고 1997년 12 kHz 음향센서를 추가 장착하였고 2002년에 12 kHz 음향센서는 18 kHz로 변경되었다.

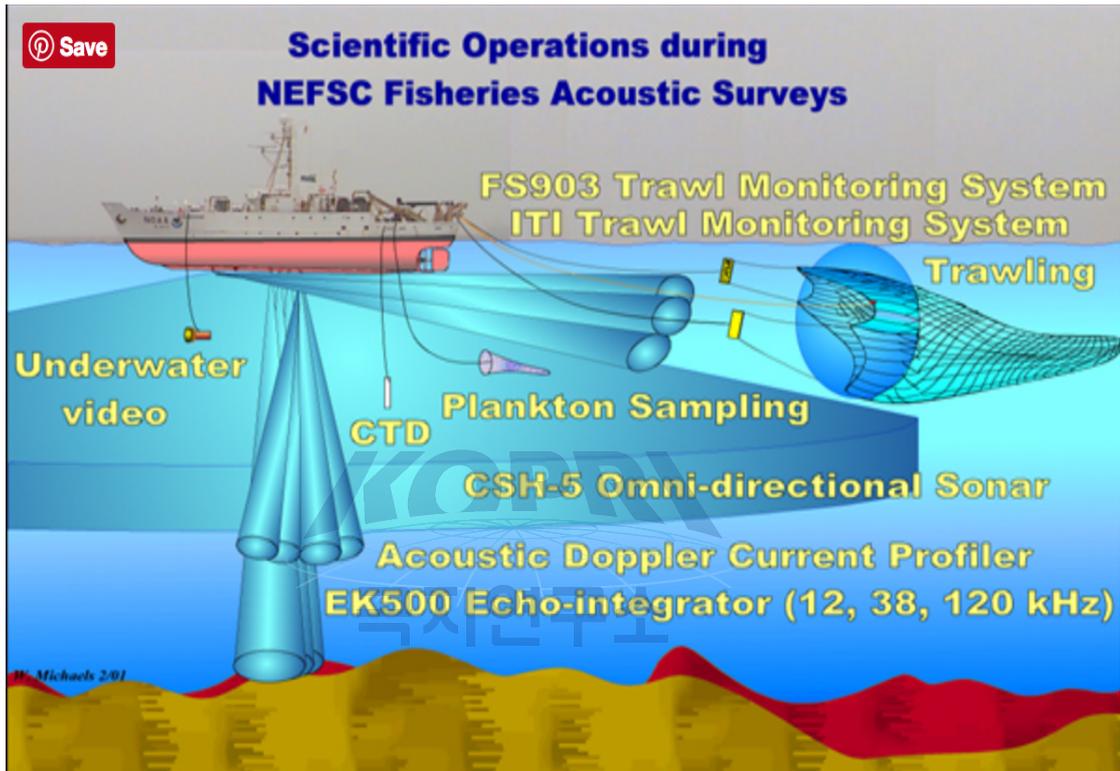


그림 5. 미국해양대기관리처 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 수산과학센터 (Northeast Fisheries Science Center, NEFSC)에서 운용하는 수산 음향조사 개념도 (<https://www.nefsc.noaa.gov>)

남극해 변화는 현 시점에서 인류 사회가 직접적으로 직면하고 있는 가장 큰 이슈인, 기후변화, 해양산성화, 그리고 해양자원 관리와 중요하게 연결되어 있다. 따라서 극지해의 해양환경 변화와 지속적인 관측은 남극해 환경변화의 원인과 결과를 관찰하고 예측하는데 중요한 기반이 된다. 중위영양단계는 해양생태계에서 중요한 연결 고리의 역할을 하며 상위영양단계에 큰 영향을 준다. 하지만 이들의 광범한 지역에 대한 생물량과 분포에 대한 정보는 여전히 부족한 실정이다. 프로젝트 The Southern Ocean Network of

Acoustics (SONA)는 남극해 생태계에서의 중위영양단계 연구를 목적으로 지속적인 장기 음향관측 전략을 시행하기 위해서 다수의 과학계와 산업계 파트너를 통합한 네트워크를 나타낸다. 음향관측은 경제적 효율성이 높은 관측 방법으로 중층생태계의 고해상도 수직/수평 데이터를 지역적, 광대역적 공간 분포와 시간에 따른 변화를 제공할 수 있다. 대부분의 과학적 연구 조사선과 많은 상업 어선은 현재 대부분 에코사운더가 장착되어 있다. 하지만 음향관측은 시스템의 표준화와 적합한 검증 없이는 과학적 연구에 사용할 수 없다. SONA는 이러한 시스템적 문제를 보완하기 위해서 음향데이터 처리 프로그램을 표준화하기 위한 절차를 개발하였다.

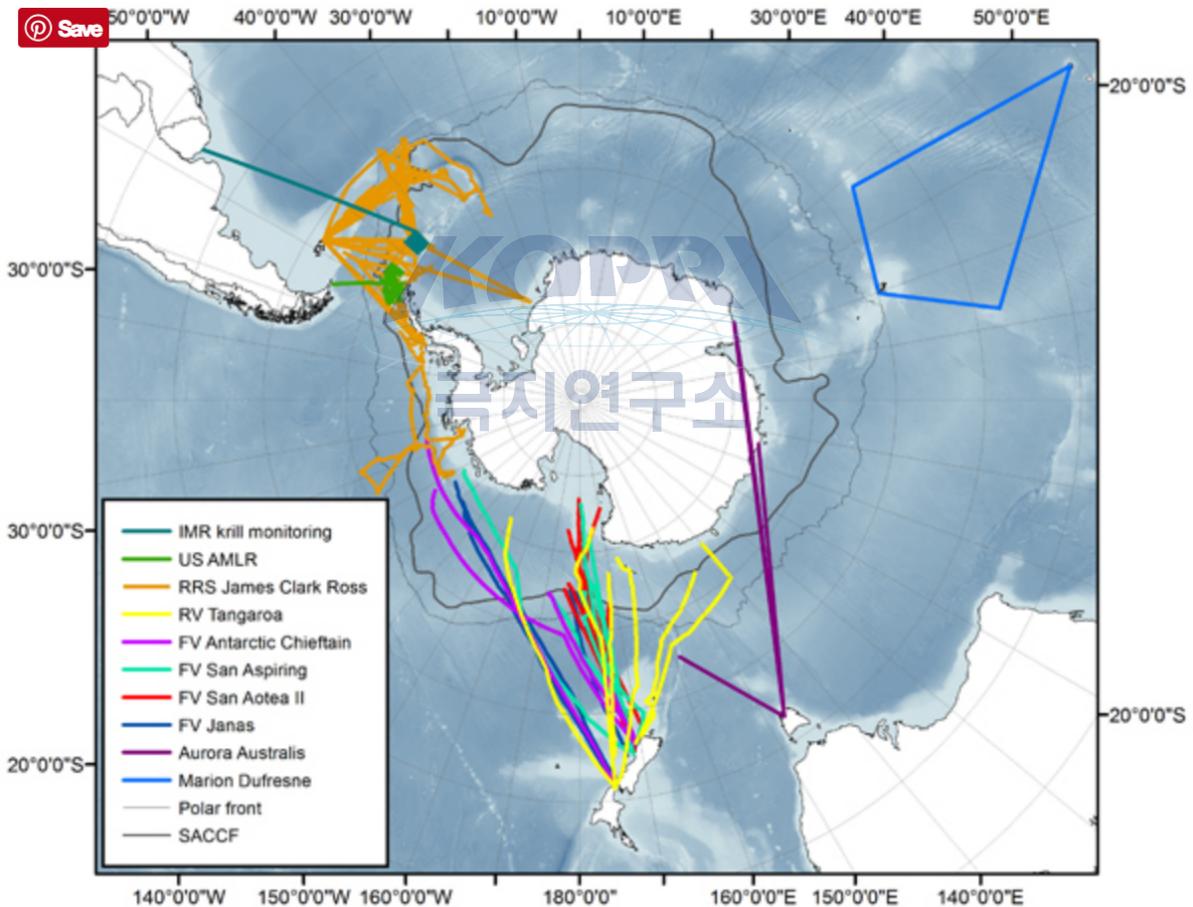


그림 6. 남극해 연구선과 상업어선의 운항경로. 관측된 모든 음향데이터는 Southern Ocean Network of Acoustics (SONA) 멤버 (호주, 영국, 노르웨이, 뉴질랜드, 프랑스, 미국)와 공유됨. (www.soos.aq)

SONA 파트너로써 유수의 국외 연구기관들 (Australian Antarctic Division, British Antarctic Survey, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Institute de recherche pour le developpement, Instittue of Marine Research, National Institute of Water and Atmospheric Research, National Oceanic and Atmospheric Administration)이 데이터 상호 교환과 호주 Integrated Marine Observing System (IMOS)와 같은 데이터베이스 센터 등록에 동의하였다. 음향센서 보정과 데이터 후처리 절차는 International Council for the Exploration of the Sea (ICES), the Convention for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR), IMOS 에 의해서 정리된다. 생물음향데이터 관련한 IMOS 데이터 분석은 로(raw) 음향데이터 파일의 센서 보정, 노이즈 제거, 음향신호 적분과 같은 음향데이터 처리에 매우 중요한 토대를 마련하였다.

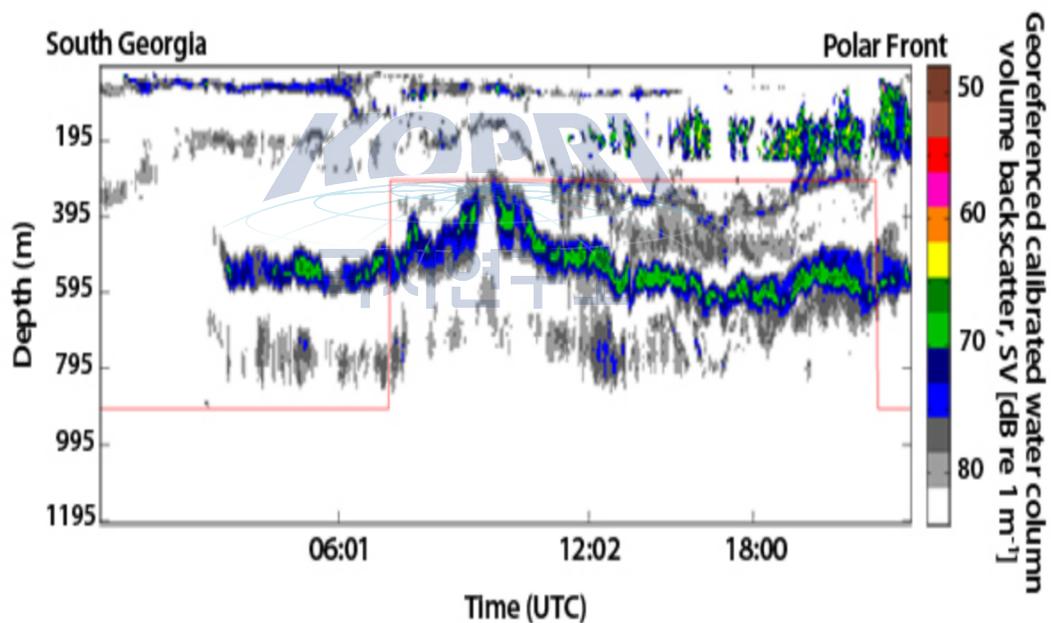


그림 7. 영국남극연구소 (British Antarctic Survey, BAS)의 RRS James Clark Ross 에서 획득한 생물음향데이터의 에코그램 (Echogram). 에코그램은 호주의 Integrated Marine Observing System (IMOS)의 데이터 처리기법으로 분석.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석

1. 서북극해 해양환경

북극해 해양환경의 물리, 생물, 화학적 변동성을 파악하기 위해서 “양극해 환경변화 이해 및 활용연구 (PM16040)와 북극해 환경변화 통합관측 및 활용연구 (PM17040)”에서 지난 3년 동안 획득한 데이터를 수집/분석하였다. 연구지역은 태평양과 북극해의 유일한 연결 통로인 베링 해협과 수심이 100 m 이내의 대륙붕 지역인 척치해 그리고 척치해 북부의 북극해 지역을 포함하는 광범위한 지역을 조사하였다. 북극해는 최근 지구 온난화의 영향으로 해빙 면적이 급격히 줄어들고 있으며 (IPCC, 2007) 그에 따른 표층 수온 상승과 해양 산성화 또한 빠르게 북쪽으로 진행되고 있다. 또한 북극항로 개발의 가능성에 따른 경제적인 중요성 때문에 전 세계적으로 많은 주목을 받고 있는 지역이다. 해빙 면적 감소가 지속될 경우 북극해 해양환경 변화와 해양생태계 반응에 대한 과학적 이해는 반드시 선행되어야 한다.

북극의 지역적 특이성에 기인한 다양한 형태의 물리적 특성으로 인해 여러 유형의 해류 및 수괴가 존재하며, 이로부터 생물, 화학적 인자들의 계절적 변동 및 년 변화가 크게 나타나는 북극 해양생태계에서 중요한 역할을 하는 곳 중의 하나이다. 베링 해협을 통해서 유입되는 태평양 기원의 수괴 (water mass)는 북극해 수온약층을 강화시키고 북극해 해양생태계에 영양분을 공급한다 (Woodgate et al., 2005). 태평양기원의 수괴는 크게 세가지의 경로를 통해서 북극해로 유입되는 것으로 알려져 있다 (Nikolopoulos et al., 2009). 알래스카 연안을 따라 흐르는 Alaska Coastal Current, 베링해 대륙붕지역을 통과하는 Bering Shelf Current, 러시아쪽 (베링해 서쪽경계)을 따라 흐르는 Anadyr Current가 온도 및 염분의 특성으로 뚜렷하게 구분이 된다. 북극해로 유입되는 태평양 유입수는 지형에 따라서 세 지역으로 나뉘어서 척치해 (Chukchi Sea)를 지나 북극해로 진행한다. 가장 서쪽으로 흐르는 해류는 헤럴드 협곡 (Herald canyon)을 지나

북쪽으로 이동하고 알래스카 연안을 따라서 가장 동쪽으로 흐르는 해류는 베로우 협곡 (Barrow canyon)을 통해서 캐나다 분지 (Canada Basin)로 이동한다. 그리고 헤럴드 턱 (Herald shoal) 동쪽 편을 지나 북극해로 유입되는 중앙 해류가 있다. 하지만 베링해 통과 후, 척치해와 캐나다분지에서 북극해 주변 대륙에서 공급되는 막대한 담수 (지구 전체의 약 10%)와 혼합되는 과정에서 어떻게 변형되며 시공간적으로 어떻게 변하는지에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않아 종합적인 연구가 필요하다. 본 과제 수행을 위해서 동물플랑크톤이 서식하는 서북극 주변 해역의 해양환경에 대한 이해가 필수적이기 때문에 최근 3년 동안 관측된 해양물리/화학/생물 관측 데이터를 분석하고자 한다.



2. 관측방법

현장 조사는 2014 - 2016년 8월의 관측 데이터를 활용하였으며 매년 نوم (Nome, 64° 30'14"N, 165° 23'58"W)을 출발하여 베링 해협을 지나 북극해 방향으로 이동하며 수행하였다 (그림 8). 베링 해협과 척치해역은 대부분 미국과 러시아의 배타적 경제 수역에 포함되기 때문에 하나의 긴 정점 관측에 대한 조사만 가능하였으며 척치해 북부의 북극해에서는 공해상에서 정점 관측을 수행하였다. 북극해 연구 항해는 2010년부터 매년 수행되었지만 2014 - 2016 기간에 베링 해협부터 북극해 주변까지 연구 정점이 유사하게 분포 하고 있어 공간 분포의 시간에 따른 변화를 파악할 수 있는 장점이 있다. 특히 척치해 지역은 다양한 수괴들이 존재하며 생물 생산성이 높은 지역으로 생물학적으로 매우 중요한 지역 (Biological hot spot)으로 알려져 있다. 남북으로 이루어진 정점은 서북극해 환경과 동물플랑크톤 군집의 위도별 분포 특성을 파악하기 용이하다. 또한 하계 기간 해빙이 넓게 분포하는 북극해 주변의 정점은 동시베리아 부근에 위치한 서쪽과 동쪽의 캐나다 분지 (Canada basin) 주변 정점으로 나눌수 있어 서북극해 서쪽과 동쪽의 해양환경과 동물플랑크톤 분포 변동을 확인하는데 용이하다.

가. 해양물리 인자

연구해역의 물리 해양환경을 파악하기 위한 가장 기본적인 자료는 CTD (Sea-Bird, SBE 911 plus)를 이용하였다. 수 층별 식물플랑크톤과 영양염과 같은 생물 화학적 자료는 CTD로 수층 구조를 확인 후 20리터 로젯 샘플러 (rosette sampler)를 이용하여 해당 수심에서 해수를 채수하였다. CTD 프레임에 설치된 관측 센서는 수온, 전도도, 압력을 측정하는 기본 센서 이외에, 광량을 측정하는 Irradiance (PAR) 센서, 엽록소 양을 나타내는 fluorometer, 용존 산소량을 측정하는 Dissolved oxygen 센서 등이었다. CTD와 로젯 샘플러는 표층부터 해저면까지 전 수층에 대한 데이터를 획득에 사용되었다. 조사 정점은 총 30 - 39개로 이루어졌으며 동물플랑크톤 채집을 위한 네트는 16 - 28 개 정점에서 수행되었다. 본 연구에서는 동물플랑크톤 군집의 공간 분포와 환경과의 상관성을 파악하기 위해서 네트 채집이 수행된 정점의 CTD 데이터를 분석하였다. CTD로 관측된 환경 자료

는 하강하는 자료만을 이용하였으며 노이즈 제거를 위해 구간 여과 (window filter)를 적용하고 구간의 크기를 1 m 간격으로 평균하였다. CTD 자료 분석은 SeaBird사의 사용자 매뉴얼 (SeaBird, 2008)에 자세기 기술되어 있다.

나. 해양화학 인자

해양화학적 인자는 로켓 샘플러로 채수한 해수로 부터 질산염+아질산염 (NO_2+NO_3), 암모니아 (NH_4), 인산염 (PO_4), 규산염 (SiO_2) 시료를 획득, 분석하였다. 50 ml 튜브에 샘플한 시료는 즉시 냉장 보관한 후 48 시간 이내에 현장에서 분석하였다. 일차 분석 후에는 추가 분석을 냉동 보관하였다. 샘플한 영양염 샘플은 아라온호에 설치되어 있는 영양염 자동 분석기 (SEAL, QuAAtro)를 이용하여 분석하였다. 영양염 분석 채널이 4개로 제한되어 인산염, 규산염 외에 질산염과 아질산염은 분리하지 않고 측정하였다. 각각의 성분 분석을 위한 표준 물질은 관측때 마다 새로 만들었으며 자동 시료 공급 장치를 이용하여 90초 간격으로 시료를 측정하였다. 각각의 성분별 분석 방법은 QuAAtro multitest methods와 전통적인 흡광분석 방법을 따랐다.

다. 해양생물 인자

식물플랑크톤의 엽록소는 수심 100 m 이내의 유광층 수심에서 4 - 6 개를 선정하여 획득하였으며 각각 1 리터 해수를 채취하여 Whatman GF/F glass fiber filters (24 mm)에 여과하여 총 엽록소 a를 분석하였다. 여과가 끝난 필터들은 90% 아세톤을 넣어 24 시간 냉장 보관한 후 원심분리 (centrifuge) 하였다. 엽록소 a 농도는 fluorometer (Trilogy model)를 사용하여 측정하였다.

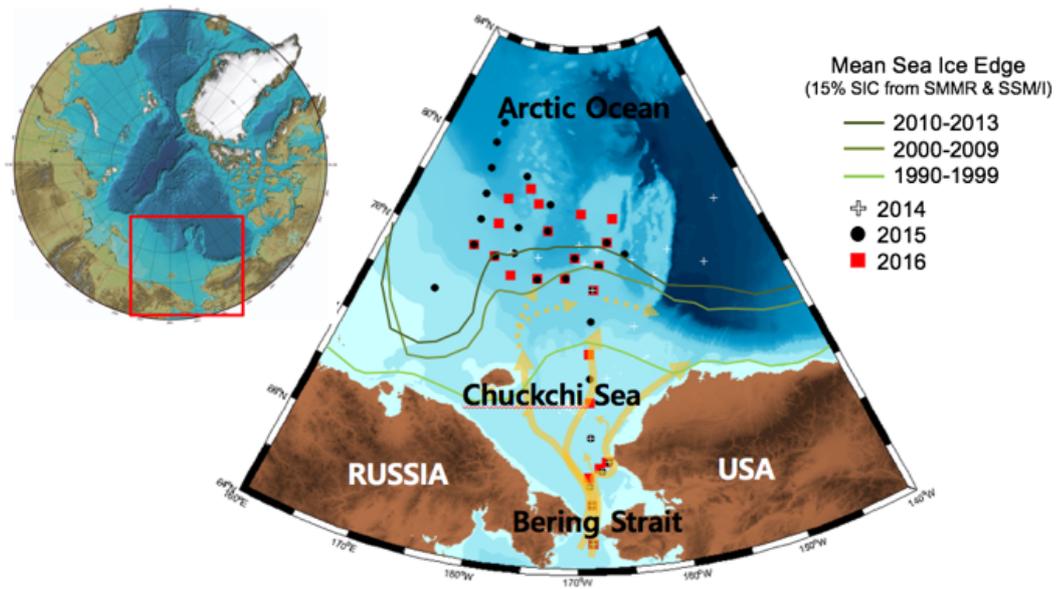


그림 8. 서북극해 해저지형과 하계 기간 (2014 - 2016년 8월) 수행한 해양환경 관측 정점. 녹색 실선들은 하계기간 평균 해빙 경계가 시간에 따라서 북쪽으로 이동하는 변화를 보여주며 노란색 굵은 실선은 북극해로 유입되는 태평양 기원수의 주요 경로를 나타냄



3. 연구결과

서북극해 수괴의 존재와 특성은 수온-염분 그래프 (T-S diagram)로 파악할 수 있다 (그림 9). 서북극해에서 기존에 관측된 전형적인 T-S diagram 이며 Itoh et al. (2007)가 제안한 수온과 염분의 기준으로 구분할 경우 총 6개의 수괴를 인지할 수 있다; ACW: Alaskan coastal water (2 - 10 °C/ 21 - 32 psu), BSW: summer Bering sea water (-1 - 10 °C/ 32 - 32.8 psu), PSW: Pacific summer water (-1 - 2 °C/ 30 - 32 psu), PWW: Pacific winter water (-2 - -1 °C/ 31.5 - 36 psu), AW: Atlantic water (-1 - 10 °C/ 32.8 - 36 psu), MW: Surface melt water (-2 - 2 °C/ 21 - 30 psu). 특징적으로 높은 수온의 ACW와 BSW, 가장 낮은 염분의 MW, 하계 기간 태평양에서 만들어 유입되는 PSW와 겨울철에 형성되어 유입되는 PWW, 마지막으로 대서양 기원의 수괴로 북쪽에서 유입되는 AW가 분포함을 확인할 수 있다. 수온과 염분의 수직 구조에서도 수괴의 특성을 확인할 수 있다 (그림 10-11). 60 m 이내의 표층에서는 ACW, BSW, 그리고 MW가 주로 분포하였으며 ACW와 BSW는 대체적으로 약 1 °C 이상의 높은 수온과 31 이상의 높은 염분 값이 나타났다. ACW가 BSW에 비해 고온/저염의 특성을 보였으며 하계 기간 알래스카 주변 하천으로부터 유입되는 담수의 영향으로 판단되며 러시아쪽 베링해 서쪽 경계를 따라서 흘러 들어오는 저온/고염의 특성을 갖는 Anadyr water가 BSW에 영향을 미치기 때문일 것으로 판단할 수 있다. MW의 경우 수온은 < 0 °C 로 일정하게 낮게 관측된 반면 염분은 29 - 33 psu 범위에서 변동성이 크게 나타났다. PSW는 MW 아래 수심부터 약 100 m 이내에 분포하는 경향을 보였으며 3년 모두 수심 50 - 70 m에서 가장 높은 수온 값이 나타났다. PWW 또한 MW 아래에 분포하였으며 수심 200 m 까지 가장 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 2014년은 수심 40 m 이후부터 관측된 반면 2015, 2016년에는 수심 20 m 까지 분포 경향을 확인하였다. 마지막으로 상대적으로 태평양 기원의 수괴 보다 깊은 수심에 분포하는 대서양 기원의 AW는 2014년에는 관측되지 않은 반면 2015, 2016년에는 수심 140 m 이상의 깊은 수심에서 확인되었다. 2014년의 경우 관측 정점이 2015, 2016년에 비해서 동쪽으로 치우쳐 있기 때문에 서북극해 서쪽의 깊은 수심으로부터 척치해로 흐르는 대서양 기원의 수괴가 영향을 미치기 어렵기 때문이다.

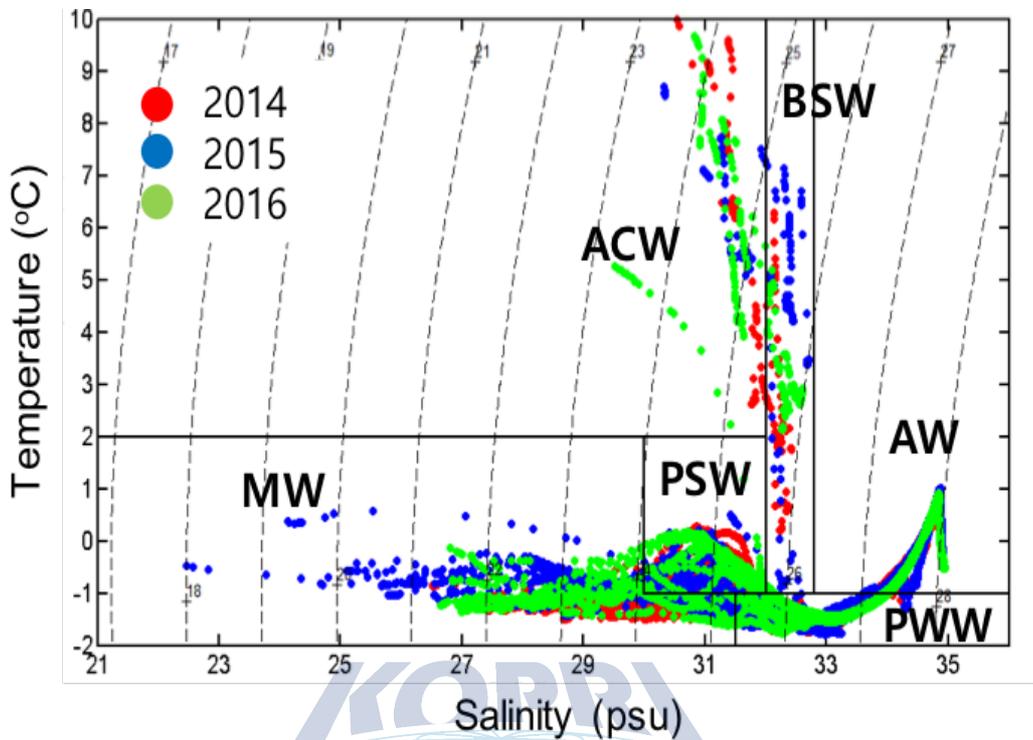


그림 9. 수온-염분 그래프 (T-S diagram). 2014-2016년 동안 관측된 조사 해역의 수층 물리 환경을 나타냄. 조사해역 내 총 6개의 다른 기원의 수괴가 분포 하였으며 Itoh et al., 2007에 근거하여 수온과 염분을 기준으로 수괴를 분리 함. ACW: Alaskan coastal water (2 - 10 °C/ 21 - 32 psu), BSW: summer Bering sea water (-1 - 10 °C/ 32 - 32.8 psu), PSW: Pacific summer water (-1 - 2 °C/ 30 - 32 psu), PWW: Pacific winter water (-2 - -1 °C/ 31.5 - 36 psu), AW: Atlantic water (-1 - 10 °C/ 32.8 - 36 psu), MW: Surface melt water (-2 - 2 °C/ 21 - 30 psu).

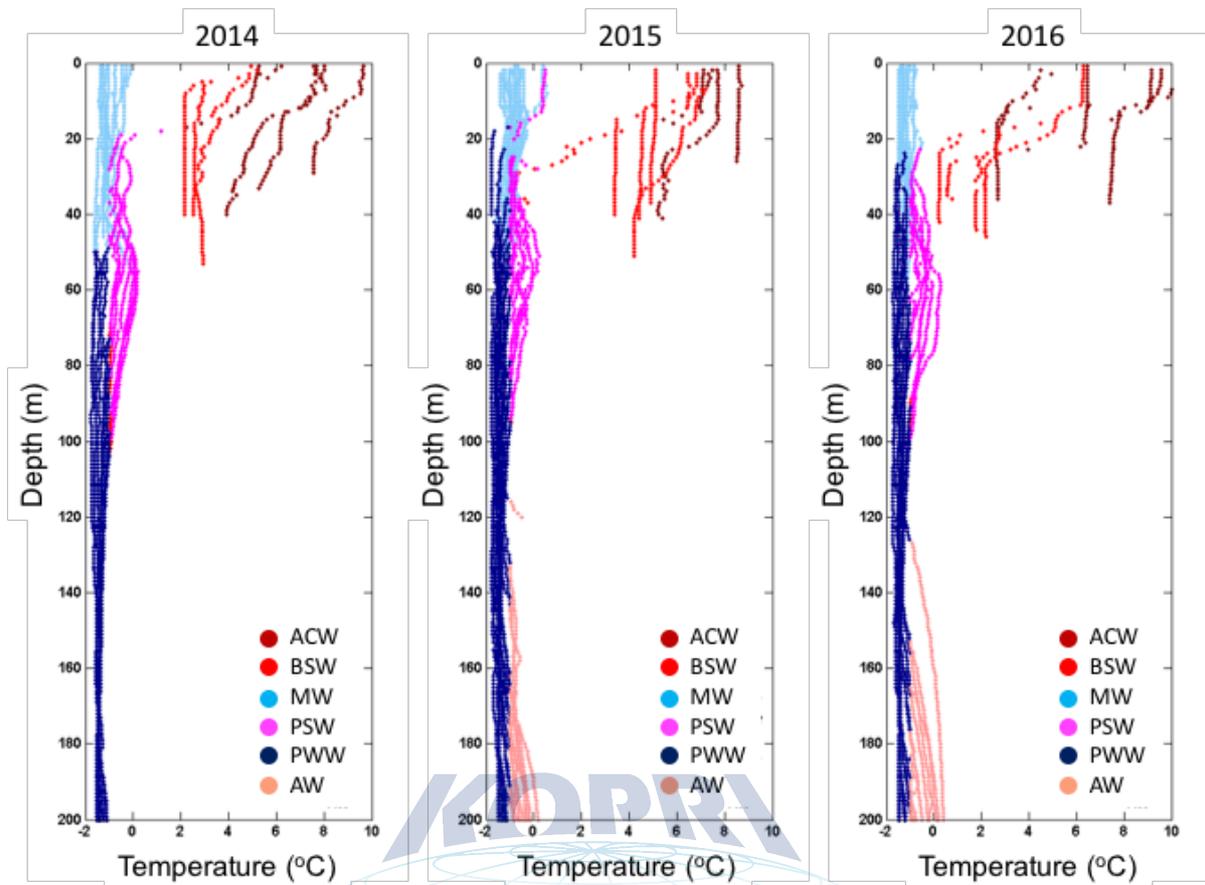


그림 10. 서북극해 8월 6개의 수괴로 구분된 수직 수온 구조 (0 - 200 m). ACW: Alaskan coastal water, BSW: summer Bering sea water, PSW: Pacific summer water, PWW: Pacific winter water, AW: Atlantic water, MW: Surface melt water.

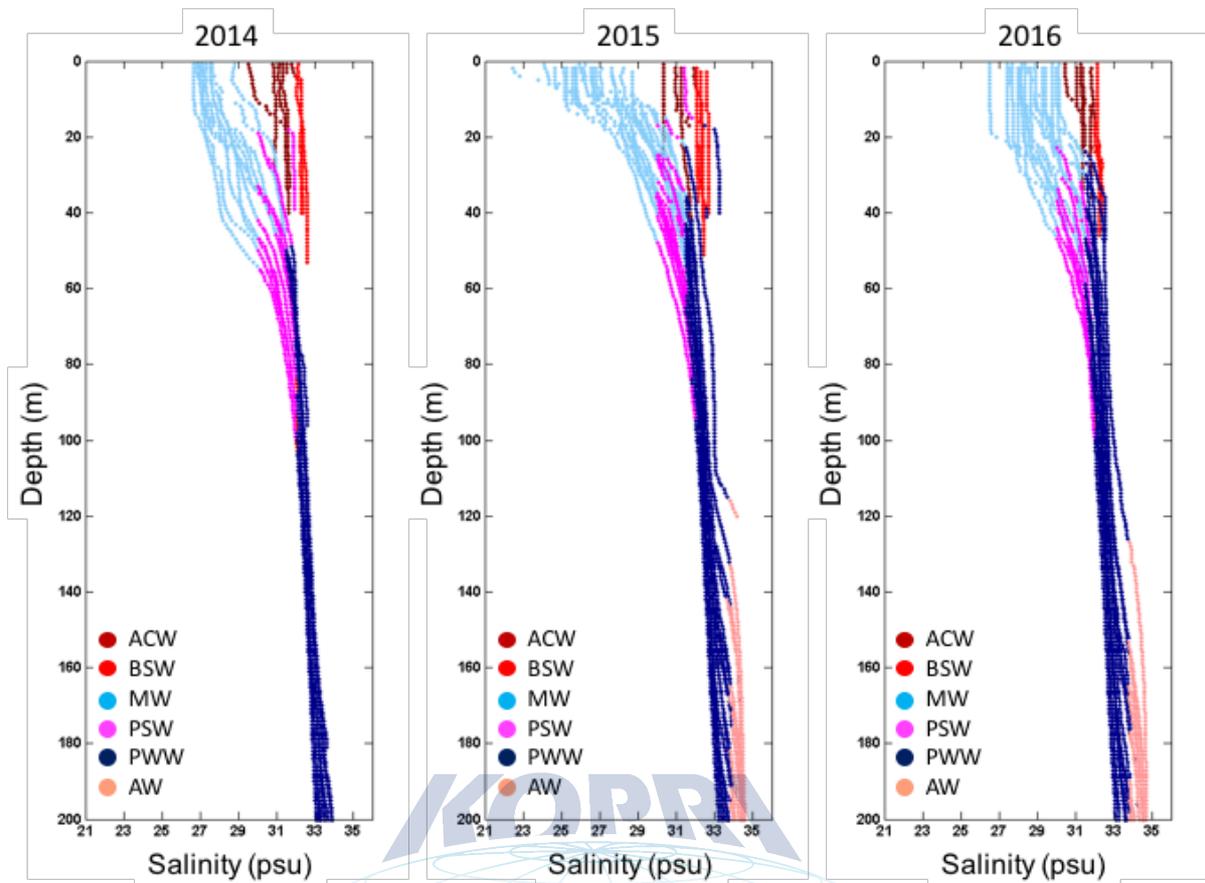


그림 11. 서북극해 8월 6개의 수괴로 구분된 수직 염분 구조 (0 - 200 m). ACW: Alaskan coastal water, BSW: summer Bering sea water, PSW: Pacific summer water, PWW: Pacific winter water, AW: Atlantic water, MW: Surface melt water.

2014년 19개 정점 사이의 수층 해양환경 (물리/생물/화학)의 수직/수평 분포를 확인하였다 (그림 12). 수온은 지리적인 환경 (수심 < 100 m 의 대륙붕 지역과 100 m 이상의 외해)에 따라서 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 표층 수온의 경우 정점 13을 기준으로 약 10 °C 이상의 수온 변화가 나타났다. 수심이 낮은 베링 해협과 척치해 (정점 1 - 13)에서는 ACW와 BSW가 전층 우점하면서 수온이 최대 10 °C 까지 관측되었다. 북극해 주변 해역 (정점 15 - 32)에서는 지역적인 차이가 있지만 전체적으로 수심 60 m 이내의 표층에서 0 °C 이하의 MW가 관측되었다. 북극해 캐나다 분지에 가까운 정점 15 - 24에서는 PSW가 MW 아래 50 - 100 m 수심에서 뚜렷하게 관측된 반면 상대적으로 북극해 서쪽에 위치한 정점에서는 MW와 PSW의 층이 뚜렷하게 구분되지 않았다. 북극해 주변에서는 PWW의 비율이 눈에 띄게 높게 나타났으며 깊은 수심에 분포하는 AW는 관측되지 않았다. 염분 또한 정점 13을 기준으로 뚜렷하게 구분되었다. 베링 해협과 척치해에서는 수심에 따른 차이 없이 전 수층에서 31 psu 이상의 고염의 수괴가 분포하는 반면 북극해 주변의 정점에서는 MW에 의해 수심 약 50 m 이내에서 염분약층이 형성되어 50 m 이내 표층에서는 31 psu 이하의 저염의 수괴가 관측되었고 50 - 200 m 수층에서는 31 psu 이상의 고염의 수괴가 관측되었다. 염분에 의해서 형성된 염분약층의 수심은 북극해 동쪽 부근의 정점 (15 - 24)에서 서쪽 지역의 정점에 비해 약 20 - 30 m 깊게 나타났다. 북극해 염분약층 수심의 차이는 용빙의 지역적 차이가 원인으로 판단되며 관측 데이터로부터 북극해 동쪽 지역이 서쪽에 비해 해빙이 없는 지역이 많기 때문에 바람에 의한 표층 혼합이 활발하게 일어나서 염분약층의 수심이 깊어지는 것으로 추정할 수 있다. 반면 용빙이 활발하지 않은 서쪽 지역의 경우 하계 기간 해빙이 녹기 시작하면서 염분이 낮은 담수의 유입에 따른 성층화가 발생하여 염분약층의 수심이 얕게 형성되는 것으로 판단된다. 밀도 변화는 염분 변화와 동일한 패턴을 확인할 수 있다. 용존 산소 농도는 전체적으로 표층에서 높게 관측되었고 베링 해협 정점 1의 표층에서 가장 높게 관측되었다. 용존산소 농도가 표층에 비해 저층에서 낮게 나오는 이유는 박테리아 생산성이 높은 저층에서 입자성 물질을 분해하면서 상대적으로 많은 용존산소를 소모하기 때문인 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 생물량에 해당되는 엽록소량은 대륙붕 전층에서 약 10 ug/l으로 높게 관측되었으며 가장 동쪽 정점인 17, 19 정점에서 가장 낮은 생물량을 확인하였다. 수심이 낮은 베링 해협과 척치해에서는 엽록소 최대층 (Subsurface chlorophyll maximum layer)이 구분되지 않은 반면 수심 100 m 이상의 깊은 북극해 부

근에서는 30 - 70 m 부근에서 뚜렷한 엽록소 최대층이 확인되었다. 북극해 동서 방향을 비교했을 때 엽록소 최대층은 관측 해역의 동쪽에서 약 20 m 깊게 형성되었으며 엽분 약층의 수심 분포와 매우 유사한 경향을 보였다. 인산염, 질산염+아질산염, 그리고 규산염 농도는 각각 0 - 2.1 $\mu\text{M/L}$, 0 - 20 $\mu\text{M/L}$, 0 - 50 $\mu\text{M/L}$ 범위로 분포하고 있었으며 표층 보다 저층에서 높은 농도를 보였다. 특히 북극해 주변 정점에서는 전체적으로 엽록소 최대층을 기준으로 이들 영양염 농도가 큰 차이가 나타났다. 엽록소 최대층 보다 얕은 수심에서는 낮은 농도를 깊은 수심에서는 높은 농도로 존재함을 확인하였다. 해빙의 용빙에 의한 표층 성층화에 의한 표층 영양염 농도가 전반적으로 낮게 관측된 것으로 판단되며 엽록소 최대층에서는 식물플랑크톤에 의한 영양염 소비가 높아져 저층에 비해 낮은 영양염 분포가 나타난 것으로 판단된다.



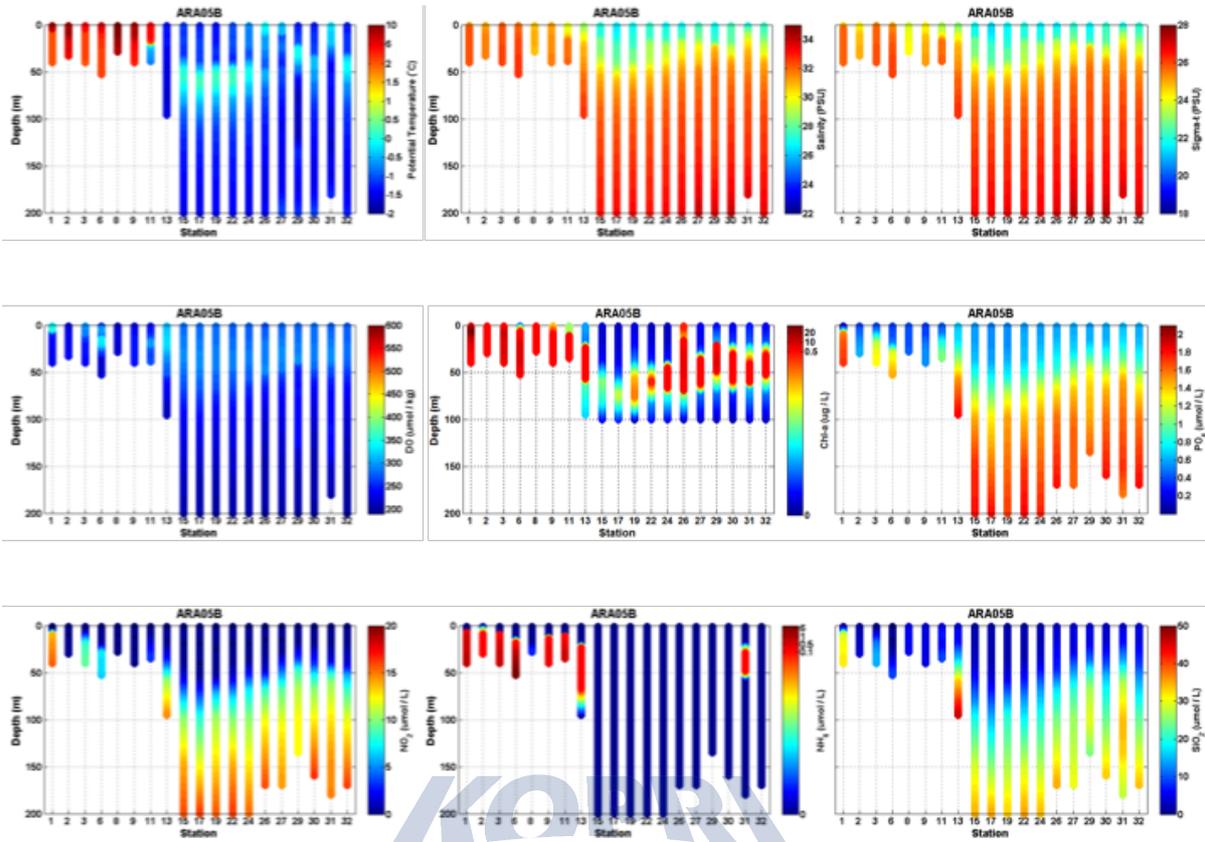


그림 12. 2014년 서북극해 해양환경 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 인산염, 질산염+아질산염, 암모니아, 규산염)의 수직 분포.

2015년 28개 정점 사이의 수층 해양환경 (물리/생물/화학)의 수직/수평 분포를 확인하였다 (그림 13). 수온은 2014년과 동일하게 지리적인 환경 (수심 < 100 m 의 대륙붕 지역과 100 m 이상의 외해)에 따라서 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 표층 수온의 경우 정점 13을 기준으로 약 10 °C 이상의 수온 변화가 나타났다. 수심이 낮은 베링 해협과 척치해 (정점 1 - 11)에서는 ACW와 BSW가 전층 우점하면서 수온이 최대 10 °C 까지 관측되었다. 대륙붕단에 해당되는 정점 13과 동시베리아와 가장 가까운 정점 20에서는 0.5 - 1 °C 범위의 MW와 PSW와 공존하며 아래층에는 PWW가 나타나는 경향을 보였다. 북극해 주변 해역 (정점 14 - 39)에서는 지역적인 차이가 있지만 전체적으로 -2 - 1 °C 의 수온 분포가 관측되었다. 정점 15, 29, 31, 32, 38, 39에서는 PSW가 40 - 80 m 수심에서 뚜렷하게 관측된 반면 그이외의 정점에서는 PSW가 뚜렷하게 구분되지 않았다. 정점 16, 18, 21 - 26 사이에서는 AW가 160 m 이상의 수심에서 관측되었다. 염분 또한 정점 13을 기준으로 뚜렷하게 구분되었다. 베링 해협과 척치해에서는 수심에 따른 차이 없이 전 수층에서 31 psu 이상의 고염의 수괴가 분포하는 반면 북극해 주변의 정점에서는 MW에 의해 수심 약 40 m 이내에서 염분약층이 형성되어 염분약층 이내에서는 31 psu 이하의 저염의 수괴가 관측되었고 염분약층 이후 50 - 200 m 수층에서는 31 psu 이상의 고염의 수괴가 관측되었다. 염분에 의해서 형성된 염분약층의 수심은 북극해 동쪽 부근의 정점 (31 - 39)에서 서쪽 지역의 정점에 비해 약 10 m 깊게 나타났다. 북극해 염분약층 수심의 차이는 용빙의 지역적 차이가 원인으로 판단되며 관측 데이터로부터 북극해 동쪽 지역이 서쪽에 비해 해빙이 없는 지역이 많기 때문에 바람에 의한 표층 혼합이 활발하게 일어나서 염분약층의 수심이 깊어지는 것으로 추정할 수 있다. 반면 용빙이 활발하지 않은 서쪽 지역의 경우 하계 기간 해빙이 녹기 시작하면서 염분이 낮은 담수의 유입에 따른 성층화가 발생하여 염분약층의 수심이 얇게 형성되는 것으로 판단된다. 밀도 변화는 염분 변화와 동일한 패턴을 확인할 수 있다. 용존산소 농도는 전체적으로 표층과 염분약층 사이에서 350 $\mu\text{mol/kg}$ 이상 높게 관측되었고 베링 해협 정점 13의 20 m 수심에서 가장 높게 관측되었다. 용존산소 농도가 표층에 비해 저층에서 낮게 나오는 이유는 박테리아 생산성이 높은 저층에서 입자성 물질을 분해하면서 상대적으로 많은 용존산소를 소모하기 때문인 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 생물량에 해당되는 엽록소량은 대륙붕 전층에서 약 10 $\mu\text{g/l}$ 이상 높게 관측되었으며 15 정점에서 가장 낮은

생물량이 관측되었다. 수심이 낮은 베링 해협과 척치해에서는 엽록소 최대층 (Subsurface chlorophyll maximum layer)이 구분되지 않은 반면 수심 100 m 이상의 깊은 북극해 부근에서는 30 - 60 m 부근에서 뚜렷한 엽록소 최대층이 확인되었다. 북극해 동서 방향을 비교했을 때 엽록소 최대층은 관측 해역의 동쪽에서 약 30 m 깊게 형성되었으며 엽분 약층의 수심 분포와 매우 유사한 경향을 보였다. 인산염, 질산염+아질산염, 그리고 규산염 농도는 각각 0 - 2.1 $\mu\text{M/L}$, 0 - 20 $\mu\text{M/L}$, 0 - 50 $\mu\text{M/L}$ 범위로 분포하고 있었으며 표층 보다 저층에서 높은 농도를 보였다. 특히 북극해 주변 정점에서는 전체적으로 엽록소 최대층을 기준으로 이들 영양염 농도가 큰 차이가 나타났다. 엽록소 최대층 보다 얇은 수심에서는 낮은 농도를 깊은 수심에서는 높은 농도로 존재함을 확인하였다. 해빙의 융빙에 의한 표층 성층화에 의한 표층 영양염 농도가 전반적으로 낮게 관측된 것으로 판단되며 엽록소 최대층에서는 식물플랑크톤에 의한 영양염 소비가 높아져 저층에 비해 낮은 영양염 분포가 나타난 것으로 판단된다. 2014년과 비교해서 엽분약층 아래 영양염의 농도가 높게 나타나는 특징을 보였다.



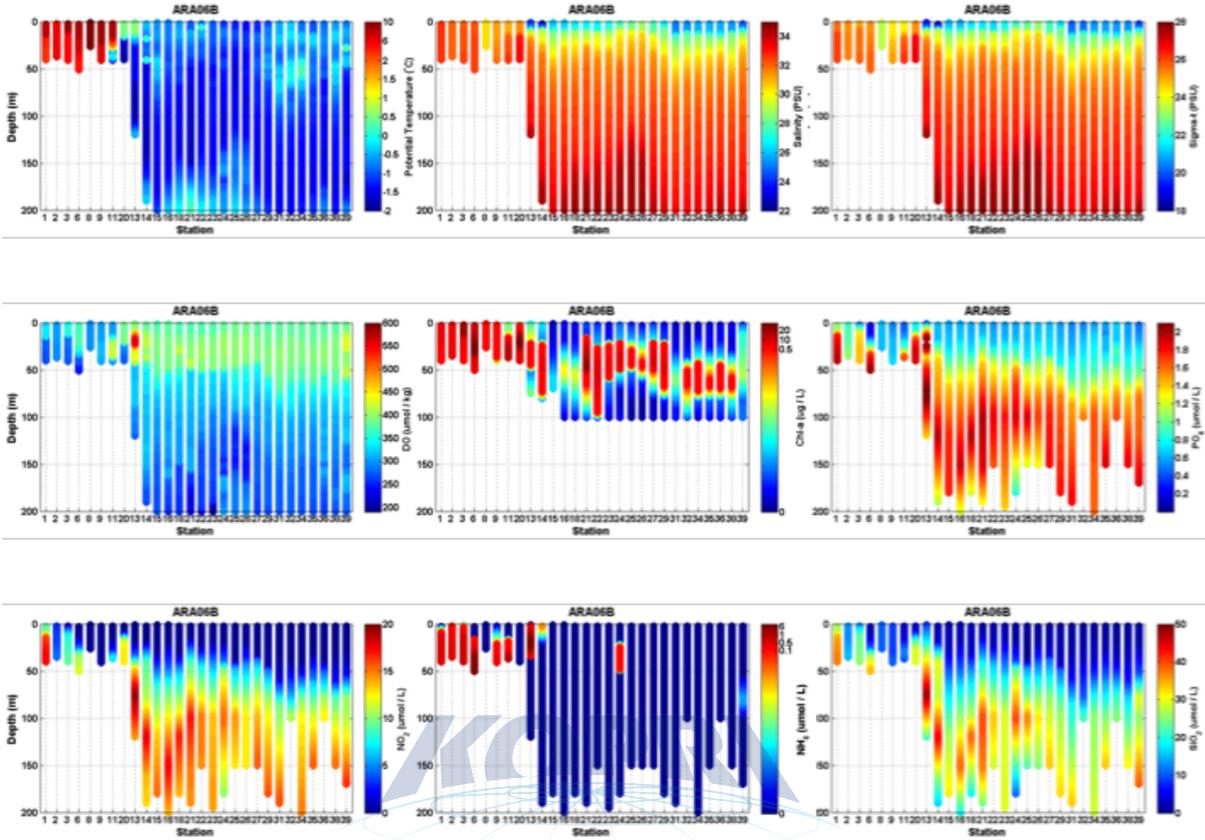


그림 13. 2015년 서북극해 해양환경 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 인산염, 질산염+아질산염, 암모니아, 규산염)의 수직 분포.

2016년은 2015년과 유사한 정점에서 관측하였으며 23개 정점 사이의 수층 해양환경 (물리/생물/화학)의 수직/수평 분포를 파악하였다 (그림 14). 수온은 지난 두해와 동일하게 지리적인 환경 (수심 < 100 m 의 대륙붕 지역과 100 m 이상의 외해)에 따라서 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 표층 수온의 경우 정점 12을 기준으로 약 10 °C 이상의 수온 변화가 나타났다. 수심이 낮은 베링 해협과 척치해 (정점 1 - 10)에서는 ACW와 BSW가 전층 우점하면서 수온이 최대 10 °C 까지 관측되었다. 반면 대륙붕 지역이긴 하지만 정점 12에서 수온이 0 °C 이하로 급격히 떨어지는 경향이 나타났다. 북극해 주변 해역 (정점 14 - 31) 에서는 지역적인 차이가 있지만 전체적으로 -2 - 1 °C 의 수온 분포가 관측되었다. 정점 15, 22 - 30 에서는 PSW가 40 - 80 m 수심에서 뚜렷하게 관측된 반면 그이외의 정점에서는 PSW가 뚜렷하게 구분되지 않았다. 정점 15 - 22 사이에서는 AW가 160 m 이상의 수심에서 관측되었다. 염분 또한 정점 12을 기준으로 뚜렷하게 구분되었다. 베링 해협과 척치해에서는 수심에 따른 차이 없이 전 수층에서 31 psu 이상의 고염의 수괴가 분포하는 반면 북극해 주변의 정점에서는 MW에 의해 수심 약 50 m 이내에서 염분약층이 형성되어 염분약층 이내에서는 31 psu 이하의 저염의 수괴가 관측되었고 염분약층 이후 50 - 200 m 수층에서는 31 psu 이상의 고염의 수괴가 관측되었다. 염분에 의해서 형성된 염분약층의 수심은 북극해 서쪽 부근의 정점 17 - 22에서 30 m 이내로 가장 얇게 형성되었으며 북극해 서쪽 지역에 해빙 농도가 상대적으로 높기 때문에 해빙의 용빙에 의한 염분약층 수심이 얇게 형성된 것으로 판단된다. 밀도 변화는 염분 변화와 동일한 패턴을 확인할 수 있다. 용존산소 농도는 전체적으로 표층과 염분약층 사이에서 350 $\mu\text{mol/kg}$ 이상 높게 관측되었고 베링 해협 정점 1과 12 20 m 수심에서 500 $\mu\text{mol/kg}$ 이상의 높은 농도가 관측되었다. 용존산소 농도가 표층에 비해 저층에서 낮게 나오는 이유는 박테리아 생산성이 높은 저층에서 입자성 물질을 분해하면서 상대적으로 많은 용존산소를 소모하기 때문인 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 생물량에 해당되는 엽록소량은 대륙붕 전층에서 약 10 $\mu\text{g/l}$ 이상 높게 관측되었다. 수심이 낮은 베링 해협과 척치해 (정점 1 - 12)에서는 엽록소 최대층 (Subsurface chlorophyll maximum layer)이 구분되지 않은 반면 수심 100 m 이상의 깊은 북극해 부근에서는 30 - 60 m 부근에서 뚜렷한 엽록소 최대층이 확인되었다. 엽록소 최대층은 염분 약층의 수심 분포와 매우 유사한 양의 상관성을 보였다. 인산염, 질산염+아질산염, 그리고 규산염 농도는 각각 0 - 2.1 $\mu\text{M/L}$, 0 - 20 $\mu\text{M/L}$, 0 - 50 $\mu\text{M/L}$ 범위로 분포하고 있었으며 표층 보다 저

층에서 높은 농도를 보였다. 특히 북극해 주변 정점에서는 전체적으로 엽록소 최대층을 기준으로 이들 영양염 농도가 큰 차이가 나타났다. 엽록소 최대층 보다 얕은 수심에서는 낮은 농도를 깊은 수심에서는 높은 농도로 존재함을 확인하였다. 해빙의 용빙에 의한 표층 성층화에 의한 표층 영양염 농도가 전반적으로 낮게 관측된 것으로 판단되며 엽록소 최대층에서는 식물플랑크톤에 의한 영양염 소비가 높아져 저층에 비해 낮은 영양염 분포가 나타난 것으로 판단된다.



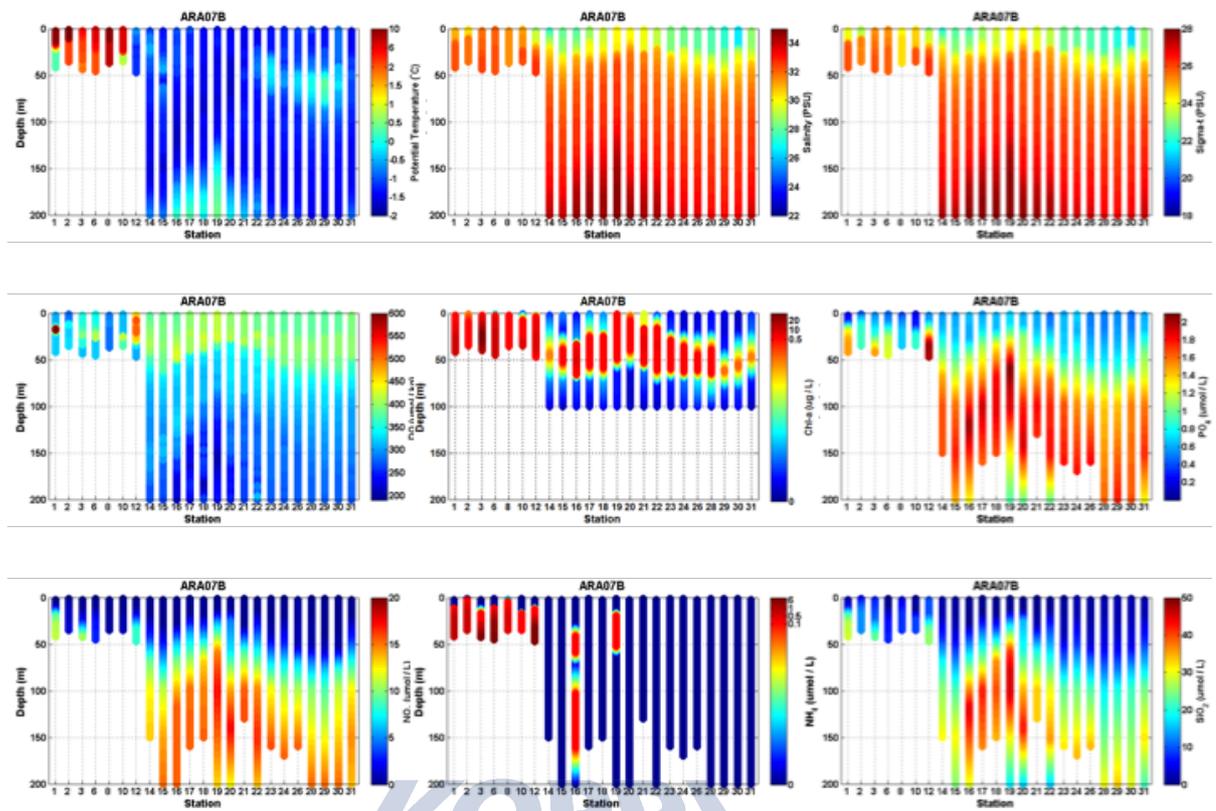


그림 14. 2016년 서북극해 해양환경 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 인산염, 질산염+아질산염, 암모니아, 규산염)의 수직 분포.

극지연구소

동물플랑크톤 채집 수심을 고려하여 동물플랑크톤 채집 수심의 평균 해양환경 변화를 분석하였다 (그림 15 - 16). 2014 - 2016 8월 베링 해협과 척치해 수온은 2 - 9 °C 분포를 나타냈으며 북극해는 -0.9 - -1.5 °C 분포를 보이며 대륙붕 지역과 수심이 깊은 해역의 뚜렷한 지역적 차이를 확인하였다. 북극해 정점에서는 AW와 PSW가 분포하는 정점에서 상대적으로 높은 수온 값을 확인하였다. 염분은 30.3 - 33 psu 분포를 보이며 정점 8 에서 가장 낮은 농도가 나타났다. 2014년에는 정점이 북극해 동쪽에 상대적으로 많이 분포하고 있어 대륙붕에서 가장 높은 염분 농도 (32.4 psu)가 관측된 반면 2015, 2016년에는 북극해 동시베리아 부근의 정점 25과 19에서 최대 농도가 나타났다. 이는 동시베리아 부근으로 치우쳐져 유입되는 AW에 의한 영향으로 판단된다. 북극해에서 가장 낮은 염분 농도는 가장 동쪽에 위치한 정점 17 (2014), 31 (2015), 29 (2016)에서 관측되었다. 밀도는 염분과 동일한 분포 경향을 보였다. 엽록소량은 베링 해협과 척치해에서 북극해 주변 보다 약 5 배 이상의 생물량이 나타났으며 베링 해협과 척치해의 평균 엽록소량은 2014년에 가장 높고 2016년에 2014년의 1/2 로 가장 낮게 관측되었다. 그림 16 은 연구해역의 평균 영양염 분포를 보여준다. 질산염+아질산염은 0 - 15 $\mu\text{mol/kg}$ 의 농도 분포를 보이고 베링 해협 입구 부근 (정점 1), 동시베리아 부근 해역, 북극해 주변에서 상대적으로 높은 농도 값을 보였다. 엽록소량이 높았던 척치해 부근에서는 질산염+아질산염 농도 값은 상대적으로 낮게 관측되었다. 규산염과 인산염 또한 질산염+아질산염과 유사한 공간 변화를 보였으며 암모니아는 0 - 2.5 $\mu\text{mol/kg}$ 의 농도 분포를 보이며 베링해와 척치해에서 북극해 주변 정점 보다 2배 이상의 높은 농도 값이 관측되었다. 베링해협 북쪽 정점 6에서 가장 높은 농도 값이 관측되었다.

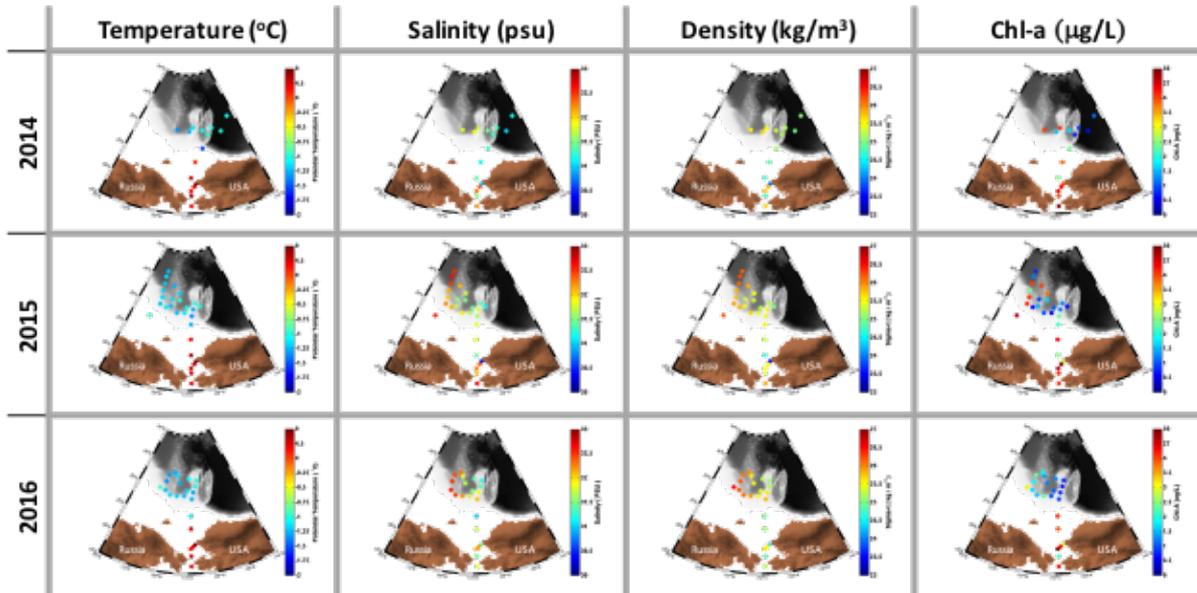


그림 15. 서북극해 수심 평균된 (depth averaged) 수온 (temperature), 염분 (salinity), 밀도 (density), 엽록소 (Chl-a)의 수평 분포.



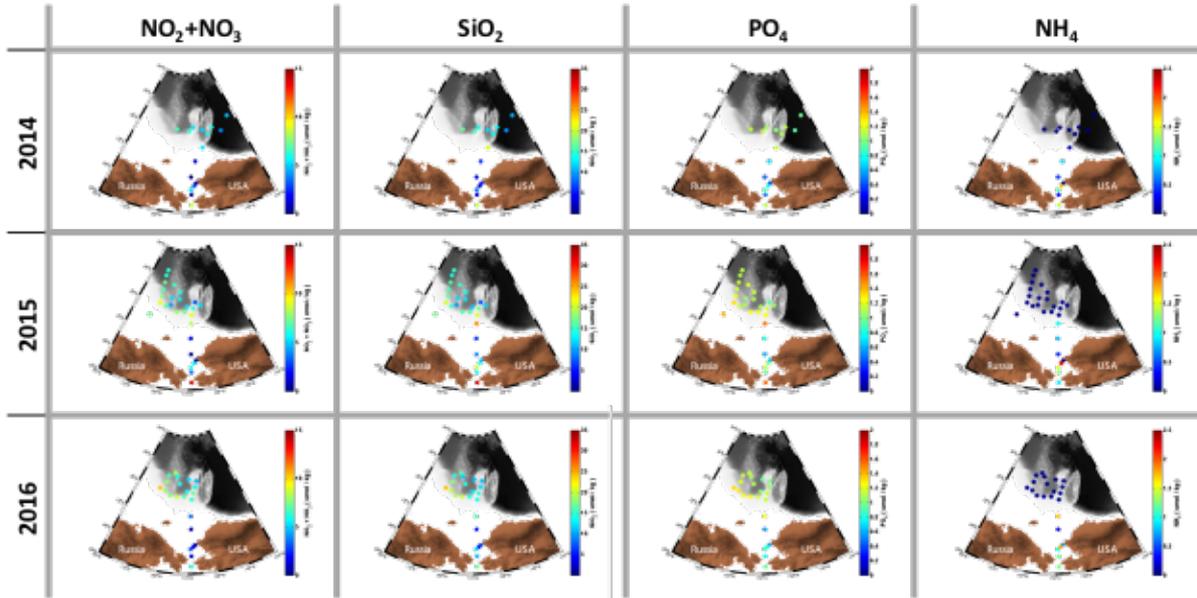
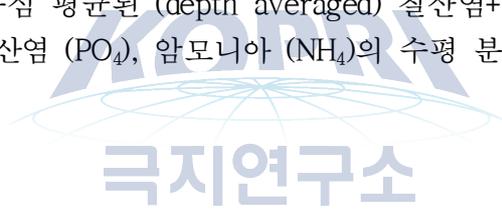


그림 16. 서북극해 수심 평균된 (depth averaged) 질산염+아질산염 (NO_2+NO_3), 규산염 (SiO_2), 인산염 (PO_4), 암모니아 (NH_4)의 수평 분포.



제 2 절 북극해 동물플랑크톤 분포 및 생태학적 특성 파악

1. 연구목적

북극 해양생태계에서 동물플랑크톤은 일차 생산자 (식물플랑크톤)와 상위 영양단계를 연결하는 중요한 연결 인자로서 해양생태계의 건강상태를 나타내는 지표로서 활용될 수 있다. 최근, 급격한 북극 해양환경의 변화에 따라서 이들의 서식처가 직접적인 영향을 받으며 동물플랑크톤 개체수, 군집 구조, 그리고 서식지 이동 등 다양한 변화를 초래하고 있다. 표층 수온의 상승과 해빙 면적 감소는 북극해 수층 구조의 물리 (수온, 염분), 생물 (먹이, 포식자), 화학 (영양염)적 환경 변화를 발생시키며 동물플랑크톤은 해양환경에 따라 개체군의 변화가 나타나기 때문에 해양환경을 평가하는데 중요한 연구대상이 된다. 또한 북극해 수산생물 자원의 지속적인 이용과 개발을 위해서는 동물플랑크톤 군집 구조의 분포와 생물량에 대한 기초조사가 먼저 선행되어야 한다 (Cushing 1975). 동물플랑크톤은 종의 생리·생태적 특징을 연구함으로써 수괴의 분포, 대륙붕, 원해 등을 구분하는 수괴 지표종으로 사용가능하고 북극 온난화와 산성화 같은 전 지구적인 환경 문제를 모니터링하는데 활용할 수 있다.

북극해 해양생태계는 해빙이라는 지역적인 특이성을 가지고 있으며 대륙으로 둘러 싸여져 있어 육지로부터 유입되는 담수의 영향을 받고 있다. 또한 태평양으로부터 유입되는 태평양 기원의 수괴와 대서양으로부터 유입되는 대서양 기반 수괴가 만나 복잡한 수층 구조를 형성한다. 이러한 환경 요인들은 해양생태계 내의 동물플랑크톤 종 다양성 및 군집구조에 영향을 미치며 하계 기간 기온 상승에 따른 해빙의 용빙이 시작되면서 식물플랑크톤 번성 (phytoplankton bloom)이 빠르게 진행된다. 동물플랑크톤 생물량 및 종 구성의 변화는 북극해 해양생태계의 다양한 구성요소에게 영향을 미칠 수 있다 (Kahru et al. 2011). 따라서 본 연구에서는 북극해에서 해빙 분포의 변화가 가장 급격하게 진행되고 있는 서북극해 (베링 해협, 척치해, 북극해 주변)에 분포하는 동물플랑크톤 군집 구조, 서식 환경을 파악하고 해양환경과의 상관성을 확인해보고자 한다.

2. 연구수행 방법

동물플랑크톤 채집은 23개의 정점에서 Bongo net (망목 330 μ m, 500 μ m)를 사용하여 수행되었다 (그림 17). 관측 정점은 크게 베링 해협, 척치해, 그리고 북극해 주변 해역에 분포하고 있었으며 상대적으로 관측 데이터가 많지 않은 북극해 주변에서 많은 샘플을 획득하였다. 수심이 얕은 베링 해협과 척치해의 대륙붕에서는 표층부터 해저면 근처까지 수직 채집하였으며 수심이 깊은 북극해 주변에서는 표층 - 200 m 에 대한 동물플랑크톤 채집을 수행하였다. 네트는 표층부터 해당 수심까지 하강시 0.5 cm/sec, 상승시 1 cm/sec 속도로 채집하였으며 입구에 유속계를 부착하여 네트를 통과한 해수의 양을 계산하였다. 채집된 시료는 선상에서 5% 중성포르말린으로 고정하고 채집병에 담았다. 종 조성 및 개체수의 조사에 시료의 분할이 필요한 경우에는 분할기를 이용하여 적절하게 분할한 후 계수 챔버(grid petridish)로 옮겨 해부현미경과 광학현미경을 이용해서 동정 및 개체수를 확인하였다. 유속계로 측정된 여과 해수량을 파악하여 단위 체적당 개체수 (indiv/m) 를 계산하였다. 동물플랑크톤 종다양성을 파악하기 위해서 정점에 대한 종 다양성 지수(H' ; Species richness, Shannon-Weaver diversity index, Shannon-Weaver, 1975), 균등성 지수 (H'/H'_{max} , Eveness), 풍부도 (richness)를 분석하였다 (Hayek and Buzas, 1997).

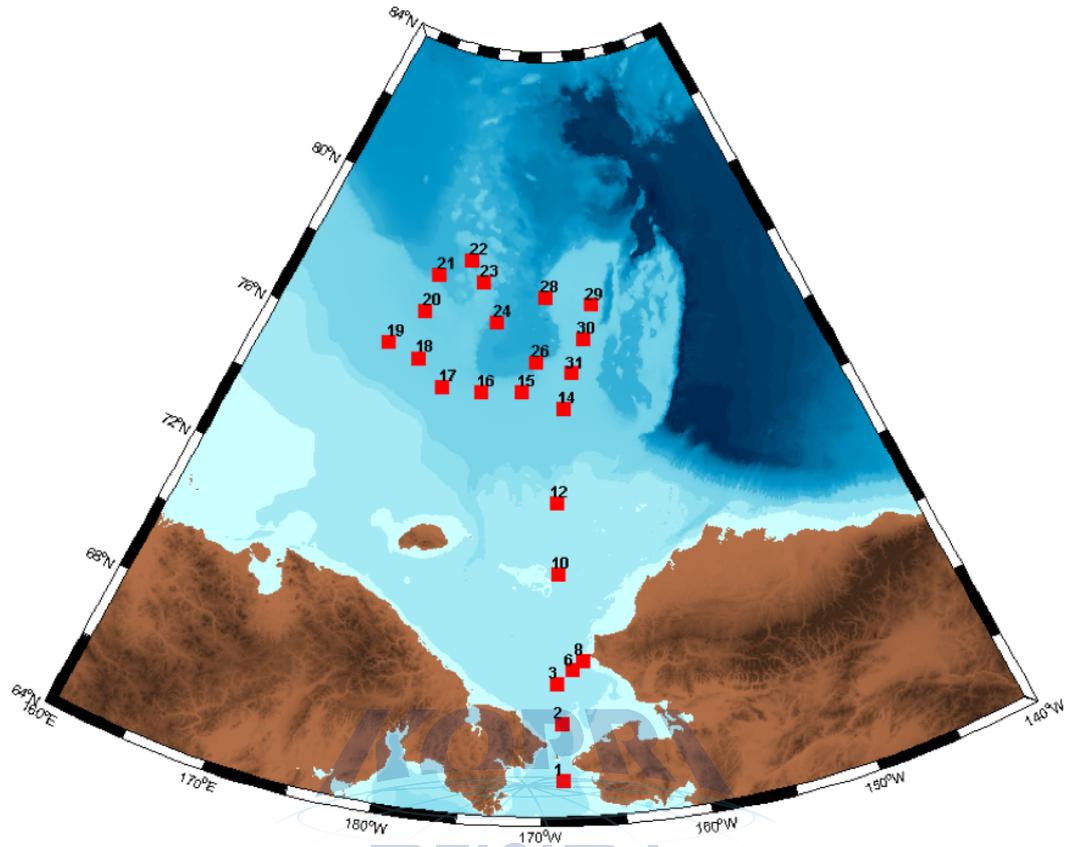


그림 17. 2016년 8월 북극해 (베링 해협, 척치해, 북극해 주변) 동물플랑크톤 군집 파악을 위한 네트와 해양환경 관측 위한 CTD 정점

3. 데이터 분석

동물플랑크톤 군집 구조와 해양환경과의 상호관계를 파악하기 위해서 다변량 통계 분석을 수행하였다 (Multivariate statistics). 다변량 통계는 하나 이상의 결과 변수를 동시에 관측하고 분석하는 통계 분석 방법이다. 다변량 분석에서 기울기 분석 (gradient analysis)은 데이터 클러스터링을 보완하는 방법으로 가설 테스트가 아닌 데이터 탐색 테스트에 주로 활용된다. 여러 변수들의 특성을 고려한 다중 변수 객체 (multivariate objects)를 조합하여 유사한 객체가 서로 가까이 있고 서로 다른 객체가 서로 멀리 떨어져 있도록 구성한다. 객체간의 관계는 수치적으로 또는 그래픽으로 표현할 수 있다. 단순 선형 회귀 분석 (linear regression analysis)과 다중 회귀 분석 (multiple regression analysis)는 단일 결과 변수의 조건부 분포만이 고려되기 때문에 다변량 통계에 포함되지 않는다. 다양한 반응 변수의 자료를 분석할 때에 개별 변수들 간의 선형 관계를 분석하여 각각의 결과를 종합하는 형식으로 진행할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 변수들 사이의 상호관계를 고려할 수 없는 단점이 있으며 이로 인한 자료에 대한 잘못된 해석과 결론을 도출할 수 있다. 다변량 통계 분석은 분석 목적과 관측 변수들에 따라서 아래와 같이 다양한 방법이 있다.

표 1. 다변량 통계분석 방법

	Technique	Objective
Unconstrained Ordination	PCA, MDS, CA, DCA, NMDS	Extract gradients of maximum variation
Cluster Analysis	Familiy of techniques	Establish groups of similar entities
Discrimination	MANOVA, MRPP, ANOSIM, Mantel, DA, LR, CART, ISA	Describe difference among groups of entities
Constratined Ordination	RDA, CCA, CAP	Extract gradients of variation in dependent variables explainable by independent variables

PCA: Principal component analysis
MDS: Multidimensional scaling
CA: Correspondence analysis or Reciprocal averaging (RA)
DCA: Detrended correspondence analysis
NMDS: non-metric Multidimensional scaling
MANOVA: Multivariate analysis of variance
MRPP: Multivariate analysis of permutation procedures
ANOSIM: Analysis of similarities
Mantel: Mantel test
DA: Discriminant analysis
LR: Logistic regression
CART: Classification and regression trees
ISA: Indicator species analysis
RDA: Redundancy analysis
CCA: Canonical correspondence analysis
CAP: Canonical analysis of principal coordinates

PCA는 다양한 변수들의 정보를 일차원 또는 몇 개의 차원으로 축소함으로써 복잡한 변수들간의 관계를 단순화시켜 변수들 간의 반응을 보다 쉽게 파악할 수 있다. 차원 축소는 과정에서 변수들을 선형 변환시켜 ‘주성분’이라는 인위적인 변수들을 추출하여 변수들 간의 관계를 분석할 수 있으며 군집분석, 회귀분석, 또는 인자분석을 위한 중간과정의 역할에 활용된다. MDS는 데이터 군집에서 개별 사례의 유사성 수준을 시각화하는 수단으로 활용된다. 거리 매트릭스에 포함된 정보를 서열화하는 시각화 방법이다 (Borg and Groenen, 2005). 비선형 차원 감소 방법으로 다차원 공간 간의 객체간 거리가 보존시키기 위해서 각 객체가 배치되고 좌표가 지정된다. CA는 개념적으로는 PCA와 유사한 방법이지만 연속적인 데이터 보다는 범주형 데이터에 적용된다. PCA 분석과 유사하게 2차원 그래픽 형식으로 데이터를 표시하거나 요약함으로써 변수들간의 관계를 해석할 수 있다. 단 모든 데이터는 음수가 아니어야하며 행과 열이 동등하게 처리된다. DCA는 생태학자들에게 광범위하게 사용되는 다변량 통계 분석 방법중 하나로써 생태계

를 대표하는 우점 생물종이지만 데이터 매트릭스가 작은 경우 주 요인 또는 기울기를 분석할 수 있다 (Hill and Gauch, 1980). MANOVA는 다변량 변수의 평균을 비교하는 과정에 사용된다. 두 개 이상의 종속변수가 있을 때 활용할 수 있으며 개별 종속 변수 각각의 유의성 검증이 수행된다. MANOVA와 유사하게 비모수적인 다변량 통계 테스트인 순차적 다변량 분산 분석 (Permutational MANOVA, PERMANOVA)이 있다 (Anderson, 2001). PERMANOVA는 객체 그룹을 비교하고 측정 공간으로 정의된 그룹의 중심 및 분산이 모든 그룹에 대해 동일하다는 귀무 가설을 테스트하는 데 사용됩니다. 귀무 가설에 대한 거부는 개체의 중심과 개체의 확산이 그룹간에 다르다는 것을 의미합니다. 따라서 이 테스트는 실험에 포함된 두 개체 사이의 거리를 이전에 계산한 것을 기반으로 합니다. PERMANOVA는 ANOVA와 약간의 유사점을 가지고 있습니다. 여기서 그들은 그룹 내 및 그룹 간의 제곱합을 측정하고 F test를 사용하여 그룹 내에서 그룹 간 차이를 비교합니다. 그러나 ANOVA는 정규성 가정에 대한 결과의 중요성을 기반으로 하지만 PERMANOVA는 실제 F 테스트 결과를 그룹 간의 임의의 순열로부터 얻은 결과와 비교하여 중요성 테스트를 그룹니다. 더욱이, PERMANOVA는 선택된 거리 척도를 기반으로 유사성을 테스트하는 반면, ANOVA는 그룹 평균의 유사성을 테스트합니다. MRPP는 둘 이상의 개체 그룹간의 차이가 없다는 가설을 테스트하기 위한 비모수적 방법으로 생태계 군집 데이터에서 잘 나타나지 않는 다변량 정규성과 균질성 분산과 같이 분포에 대한 가정이 필요하지 않는 장점이 있다. ANOSIM은 생태학 분야에서 많이 사용되는 비모수 통계 분석 방법이다 (Clarke, 1993). ANOVA와 같은 테스트로 처음 제안되었으며 원시 데이터를 적용하는 대신 순위가 정해진 비유사성 매트릭스를 활용하는 특징이 있다. 그룹간의 유사성이 그룹내 유사성보다 크거나 같은 귀무가설을 거부할 수 있는지에 대한 여부를 판단하는데 활용된다. Mantel 테스트는 두 행렬간의 상관관계에 대한 통계적 테스트로 생태계 연구에 많이 활용된다 (Mantel, 1967). 생물의 종과 같이 대상 간의 거리를 추정하고 또한 각 종이 모든 다른 종의 범위 사이의 거리를 추정한다. 무작위 또는 순열 테스트로 Pearson 상관계수를 사용하여 두 그룹간의 상관관계를 계산한다. 상관계수의 일반적인 사용과는 대조적으로 zero 상관관계부터 무작위 순열을 여러번 거치면서 계산되며 상관관계의 중요성은 높은 상관 계수로 나타나는 순열의 비율을 나타낸다. DA는 분산 분석 (ANOVA) 및 회귀 분석 (regression analysis)과 밀접한 관련이 있으며 하나의 종속 변수를 다른 관측 변수의 선형 조합으로 표현한다 (McLachlan, 2004). ANOVA는

범주형 독립 변수와 연속형 종속 변수를 사용하는 반면 DA는 연속형 독립 변수와 범부형 종속 변수를 사용한다. DA의 기본 가정은 독립 변수의 연속성과 정규 분포이기 때문에 독립 변수의 분포가 정규 분포를 따르지 않을 경우 다른 분석 방법을 활용해야한다. LR은 종속 변수가 범주형인 회귀 모델로 기계 학습 (machine learning), 의학 및 사회과학을 포함한 다양한 분야에서 사용되고 있다 (David, 2009). 환자의 특성 (연령, 성별, 체질량 지수, 다양한 혈액 검사 결과 등)에 근거하여 환자가 주어진 질병 (예 : 당뇨병, 관상 동맥성 심장 질환)을 앓고 있는지를 예측하는 데 LR을 사용할 수 있다. 사회과학의 경우 미국 유권자가 나이, 소득, 성별, 인종, 주거 상태, 이전 선거 투표 등을 기준으로 민주당 또는 공화당에 투표할지 여부를 예측하는 것에 활용되고 있으며 공학에서는 주어진 프로세스, 시스템 또는 제품의 고장 가능성을 예측하는 데에 많이 활용하고 있다. 경제학에서는 노동력에 대한 개인의 선택의 가능성을 예측하는 데 사용할 수 있으며 비즈니스 응용 프로그램은 주택 소유자가 모기지를 불이행 할 가능성을 예측하는데 활용되고 있다. CART는 의사 결정을 위하여 Breiman 등 (1984)에 의해서 처음 도입된 용어로 분류 트리 분석 (Classification tree analysis)와 회귀 트리 분석 (Regression tree analysis) 절차를 모두 지칭하기 위해 사용된다. 트리 구조에서 잇은 클래스 레이블을 나타내고 가지는 해당 클래스 레이블로 연결되는 기능의 연결 요소를 나타냅니다. 분류 트리와 회귀 트리는 분열하는 위치를 결정하는 절차에 있어서 서로 유사점과 차이점을 가지고 있다. 목표 변수가 이산 값 집합을 취할 수 있는 트리 모델이 분류 트리이다. 목표 변수가 연속 값 (일반적으로 실수)을 취할 수 있는 의사 결정 트리를 회귀 트리 라고합니다. CCA는 데이터 집합에서 설명 변수의 조합 중에서 제한된 공간에서 주요한 변화를 추출하는 다중변수 서열화 방법이다 (McGarigal et al., 2000). 샘플이 무작위적이고 독립적인 경우 주로 사용되며 범주형(categorical) 데이터에 활용할 수 있다. CAP는 순열(permutation)에 의한 테스트를 포함한 대칭 거리 매트릭스 (symmetric distance matrix)를 기반으로 구성된 주요 좌표 (Principal coordinates)에 대한 정준분석 (Canonical analysis)을 계산하는 방법이다 (Anderson and Willis, 2003).

본 연구에서는 PRIMER 7과 PERMANOVA+ 통계 분석 프로그램을 이용하여 동물플랑크톤 군집 분포와 해양환경인자와의 관계를 이해하기 위해서는 다변량 통계 분석을 수행하였으며 자료의 목적에 부합하는 PERMANOVA, Mantel test, CAP 다변량 통계 분석 방법을 수행하였다.

4. 연구결과

전체 31개의 종 (4개의 미확인 종)을 확인하였으며 자세한 평균 개체수와 구성은 표 2에서 확인할 수 있다. *Copepodite* (32.78 %), *Calanus glacialis* (20.55 %), *Cirriped larvae* (11.86 %), *Oikopleura spp.* (9.8 %), *Pseudocalanus spp.* (9.6 %) 이 전체 개체수의 80 % 이상에 해당되는 주요 종으로 확인되었다. 정점간 개체수를 비교했을 때 베링 해협과 척치해에 해당되는 정점 1 - 12에서 북극해 주변 정점 (14 - 31)에 비해 약 10배 이상의 서식 밀도를 보였으며 정점 1, 6, 12에서 800 indiv./m³ 이상의 높은 밀도 값을 확인하였다 (그림 18). 북극해 주변에서는 서쪽 방향의 동시베리아 근처에 있는 정점 18, 19, 20, 21에서 다른 정점에 비해 상대적으로 높은 서식밀도를 파악하였다. 생물량 (mg/m³) 또한 동물플랑크톤 개체수와 유사하게 수심이 낮은 베링 해협과 척치해에서 높은 값을 확인하였다. 정점간 종 다양성과 균등성은 유사하게 확인되었고 수심이 깊은 북극해 주변에서 상대적으로 약간 높은 값을 확인하였다. 종 다양성 지수는 1.3 - 2.4 범위로 계산 되었으며 정점 1에서 1.3 으로 가장 낮고 정점 29에서 가장 높게 확인되었다. 정점 1의 낮은 다양성 지수는 요각류 유생 (Copeodite)과 *Calanus gracialis* 가 전체 서식 밀도 중 80 % 이상을 차지하면서 우점하여 분포했기 때문인것으로 추정된다. 종 풍부도는 다양성 지수와 유사하게 베링 해협과 척치해에서 가장 낮았으며 정점 29에서 가장 높은 풍부도 지수가 나타났다. 전체적으로 고위도로 갈수록 종 풍부도가 증가하는 경향을 확인하였다.

동물플랑크톤 종 구성은 해파리류 (Cnidaria), 모약동물 (Chaetognatha), 그리고 척색동물 (Chordata)이 전체 서식 밀도의 약 13 %를 차지하며 부유성 유생 (만각류 (Cirriped), 복족류 (Gastropoda), 거미불가사리 (Ophioplutus), 다모류 (Polychaeta), 십각류 (Decapoda), 남극 크릴 (Euphausia)) 이 약 10 %, 그리고 요각류 (Copepoda)가 약 60% 이상 분포하였다 (그림 19 - 20). 수심이 낮은 베링 해협과 척치해 부근에 지각류와 거미불가사리 유생이 다수 출현하였지만 수심이 깊은 북극해 주변에서는 낮은 서식 밀도로 출현하였다. 북극해 주변에서는 척치 고원 (Chuckchi Plaetu) 주변 정점 29 - 31에서 가장 높은 서식 밀도가 관측되었다. 요각류의 경우 모든 정점에서 주요 종으로 분포하였으며 정점 1을 제외하고는 수심이 깊은 지역에서 상대적으로 높은 서식 밀도가 관측되었다. 부유성 유생은 요각류의 분포 패턴과 유사하게 반응하였다.

표 2. 채집된 동물플랑크톤 종 구성과 개체수

Taxa	2016		
	Abundance (indiv/m ³)	Composition (%)	
Cnidaria	<i>Unidentified Cnidaria</i>	-	
	<i>Unidentified Hydrozoa</i>	59.37	
Chaetognatha	<i>Sagittaspp.</i>	160.95	
	<i>Oikopleura spp.</i>	487.81	
Chordata	<i>Unidentified Thaliacea</i>	-	
	<i>Fish larvae</i>	-	
	<i>Fish egg</i>	11.24	
Cladocera	<i>Fritillaria spp.</i>	4.84	
	<i>Podonleuckarti</i>	-	
	<i>Pseudevadne tergestina</i>	-	
	<i>Acartia longiremis</i>	35.76	
	<i>Eucalanus bungii</i>	8.73	
	<i>Calanus glacialis</i>	1,023.12	
	<i>Calanus hyperboreus</i>	19.02	
	<i>Centropages abdominalis</i>	7.49	
	<i>Metrida pacifica</i>	20.27	
	<i>Neocalanus cristatus</i>	2.22	
	<i>Oithonaspp.</i>	74.50	
	<i>Paraeuchaeta bisinuata</i>	4.09	
	Copepoda	<i>Pseudocalanus spp.</i>	480.33
<i>Copepodite</i>		1,632.54	
<i>Copepod nauplius</i>		46.84	
<i>Chiridius obtusifrons</i>		-	
<i>Unidentified Harpacticoids</i>		-	
<i>Clausocalanu ssp.</i>		-	
<i>Candacia columbiae</i>		-	
<i>Heterorhabdus norvegicus</i>		0.96	
<i>Metridia longa</i>		60.71	
<i>Microcalanus spp.</i>		44.06	
<i>Scolecithricella minor</i>		10.45	
<i>Scaphocalanus magnus</i>		2.00	
<i>Cirriped larvae</i>		590.83	
<i>Gastropoda larvae</i>		26.38	
Planktonic larvae		<i>Ophioplutes larvae</i>	9.99
		<i>Polychaeta larvae</i>	99.94
		<i>Decapoda larvae</i>	7.93
	<i>Euphausia larvae</i>	29.24	
	<i>Unidentified Amphipoda</i>	6.41	
	<i>Unidentified Ostracoda</i>	11.51	
ETC	<i>Unidentified Euphausiacea</i>	-	
	<i>Unidentified Isopoda</i>	0.24	
Sum	4,979.77	100.01	

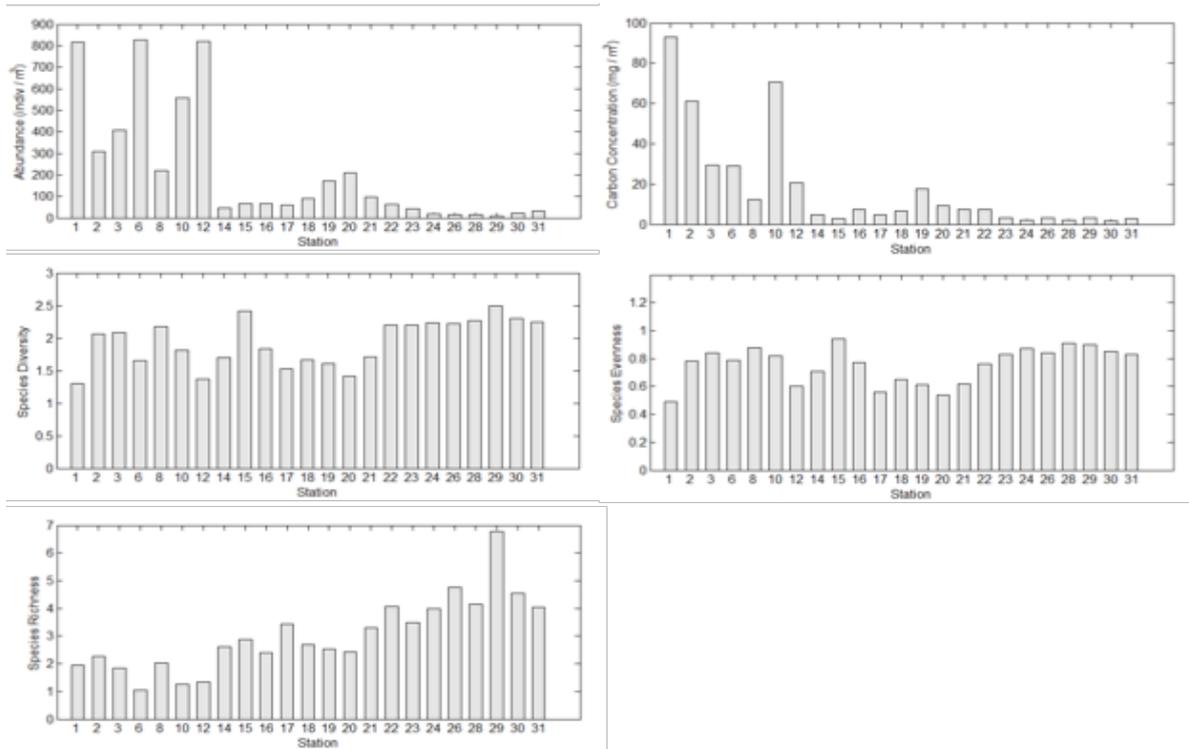


그림 18. 동물플랑크톤 개체수 (abundance), 생물량 (biomass), 종 다양성 (species diversity), 종 균등성 (Species evenness), 종 풍부도 (species richness)



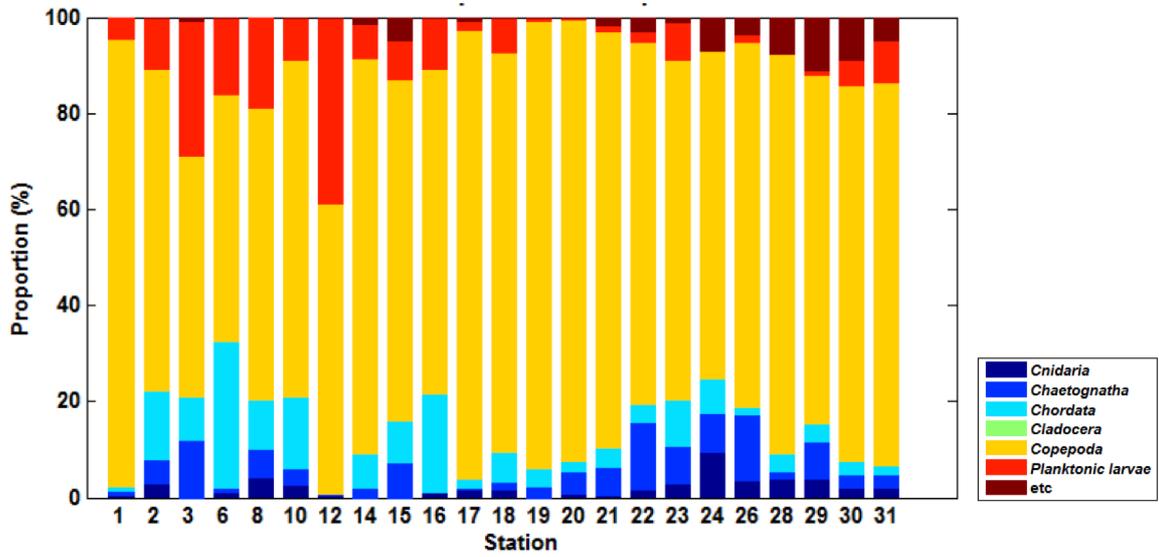


그림 19. 정점 별 동물플랑크톤 군집 분포



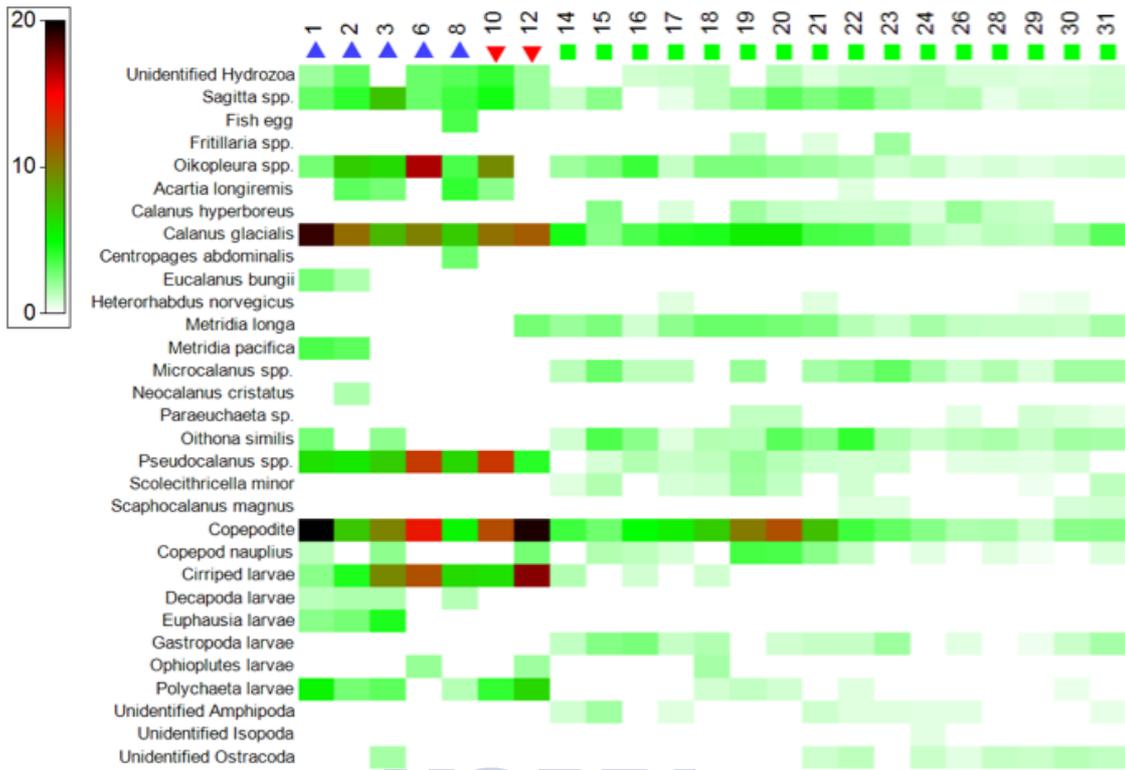


그림 20. 북극해 서식 지역에 따른 동물플랑크톤 군집 분포 (Shade plot)



동물플랑크톤 서식 특성을 파악하기 위해서 관측된 해양환경 인자 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 질산염+아질산염, 인산염, 규산염, 암모니아)를 기반으로 해양환경이 유사한 정점을 확인하였다. 우선 지형적인 특이성과 위도를 기반으로 베링 해협 (정점 1 - 8), 척치해 (정점 10 - 12), 북극해 주변 지역 (14 - 31)과 같이 3 지역으로 정점을 구분한후 CAP 분석을 통해 서식처를 구분하였다 (그림 21). 관측 해역은 해양환경에 따라서 크게 3 지역으로 구분되었으며 지역간 차이를 검증하기 위한 PERMANOVA의 유의성 검증 결과에서도 서식처 간 뚜렷한 차이를 확인하였다 (표 3). CAP 분석과 PERMANOVA 검증을 위해서 서로 다른 스케일의 해양환경 인자들은 log 변형과 표준화 후 정점간 해양환경 인자들의 Euclian distance를 계산하여 활용하였다.

표 3. 해양환경에 따라서 구분된 서식지간 (Habitat 1: 정점 1 - 8, Habitat 2: 정점 10 - 12, Habitats 3: 14 - 31) 유의성 검증.

PERMANOVA among habitats based on environment				
	df	MS	F	P
Groups	2	47.93	9.3852	0.001
Residual	20	5.107		
Total	22			

그림 20과 표 3와 같이 검증된 동물플랑크톤 서식처를 3 개로 분리하여 동물플랑크톤 중 구성이 서식처 별로 유사한지 확인하였다. CAP 분석을 통해서 3개 서식처간 동물플랑크톤 군집의 차이를 확인하였고 PERMANOVA를 이용해서 서식처가 군집 구조 차이의 유의성을 검증하였다 (그림 22, 표 4). 동물플랑크톤 중 별 개체수는 log 변환과 표준화 과정을 거친 후 Bray-Curtis 유사도를 계산한 후 CAP와 PERMANOVA 테스트를 수행하였다.

표 4. 동물플랑크톤 중 구성으로 구분된 서식지간 (Habitat 1: 정점 1 - 8, Habitat 2: 정점 10 - 12, Habitats 3: 14 - 31) 유의성 검증

PERMANOVA among habitats based on zooplankton composition				
	df	MS	F	P
Groups	2	6718.1	12.8160	0.001
Residual	20	524.19		
Total	22			

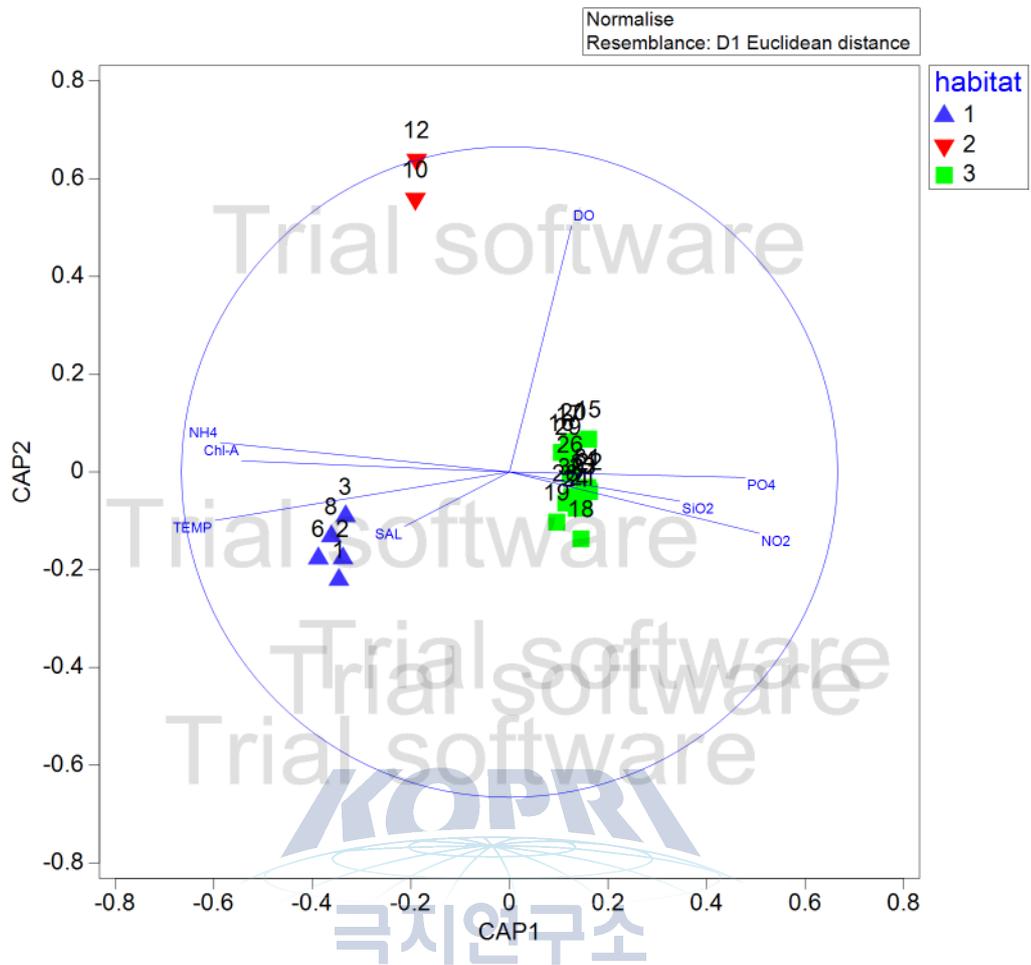


그림 21. 북극해 해양환경에 따른 동물플랑크톤 서식지 분포. CAP (Canonical analysis of principal coordinates) 분석 결과

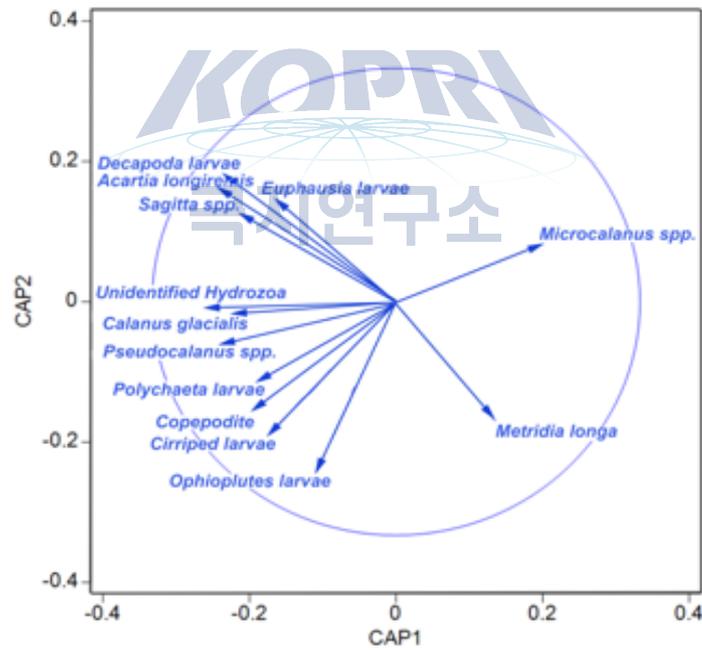
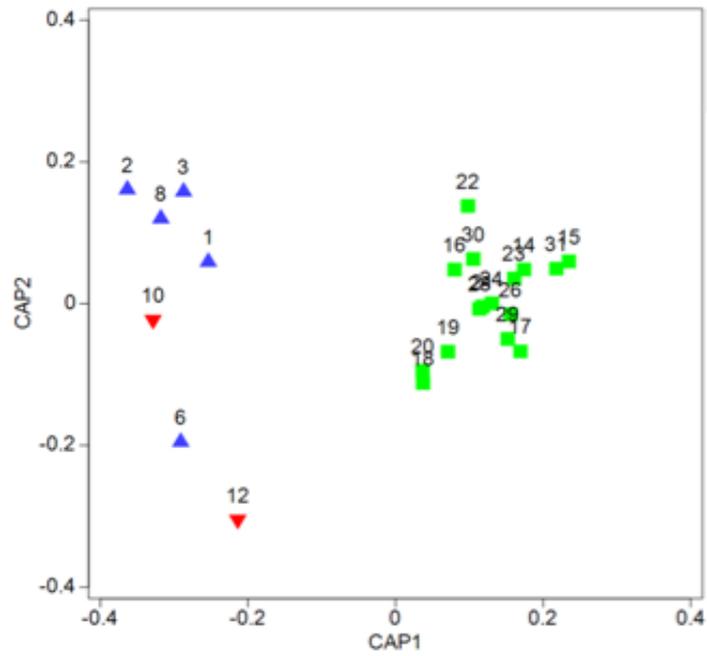


그림 22. 북극해 동물플랑크톤 종 구성에 따른 서식지 분포. CAP (Canonical analysis of principal coordinates) 분석 결과

북극해 해양환경인자의 CAP 분석과 PERMANOVA 검증으로부터 동물플랑크톤 서식처가 크게 세 지역 (베링 해협, 척치해, 북극해 주변)으로 구분될 수 있음을 확인하였고 서식처간 해양환경 특성이 다름을 파악하였다. 그리고 해양환경의 차이로 구분된 세 지역에서 동물플랑크톤 군집 구조 또한 차이가 있음을 확인하였다. 동물플랑크톤 군집 구조에 영향을 미칠 수 있는 주요 해양환경 인자를 파악하기 위한 다변량 통계 분석을 실시하였다. 정점별 동물플랑크톤 종 서식 밀도와 다양한 해양환경 인자 (수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 엽록소, 질산염+아질산염, 규산염, 인산염, 암모니아)와의 다중 상관성을 파악하였다. 상관 관계의 중요성은 PRIMER의 RELATE (Mantel test)를 사용하여 테스트하였고 (표 5) Biota-Environment (BIOENV) 분석을 통해서 동물플랑크톤 군집과 해양환경 인자와의 잠재적인 다변량 관계를 탐색하는 데 사용하였다 (Clarke and Gorley, 2006).

표 5. 동물플랑크톤과 해양환경과의 유의성 검증 (Mantel test)

Year	Sample ρ	No. of permutations	No. of permuted $\geq \rho$	P
2016	0.674	999	0	0.001

동물플랑크톤 군집 구조와 환경 변수 간의 상관 관계는 다변량 생물 환경 분석 (표 6)에 의해 확립되었다. BIOENV는 동물플랑크톤 군집 구조의 상관 관계가 가장 높은 환경 변수와 하위 집합을 선택하는데 활용된다. Mantel 테스트는 동물플랑크톤 군집 구조의 공간적 변화와 공간적 규모의 특정 환경 변수간에 중요한 연관성을 보여주었다. Mantel 테스트를 통과 한 모든 환경 요소에 대한 해양환경 인자와 동물플랑크톤 군집간의 특정 관계를 확인하기 위해 다 변수 상관 분석이 사용되었습니다. 결과는 동물플랑크톤 군집 구조의 공간적 변화가 수온, 염분, 인산염, 암모니아와 가장 유의한 상관 관계가 있음을 시사한다.

표 6. 동물플랑크톤 개체수에 영향을 미치는 주요 환경인자.

Rank	Environmental variables	<i>P</i>
1	Temp., Sal., PO ₄ , NH ₄	0.771
2	Temp., Sal.,	0.764
3	Temp., PO ₄ , NH ₄	0.761
4	Temp., Sal., PO ₄ , NH ₄ , Chl-a	0.759
5	Temp., Sal., NO ₂ +NO ₃ , NH ₄	0.757
6	Temp., NH ₄	0.756
7	Temp., Sal., NO ₂ +NO ₃ , NH ₄ , Chl-a	0.752
8	Temp., Sal., PO ₄ , NO ₂ +NO ₃ , NH ₄	0.750
9	Temp., Sal., NH ₄ , Chl-a	0.747
10	Temp., NO ₂ +NO ₃ , NH ₄	0.744

제 3 절 해상실험: 계류형 다중주파수 음향시스템 회수 및 계류

본 과제에서 제안하는 계류형 다중주파수 음향시스템은 주요 동물플랑크톤 생물량과 서식 수심 (표층 - 200 m)에 해당하는 고해상도 (약 1 m 간격) 음향 신호를 1 - 2년간 연속적으로 자체 저장할 수 있다. 그리고 다중 주파수를 사용하기 때문에 기존의 단일주파수를 사용하는 계류형 음향시스템에서는 불가능한 동물플랑크톤과 어군의 음향 신호를 서로 분리하여 동물플랑크톤만의 변동성 파악이 가능하다. 따라서 본 과제에 획득될 장기 관측 데이터는 기존의 스넵샷 관측 데이터와는 차별되며 다양한 해양환경 변수와의 상관성 분석을 통해 해빙아래에 서식하는 동물플랑크톤 생태계 변화를 파악하고 변화의 원인을 규명하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그림 23은 계류형 다중주파수 음향시스템의 운용 개념도이다.

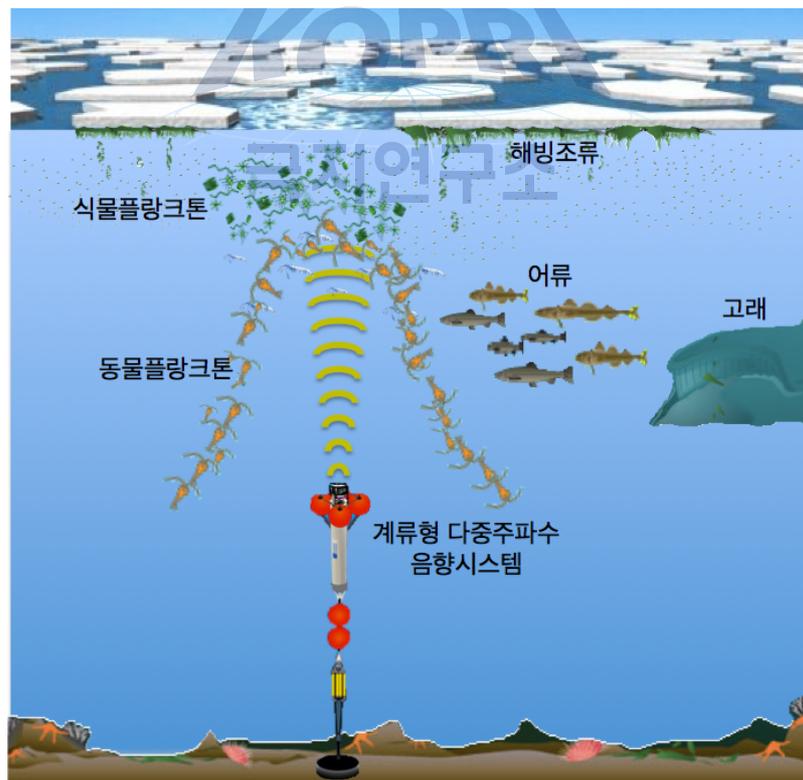


그림 23. 북극해 해빙역 장기 계류형 다중주파수 음향시스템 운용 개념도

1. 해상실험

다중주파수 음향시스템 계류를 위한 위치 선정을 위해서 서북극해 주변 해빙 분포와 해빙 면적의 변화를 10년 평균 데이터로 확인하였다. 해빙 데이터는 the Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) and Special Sensor Microwave/Image (SSM/I) 위성센서로 관측된 해빙 데이터를 활용하였다. 1990 - 1999년 기간 해빙 경계는 북위 70도 부근에 분포하였으며 점차 북쪽으로 이동하면서 최근 2010 - 2013년에는 북위 76도까지 이동하면서 급격한 해빙 면적의 감소가 진행되고 있다 (그림 24). 그리고 해빙 농도의 공간적인 변화를 확인한 결과 동시베리아 부근 해역에 해빙 농도가 상대적으로 높게 나타났다 (15% 이하의 해빙 농도는 흰색 바탕으로 처리하였으며 파란색은 해빙 농도가 낮은 지역, 빨간색은 해빙 농도가 높은 지역). 본 연구의 목적을 위해서는 동물플랑크톤 생물량이 많고 해빙 분포의 계절 변화가 뚜렷한 지역을 선택하는 것이 중요하다. 서북극해에서 동시베리아 주변 해역은 북극해의 동쪽 지역에 비해서 일차생산성이 높은 곳으로 알려져 있기 때문에 해빙 분포 변화가 뚜렷하게 나타나면서 동시베리아 연안에 근접한 지역을 선정하였다.

북극해 해빙 분포 변화에 따른 물플랑크톤 행동의 장기 변화를 파악하기 위해서는 동일한 위치에서 해빙 존재 유무와 관계 없이 약 1년 이상의 안정적인 데이터 획득이 필수적이다. 해빙 고정형 부이 (sea ice buoy)에 음향 시스템을 장착할 경우 장비 설치와 회수가 용이한 장점이 있는 반면 해빙 면적 변화에 따른 유실 위험과 장기 데이터 획득의 어려움이 있다. 표층 이동형 부이 (surface drift buoy)는 표층에 표류하면서 장기 관측이 가능하며 위성을 활용하여 실시간 데이터 전송이 가능한 장점이 있는 반면 해빙에 의한 파손 위험이 있기 때문에 안정적인 데이터 획득에 어려움이 있다. 해저면 고정형 무어링의 경우 설치와 회수가 다른 두 플랫폼에 비해 어렵고 전문적인 기술력이 요구되는 반면 고정 정점에서 안정적인 장기 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있다. 또한 다양한 해양환경 센서를 함께 장착하여 동시에 많은 양의 환경 데이터를 획득할 수 있기 때문에 물리, 생물, 화학 등 다학제적 관측과 해석이 가능하다. 따라서 본 과제의 목적을 수행하기 위해서 기존에 계획되어 있는 해저면 계류형 무어링 (그림 25)에 다중주파수 음향시스템을 추가 장착하기로 결정하였으며 약 1년 데이터 획득후 동물플랑크톤 행동의 시간에 따른 변동 (일 주기, 월 주기)을 분석하고자 하였다.

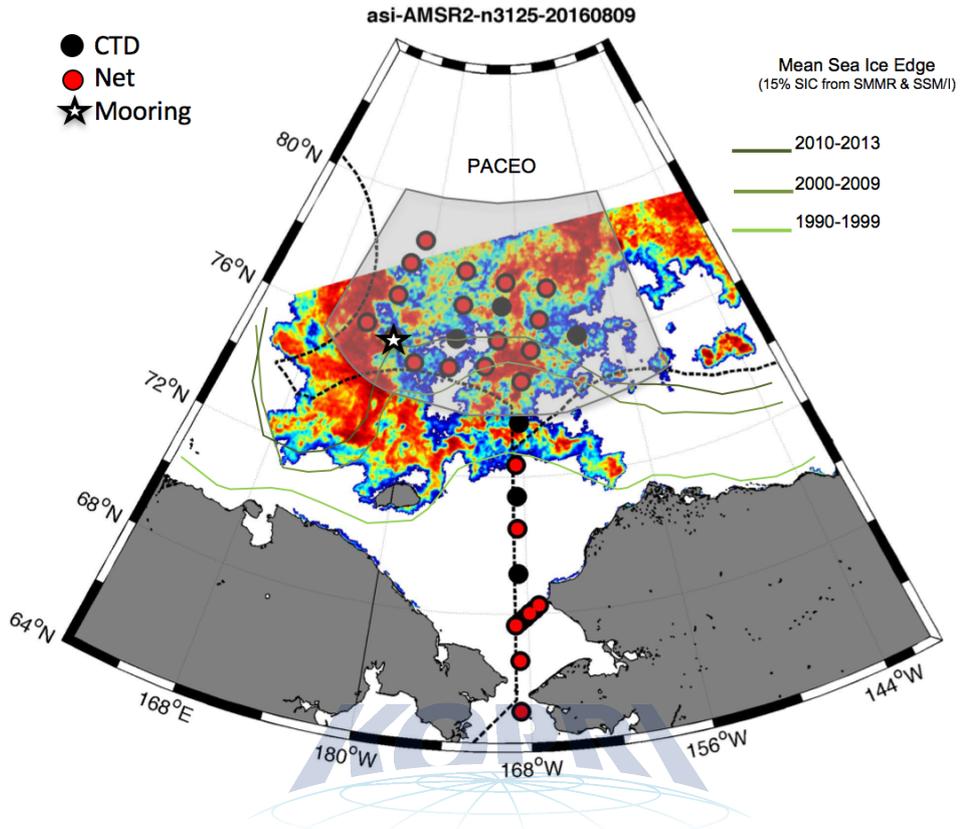


그림 24. 북극해 조사해역의 해빙농도 분포 (2016.8.9) 및 CTD (검은색 원), 네트 (붉은색 원), 무어링 관측 정점 (하얀색 별).

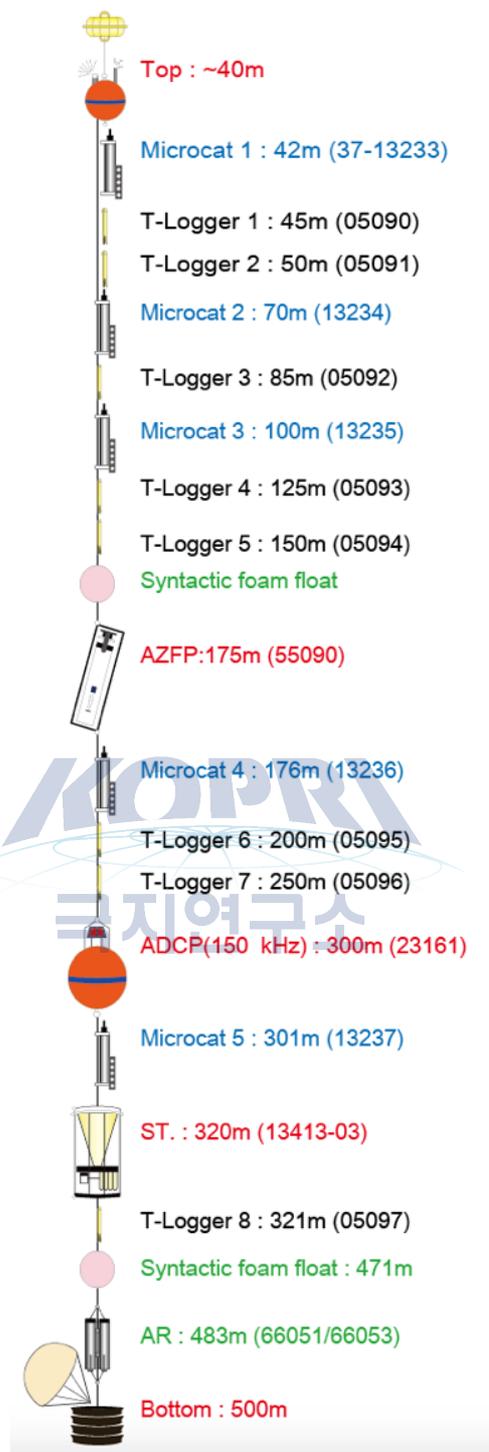


그림 25. 장기 계류형 무어링 디자인 (PM16040). 계류형 다중주파수 음향시스템은 수심 175 m 에 고정하여 표층부터 175 m 수심내에 분포하는 동물플랑크톤의 생물량 및 서식 수심 변화 관측 (변경 전).

2016년 8월 북극해 연구항해 (양극해 환경변화 이해 및 활용연구, PM16040) 동안 다중주파수 음향시스템 계류를 수행하였다. 음향시스템은 북극해 동물플랑크톤의 주요 서식 수심 (표층 - 100 m)을 고려하여 무어링 라인의 수심 175 m 에 위치에 고정하였다. 무어링 라인으로부터 들어오는 음향 신호를 피하기 위하여 음향시스템의 프레임을 약 20 도 기울여 라인에 고정시켰다. 음향시스템으로부터 해빙아래 부터 수심 175 m 사이에 분포하는 동물플랑크톤 생물량과 서식 수심 변화를 파악하고 무어링에 장착되어 있는 물리, 생물, 화학 센서로 해양환경 변화를 함께 관측하여 동물플랑크톤과 해양환경과의 상관성 연구를 수행하고자 하였다. T-Logger와 Microcat은 수온, 염분, 수심을 관측하여 동물플랑크톤 서식 수심의 물리적인 환경 변화를 보여줄 수 있으며 음향도플러 유속계 (acoustic Doppler current profiler)는 수심별 해류의 속도와 방향 그리고 퇴적물 포집기 (sediment trap)는 입자성 퇴적물과 동물플랑크톤 샘플을 일정한 시간 간격으로 장기 샘플을 할 수 있다. 음향시스템 회수는 계류 1년 후 2017년 8월에 수행하였다. 약 1년 동안 획득한 모든 음향 데이터를 다운로드, 배터리와 징크 교체 후 재계류를 계획하였다. 하지만 예기치 못한 환경변화에 의해서 음향시스템 뿐만 아니라 무어링 라인 전체가 유실되었다. 두꺼운 다년성 해빙에 의해서 무어링 라인 전체가 끌려간 것으로 추정된다.

따라서 실험 목적과 계획을 변경하여 연구 과제를 수행하였다. 장기 데이터 획득을 위한 해저면 고정형 무어링을 활용하는 대신 해빙 고정형 단일 주파수 음향시스템을 활용하여 해빙 하부에 서식하는 동물플랑크톤의 일주기 수직 변화와 서식 특성을 파악하고자 하였다 (그림 26). 단일 주파수 음향시스템에 음향도플러 유속계를 활용하여 해빙 하부 약 60 수심에 분포하는 동물플랑크톤의 행동 변화를 관측할 수 있으며 CTD를 수층 물리환경을 확인하고 단기 퇴적물 트랩을 설치하여 서식하는 동물플랑크톤의 주요 종을 파악할 수 있다.



그림 26. 북극해 해빙역 단기 계류형 음향시스템 운용 개념도 (변경 후)

2. 데이터 분석 방법

음향 데이터 처리는 대상 생물에 대한 개개 음향 특성 및 해양에 분포하는 생태학적 특성을 기반으로 숙련된 개인의 경험에 의존하는 방법을 사용해 왔다. 즉 특정 해양 생물과 노이즈 (수중 배경 소음과 원하지 않은 해양생물에 의한 음향신호)를 분리하는 Classification 단계에서 visual analyze 방법을 사용하여 왔다 (Socha et al., 1996). 이 방법은 베링해의 멧새 (walleye pollock), 북해의 청어 (herring), 남극해 크릴 (Antarctic krill) 등과 같이 계절적으로 단일 종이 우점할 경우 많이 활용되고 있으며 유용한 분석 방법으로 활용되고 있다. 하지만 이러한 방법은 음향 자료를 분석하는 개인의 판단 기준에 따라서 동일한 음향 자료에 대한 생물량 예측에 오차를 야기시킬 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다중 주파수를 이용한 평균 체적산란강도 (mean volume backscattering strength) 차이 방법을 활용하고자 한다. 이 분석법은 어류와 동물플랑크톤에 대한 음향산란특성 차이를 파악하여 주파수별 체적산란강도를 비교한 후 어류와 동물플랑크톤의 음향 신호를 분리하는데 활용되고 있다 (Miyashita et al., 1996; Watkins and Brierley, 2000). 부레를 가진 어류의 경우 저주파수에서 높은 체적산란강도가 나타나고 동물플랑크톤과 같은 부레가 없는 작은 생물의 경우 고주파에서 더 높은 체적산란강도를 나타내며 어류와 반대 경향이 나타난다. 다중주파수 음향시스템으로부터 획득한 음향 신호는 다음과 같은 단계를 거쳐 처리되며 생물음향 데이터에 가장 많이 활용되고 있는 Myriax Echoview software를 이용하여 가상 에코그램을 생성하여 수행한다.

Step1: 각 주파수의 에코그램에서 생물데이터 이외에 해수면, 해저면, 다른 음향 센서로부터의 주파수 간섭 신호 분리. 해양환경 데이터 획득시 사용되는 CTD 또는 네트 운용 과정에서 발생하는 음향 신호 또한 분리.

Step2: 음향센서의 시스템 노이즈를 고려하여 threshold 설정 후 배경 소음 제거.

Step3: 노이즈 제거된 에코그램을 이용하여 수평 거리와 수심 간격을 재조정. Resampling 하여 체적산란강도를 새로 생성.

Step4: 다중주파수 차를 이용하여 어류와 동물플랑크톤 신호 분리.

Step5: 동물플랑크톤 생물량과 서식 수심 vs. 네트, 해양환경 인자 비교 분석

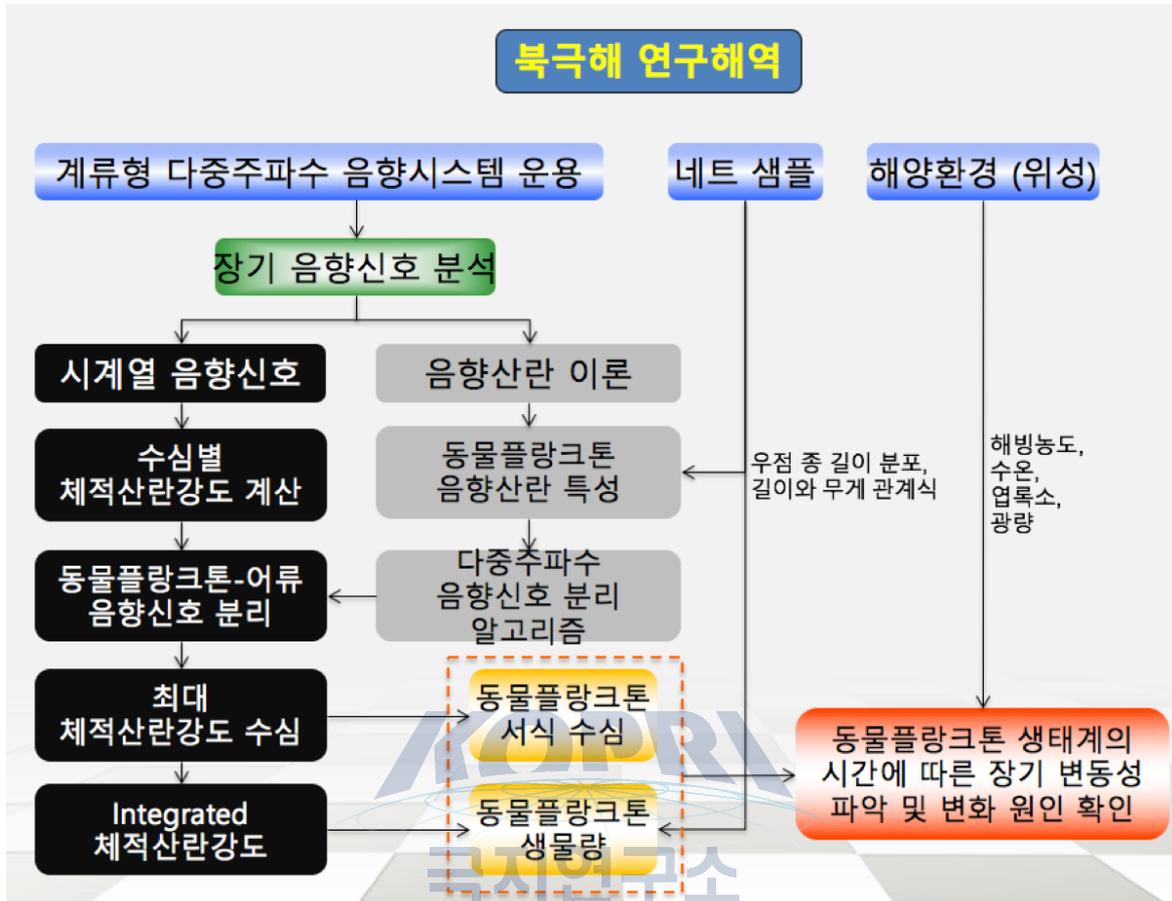


그림 27. 데이터 분석 흐름도

단일 주파수를 사용하는 음향시스템으로 음향 도플러 유속계 (acoustic Doppler current profiler, ADCP)는 물리해양과 생물해양 연구에서 대중적으로 사용되고 있는 음향센서이다. 음향 도플러 유속계는 물리해양 환경의 해류의 속도와 방향을 관측하는데 일반적으로 많이 활용되고 음향 신호의 후방 산란 데이터를 활용해서 수중에 분포하는 생물량 또는 부유물질 양 변화를 파악하는데 활용될 수 있다. 수중 산란체로부터 반사 또는 산란된 음향 신호의 압력 (pressure)은 레일리 분포를 나타내며 에너지 (power)는 자유도 2의 카이 분포, 그리고 랜덤하게 분포하는 산란체로부터 수신 음향 신호의 세기 (intensity)는 5.6 dB 의 분포가 나타난다. 음향 도플러 유속계는 음향신호의 상대적인 세기를 Automatic gain control (AGC) 로 저장되는데 이때 정확한 음향 신호의 세기로 환산하기 위해서는 수신기와 주변 수온을 보상해주어야 한다. 또한 음향 신호 발생에 사용된 전송 전류와 전압을 파악하여야 한다. 음향 도플러 유속계에 기록된 상대적은 음향 신호의 세기를 절대 후방 산란 강도로 환산하기 위해서는 아래의 소나 방정식을 적용하여 계산할 수 있다.

$$S_v = C + 10\log_{10}((T_x + 273.16)R^2) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2aR + Kc (E-E_r)$$

S_v : backscattering strength

T_x : temperature of the transducer (°C)

R : range along the beam (slant range) to scatteres (m)

a : the absortion coefficient of water (dB/m)

L_{DBM} : $10\log_{10}$ (transmit pulse length, meters)

P_{DBW} : $10\log_{10}$ (transmit power, Watts)

Kc : Transducer system factor

E : Recieved echo intensity

E_r : Recived noise

제 4 절 북극해 주요 동물플랑크톤의 단기 변동성 파악

동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 상위영양단계의 주요 연결 고리로서 식물플랑크톤의 섭식을 통해 얻은 에너지를 상위단계로 에너지를 전달해준다. 이들의 섭식 활동은 식물플랑크톤 군집의 구성과 증식과 상위단계의 생물량에 영향을 주며 해양생태계에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 이 중 북극해 동물플랑크톤 생물량의 약 80%를 차지하는 북극 요각류 (Arctic copepod)는 다른 중형동물플랑크톤에 비해 크고 지방 함량이 높아 상위단계의 해양생물에 중요한 에너지원으로 사용된다.

동물플랑크톤은 밤에는 표층 근처에 분포하다가 낮에는 저층으로 이동하며 일주기 주야 수직이동을 한다. 동물플랑크톤의 주요한 행동 특성중 하나로 광범위한 지역에서 확인되어 왔다. 초기엔 시각을 가진 포식자로 부터의 회피와 동물플랑크톤의 신진대사 측면에 대한 논의가 많이 되었지만 역전된 일주기 주야 수직이동과 동물플랑크톤의 성장단계와 계절과 관련된 변동성을 설명하는데에는 큰 어려움이 있다. 즉 동물플랑크톤의 일주기 주야 수직이동을 이해하기에는 보다 더 복합적인 요인에 의해 발생할 수 있음을 예상할 있다. 특히 북극해의 경우 해빙 면적의 변화가 시공간적으로 매우 큰 유동성을 보이기 때문에 해빙 아래에 서식하는 동물플랑크톤의 수직 분포 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다.

전통적인 네트 채집 방법은 정성적인 자료 측면에는 많은 장점이 있지만 채집 면적 및 채집 수층의 제한성 그리고 시간에 따른 자료 도출에 어려움이 있고 오차를 만들어 낼 가능성이 크다. 또한 작업 시간에 대한 비용 증가 요인이 커서 조사 효율성 측면에 큰 단점이 있다. 정성 분석에 치우친 기존 네트 채집 방법의 문제점을 향상시키기 위한 방법의 하나로 음향 시스템을 활용한 방법이 1980년 초부터 제시되어 최근에는 수산 자원량 및 분포 조사에 활발히 적용되고 있다.

수중음향을 활용하여 1920년에 처음 생물의 존재를 확인한 이후 세계 제2차 대전을 거쳐 장비 기술이 비약적으로 발전하여왔다. 우리나라의 수산음향은 1990년 초에 과학 어군 탐지 시스템을 도입하여 시작되었으며 2000년 초부터 본격적으로 수산음향 시스템을 적용하여 동중국해, 제주연안, 서해, 남해에서 어류의 자원량 추정에 활용도가 높게 사용되고 있다. 음향시스템은 연구자의 주관적인 관점을 최소화 시키고 보정된 음

향시스템을 이용하여 수층 전체에 분포하는 생물 데이터의 객관적인 자료를 연속적으로 획득할 수 있다.

1. 북극 해빙 아래 동물플랑크톤의 일주기 분포

본 연구에서는 동물플랑크톤의 수직 변화를 고해상도로 관측할 수 있는 음향시스템을 활용하여 해빙 아래에서의 동물플랑크톤 일주기 주야 수직 이동을 관측하고 그 원인을 파악하였다. 동물플랑크톤 수직 분포 특성의 원인은 동물플랑크톤의 일주기 변화와 해양환경자료 (수온, 염분, 밀도, 클로로필, 용존 산소량, 광량 등)와 비교를 통해서 확인하였다. 본 연구의 결과는 북극해 해빙하부에 서식하고 있는 주요 동물플랑크톤의 생태계를 이해하는데 있어서 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

2014년 북극해 연구 항해 (ARA05B) 중 약 4일 (8월 10일 - 13일) 동안 캐나다 분지 주변의 일년생과 다년생 해빙이 공존하는 해빙에서 해빙 캠프를 수행하였다 (그림 28). AMSR2 위성 데이터로부터 확인된 주위의 해빙농도는 75% 이상이었고 2 인치 아이스 오거 (auger)로 확인된 해빙의 두께 분포는 약 0.8 - 4 m 범위로 확인되었다. 아라온은 해빙캠프 근처에 고정된 ($77^{\circ} 36.741'N$, $146^{\circ} 6.072'W$) 후 해빙의 움직임에 영향을 주지 않게 하기 위하여 엔진을 정지하였다. 아라온으로부터 약 200 m 떨어진 지점에 24'와 36' 아이스 오거를 이용하여 홀을 만든 후 무어링 시스템을 설치하였다 (그림 29). 무어링 시스템은 3개의 퇴적물 트랩 (Sediment trap), 2개의 음향도플러유속계 (acoustic Doppler current profiler, ADCP; 300 kHz와 600 kHz). 음향 도플러 유속계는 두 주파수 간의 간섭을 제거 하기 위해서 같은 해빙상에서 수평적으로 충분히 떨어트려 설치하였다. 센서면이 해저면으로 향하도록 지향하여 스텐리스 삼각 받침대에 고정하였고 센서의 위치는 해수면으로부터 약 1.5 m (해빙으로부터 약 0.5 m)에 위치시켰다. 600 kHz 음향도플러유속계의 경우 센서면으로부터 0.5 m 떨어진 수심부터 약 30 m 까지 0.5 m 간격으로 음향데이터를 송수신하였다. 음향데이터는 약 4일 동안 1분 간격으로 연속 저장하며 해빙하부의 유속 변화와 동물플랑크톤의 일주기 수직 변화를 관측하였다. 300 kHz 음향도플러 유속계는 1 m 간격으로 수심 84 m 까지의 음향데이터를 획득하였다. 본 연구에는 북극해 우점 동물플랑크톤 요각류의 크기를 고려하여 주사수 300 kHz 음향 도플러 유

속계의 데이터만을 분석하였다.

퇴적물 트랩은 4개의 실린더 (길이: 50 cm, 입구: 7 cm²) 가 장착되어 있으며 한기는 수심 15 m에 나머지는 두기는 SCM (subsurface chlorophyll maximum)이 나타나는 수심 50 m에 위치시켜 해빙 하부에 분포하는 동물플랑크톤을 채집하고 종을 파악하였다. 동물플랑크톤은 유영 능력이 있기 때문에 트랩에 유입된 동물플랑크톤은 유영하여 빠져나갈 수 있다. 때문에 퇴적물 트랩에 포르말린 고정 시약을 첨가하여 유입된 동물플랑크톤을 고정시켜 샘플을 보존하였다. 또한 입자성유기물질의 총중량(total mass)은 25 mm 여과지를 태워 (450° C, 4시간) 무게를 측정 후 500 mL을 여과하여 동결건조 후 무게를 측정하여 계산하였다. 트랩내 포집된 입자성유기탄소 (POC) 시료는 미리태운 (450° C, 4시간) 25 mm GF/F 여과지로 500 mL - 1L를 여과한 후 분석 전까지 초저온 냉동고 (-80° C)에 보관하였다. 분석은 동결건조 후 진한 염산 (38 %) 증기로 무기탄소를 제거한 후 주석 캡슐에 째 후 CHN 분석기를 이용하여 결과를 산출하였다.

수층구조의 물리적인 해양환경을 파악하기 위해서 아라온에 장착되어 있는 CTD로 수온, 염분, 밀도, 용존산소량, 형광, 그리고 광합성 유효 방사 (photosynthetic active radiation)를 측정하였다. 해양환경의 시간에 따른 변화를 파악하기 위해서 해빙 무어링 작업 기간 동안 2 - 4 시간 간격으로 표층부터 수심 200 m 까지 연속 관측을 실시하였다.

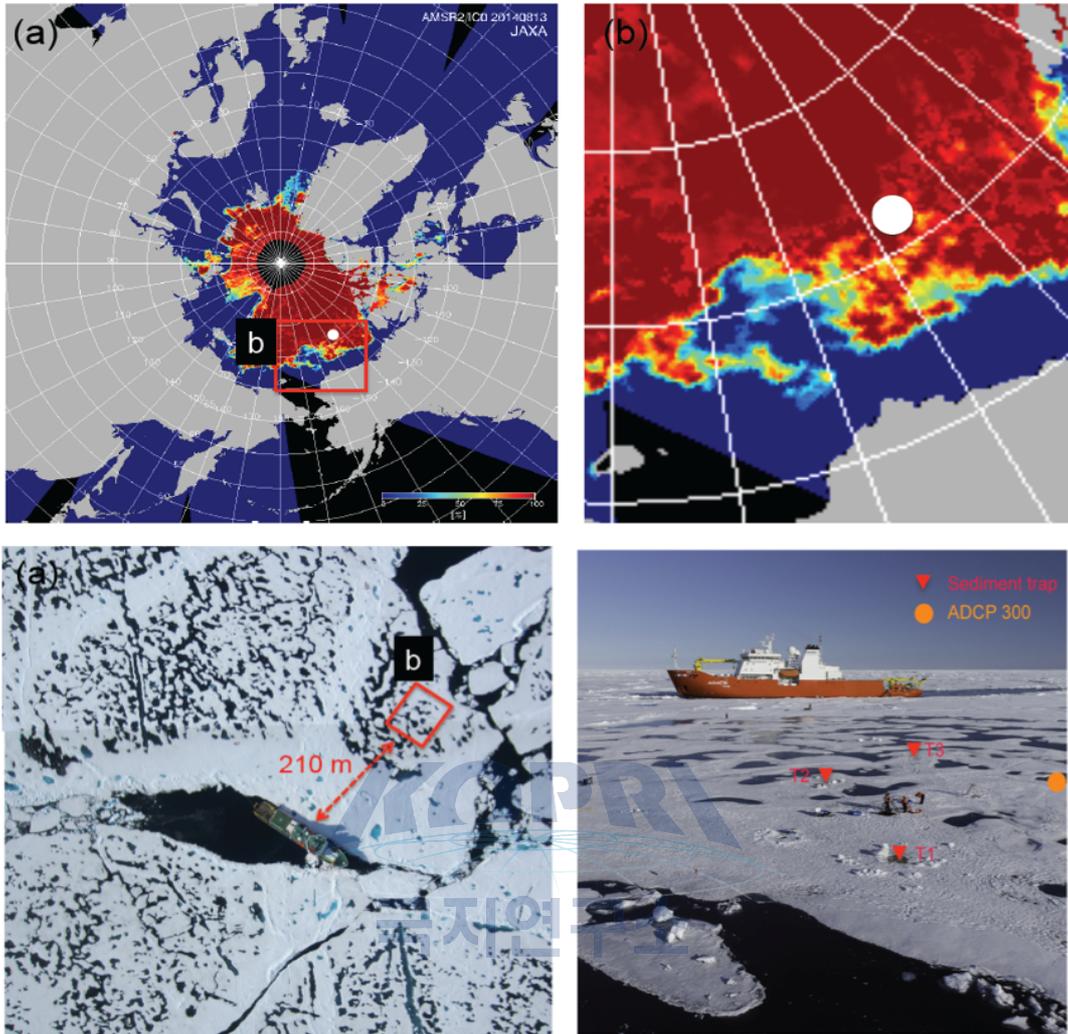


그림 28. (a) 하계 기간 북극해 해빙 분포 (AMSR2, 2014년 8월 13일)와 음향 실험 위치 (하얀 점). (b) 해빙위 퇴적물 트랩과 음향 도플러 유속계 (acoustic Doppler current profiler, ADCP)의 위치. 각 지점은 아라운으로부터 약 200 m 떨어진 지점에 설치되었음.

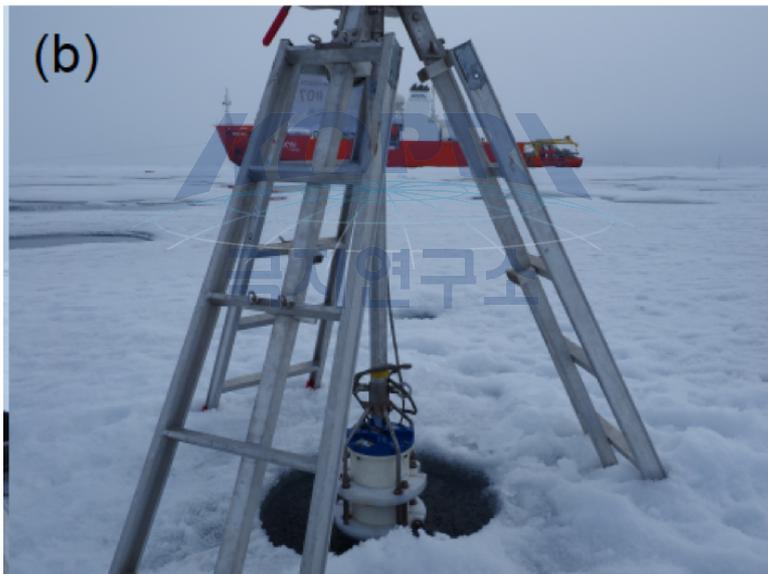
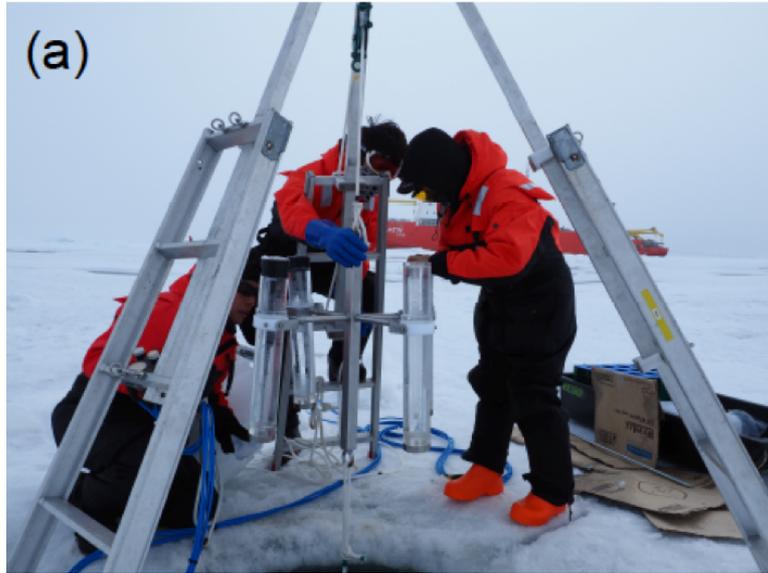


그림 29. (a) 퇴적물 트랩과 (b) 음향 도플러 유속계의 설치 모습.

관측 시기가 백야임에도 불구하고 대기중 순방사량은 0 - 300 W/m² 범위에서 뚜렷한 일주기 변화가 관측되었다 (그림 30). 21시에 가장 높은 값이 관측되었고 5 - 15시에는 평균 25 W/m²로 최대 순방사량의 10%에도 못 미치는 값이 나타났다. 순방사량의 최대 변화는 광량이 감소하는 17시와 광량이 증가하는 00시에 관측되었다. 광합성 유효 방사량은 해양생물 생태계에 중요한 영향을 끼치는 환경인자이다. 수층내 광합성 유효 방사량의 시간에 따른 변화는 공기중에서 관측된 순방사량의 일주기 변화와 중요한 상관성을 보인다. 순방사량이 최대인 17시에 광합성 유효 방사량의 최대 수심 또한 최대값이 나타났다. 광합성 유효 방사량이 1 %가 되는 유광층은 55 - 60 m에 분포하였다.

동물플랑크톤은 수층의 물리적인 특성 변화에 민감하게 반응하기 때문에 동물플랑크톤의 일주기 변화를 이해하기 위해서는 해빙 하부 수층 구조의 이해가 기본적으로 선행되어야 한다. 조사기간 동안 관측된 수층 구조는 수직적으로 명확하게 구분되며 시간에 따른 변화는 크지 않게 나타났다 (그림 31). 표층에 저온 (-1 °C) 저염 (28 psu)의 SMW (surface mixed water), 50~70 m 수심에 고온 (0 °C)의 PSW (pacific summer water), 그 아래로 저온 (<-0.5 °C)의 PWW (pacific winter water)로 구분되는 전형적인 북극해 수층 구조가 관측되었다. 식물플랑크톤의 대리자로 사용할 수 있는 형광 (Fluorescence)은 관측기간 동안 PSW에서 상대적으로 가장 높게 (0.5 mg/m³) 나타났으며 용존 산소량은 40 m 수심에서 290 umol/kg으로 가장 높은 값이 나타났다.

해빙하부의 유속 분포는 음향도플러유속계로부터 측정된 U (동-서 방향 유속)와 V (남-북 방향 유속)로 확인하였다 (그림 32). 약 4일 동안 1분 간격으로 측정된 유속 데이터는 Teledyne RDI Instruments사에서 제공하는 WinADCP 프로그램으로 후 처리 (post processing)를 수행하였으며 절대 유속을 계산하기 위해서 조석 변화와 해빙의 이동 속도를 보정하였다. U와 V 모두 12 시간 주기의 분명한 변동성이 나타났으며 이는 조석주기 보다는 관성 운동에 의한 영향으로 추정할 수 있다.

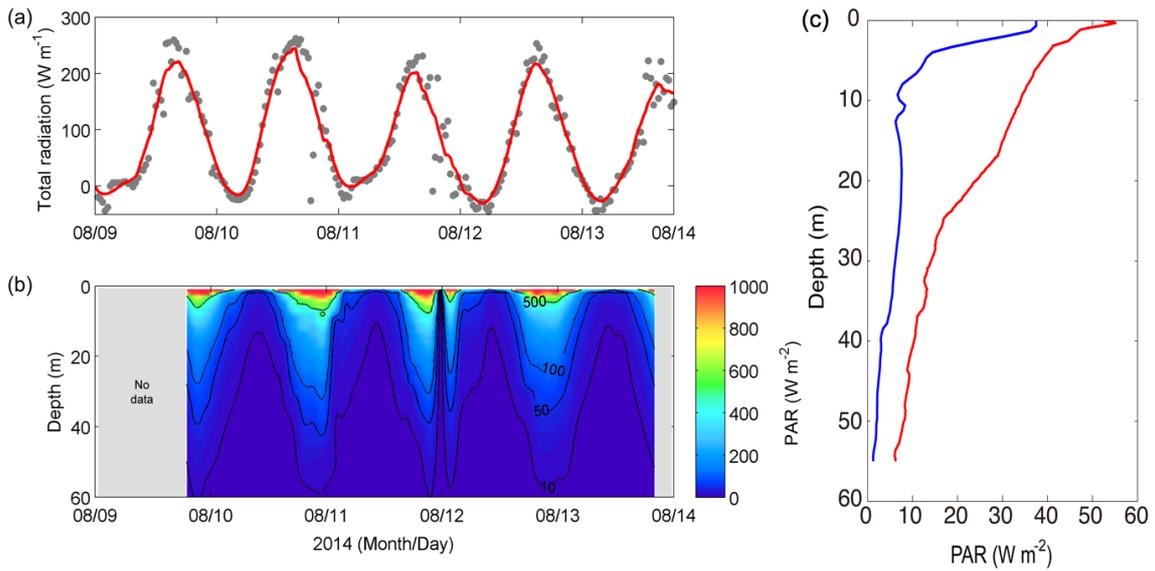


그림 30. (a) 관측 기간 동안 광량의 일 주기 변동성. (b) CTD로 관측된 광합성 유효방사 (Photosynthetically active radiation, PAR)의 시간에 따른 변동성 (c) 해빙 유무에 따른 수층내 광합성 유효방사의 수직 분포. 파란색 라인은 1~2 m 두께의 해빙이 존재할 경우 광합성 유효방사의 수직 구조이며 빨간색 라인은 해빙이 없을 경우 광합성 유효방사의 수직 구조를 나타낸다.

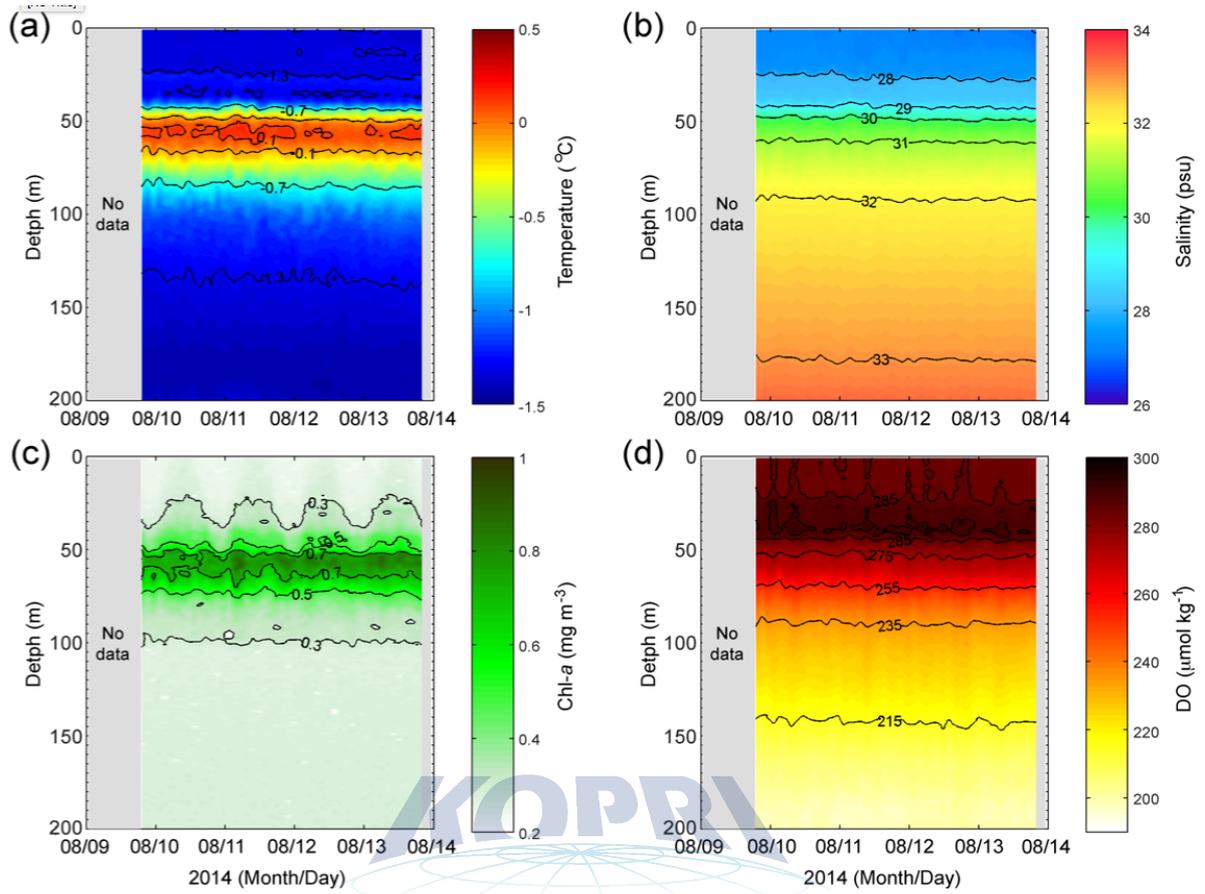


그림 31. 수층 해양환경의 시간에 따른 수직 분포 특성. (a) 수온, (b) 염분, (c) 엽록소, (d) 용존산소량.

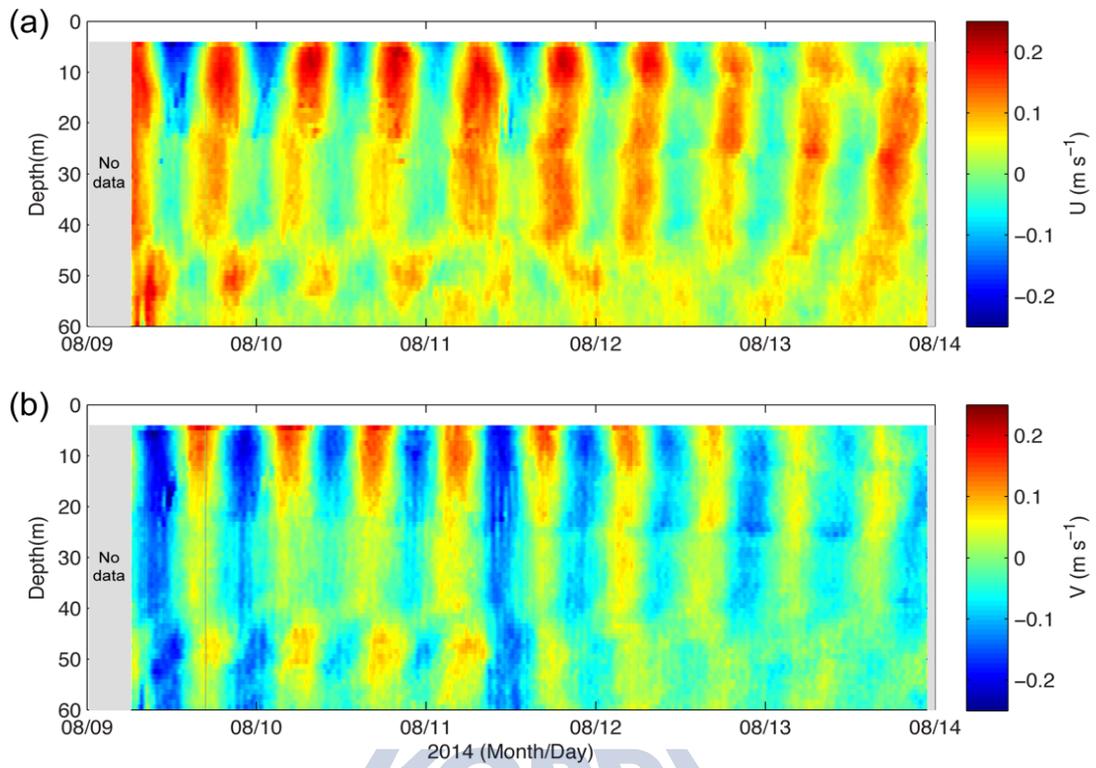


그림 32. 수층내 해류 속도 수직 구조의 시간에 따른 변동성. (a) 동-서 방향 해류 속도. (b) 남북 방향 해류 속도. 빨간색은 해류가 동쪽 그리고 북쪽으로 강하게 흐르고 있음을 의미한다.

관측해역의 입자성 유기물질은 전반적으로 매우 낮게 측정되었다. 약 4일 동안 채집된 입자성 유기물질의 총 중량은 평균 1.76 mg/L 으로 T1에서 상대적으로 가장 낮은 1.26 mg/L, 그리고 T3에서 가장 높은 2.48 mg/L가 나타났다. 반면 입자성 유기물질의 총 중량 대 유기 탄소의 비는 T1에서 9.0%로 가장 높게 나타났으며 T2와 T3에 비해 2 - 3배 높게 확인되었다 (표 7).

표 7. 입자성 유기물질 총중량과 유기탄소

Sediment trap	Total mass (mg/L)	POC/Total mass (%)
T1	1.26	9.0
T2	1.53	3.2
T3	2.48	4.3

동물플랑크톤은 수심 15 m에 위치 시킨 퇴적물 트랩인 T1에서만 채집되었으며 수심 60 m에 있던 두 개의 퇴적물 트랩에서는 동물플랑크톤이 확인되지 않았다. T1에서 채집된 동물플랑크톤은 모두 북극해에서 가장 우점하는 종인 요각류였으며 평균 크기 (prosome length)는 0.4 cm (SD = 0.12) 로 나타났다 (그림 33). 이 결과로부터 북극해 해빙하부에 서식하는 요각류는 용빙이 활발한 하계 기간에는 수심 60 m 부근에는 분포하지 않으며 주로 수심 15 m 부근에 분포하는 것으로 추정할 수 있다.



그림 33. 퇴적물 트랩으로 획득한 동물플랑크톤 (북극 요각류, Arctic copepod)

퇴적물 트랩 결과로부터 조사 지역의 해빙하부에 서식하는 주요 동물플랑크톤이 요각류임을 확인할 수 있었다. 이들 요각류의 주요 서식 수심의 시간에 따른 변화를 파악하기 위해서 음향도플러유속계에서 측정되는 상대적인 음향 강도 (Automatic gain control, AGC)를 분석하였다. AGC는 요각류 생물량의 상대적인 차이를 나타내는 값으로 사용되어 시간에 따른 요각류의 수직 분포를 파악할 수 있다. 그림 34는 시간에 따른 AGC의 수직 변화를 보여준다. 해빙아래 수심 10 m 이내에서 가장 높은 AGC가 확인되었고 수심 20 - 45 m 에서도 규칙적으로 높은 AGC가 나타나며 동물플랑크톤의 전형적인 일주기 수직 이동 패턴이 확인되었다. 4일 동안 광량이 상대적으로 높은 시간에 수심 깊은 곳 (45 m)으로 이동하고 광량이 낮은 시간에 표층 (20 m)으로 이동하는 일주기 패턴이 규칙적으로 나타났다. 일주기 패턴은 주파수 스펙트럼을 이용한 주기 분석에서도 확인되었다 (그림 35). 평균적으로 13시 (UTC)에 하강을 시작하고, 03시 (UTC)에 상승하였으며 수직 이동 속도는 약 0.6 cm/min 로 측정되었다. 본 보고서에서는 동물플랑크톤 서식 수심을 파악하기 위한 목적으로 상대적인 음향 신호의 세기인 AGC를 사용하였다. 하지만 동물플랑크톤 생물량을 추정하고 이들 생물량의 변화를 확인하기 위해서는 상대적인 음향 신호의 세기를 음파 방정식을 이용하여 절대 후방 산란 강도로의 환산이 필요하다. 따라서 추후 절대 후방 산란 강도를 이용한 동물플랑크톤 생물량 변화에 대한 연구가 진행할 예정이며 서식 수심 변화와 함께 동물플랑크톤 행동을 이해하고 해석하는데 활용하고자 한다.

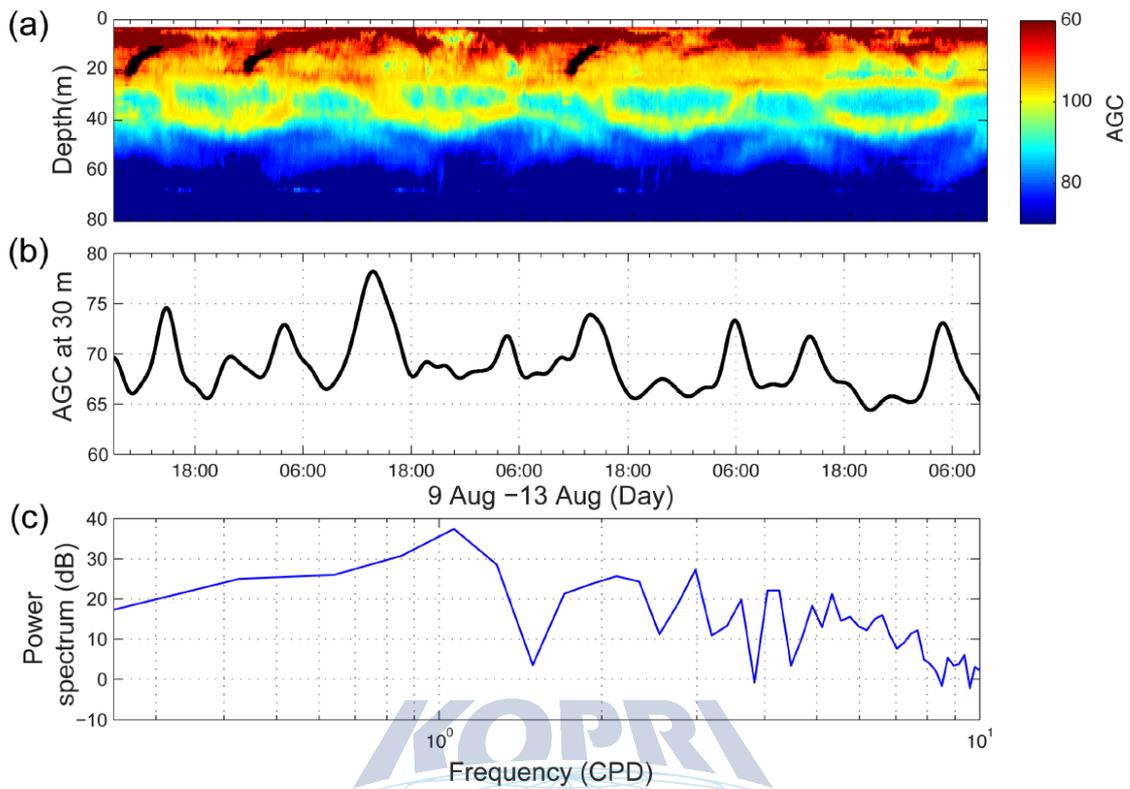


그림 34. (a) 음향 도플러 유속계로 관측된 음향 세기 (Automatic gain control, AGC)의 시간에 따른 변동성. (b) 수심 30 m 음향 세기의 시간에 따른 변동성과 (c) 수심 30 m 음향 세기의 주기성.

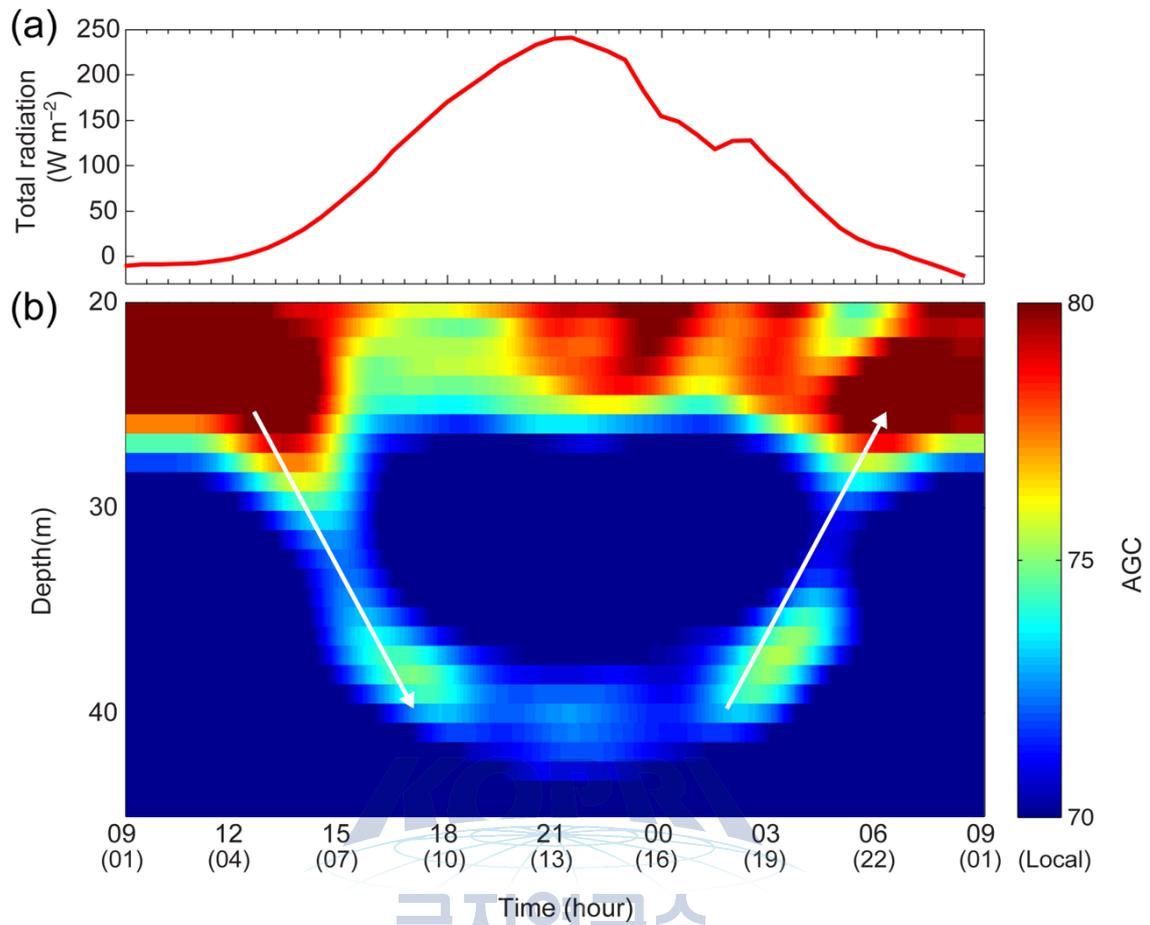


그림 35. 광량의 일주기 변화에 따른 동물플랑크톤의 평균 일주기 수직 변화. (a) 대기중 평균 순방사량의 일주기 변화 (b) 음향 도플러 유속계로 측정한 AGC (automatic gain control) 의 평균 일주기 수직 변화

2. 음향산란층의 중장기 변동성

음향 도플러 유속계 (ADCP)는 해류 유속과 유향의 수직 구조뿐 아니라 (Kaneko et al., 1990; Shin et al., 2006; Kang et al., 2012) 해양생물 (동물 플랑크톤, 소형 어류) (Flagg and Smith, 1989, Zimmerman and Biggs, 1999, Wade and Heywood, 2001, Lu et al., 2007; Benoit et al., 2008; Geoffroy et al.)을 연구하는데 유용한 관측장비이다. 음향 도플러 유속계는 많은 해역에서 동물플랑크톤의 시공간 분포를 파악하는데 활용되고 있다 (Plueddemann and Pinkel, 1989; Zhou et al., 1994; Blachowiak-Samolyk et al., 2006; Brierley et al., 2006; van Haren, 2007; Berge et al., 2009; Cisewski et al., 2010; Wallace et al., 2010). 특히 해저면 고정형 계류 라인에 고정하여 장기 관측을 통해서 동물플랑크톤의 계절 및 연간 패턴과 일주기 수직 이동을 연속 측정하고 원인을 파악하는데 활용할 수 있다 (van Haren, 2007; Cisewski et al., 2010; Wallace et al., 2010).

수직 이동은 동물플랑크톤의 일반적인 행동 패턴으로 포식자 회피 (Zaret and Suffern, 1976; Bollens et al., 1992; Fortier et al., 2001), 식물 플랑크톤 분포 (Thorisson, 2006), 바이오 리듬 (Hays, 2003), 그리고 광도의 변화 (Forward, 1988; Ringelberg, 1995) 등 다양한 원인에 의해서 나타난다. 일 주기 수직 이동, 계절 주기 수직 이동, 년 주기 수직 이동과 같이 다양한 시간 주기에 따라서 발생하기 때문에 동물플랑크톤 수직 이동의 특성을 파악하고 원인을 이해하기 위해서는 고해상도 장기 관측 자료의 획득이 필수적이다. 이러한 장기 관측 자료는 전지구 기후 변화와 탄소 순환을 포함하는 해양생태계 변화에 대한 동물플랑크톤 반응 그리고 동물플랑크톤 수직 이동이 이들 환경 변화에 미치는 효과를 이해하는데 도움을 줄 수 있다 (Al-Mutairi and Landry, 2001; Steinberg et al., 2002). 하지만 수직 이동에 대한 수십 년 간의 연구에도 불구하고, 극지해의 시공간 변화가 큰 해빙과 날씨가 따른 접근성의 어려움으로 동물플랑크톤과 해양환경요인의 상호 역할에 대한 이해는 여전히 제한적이다.

이번 장에서는 북극해 동물플랑크톤의 중장기 변동성을 확인해 보기 위해서 JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science And Technology)에서 운용한 음향 도플러 유속계로 측정한 동물플랑크톤으로부터 수신된 음향 산란층의 수직 변화를 파악하고자 한다. 장기 관측 데이터가 많지 않은 북극해 결빙 해역 해양생태계 연구를 위한 도움이 될 것으로 판단된다.

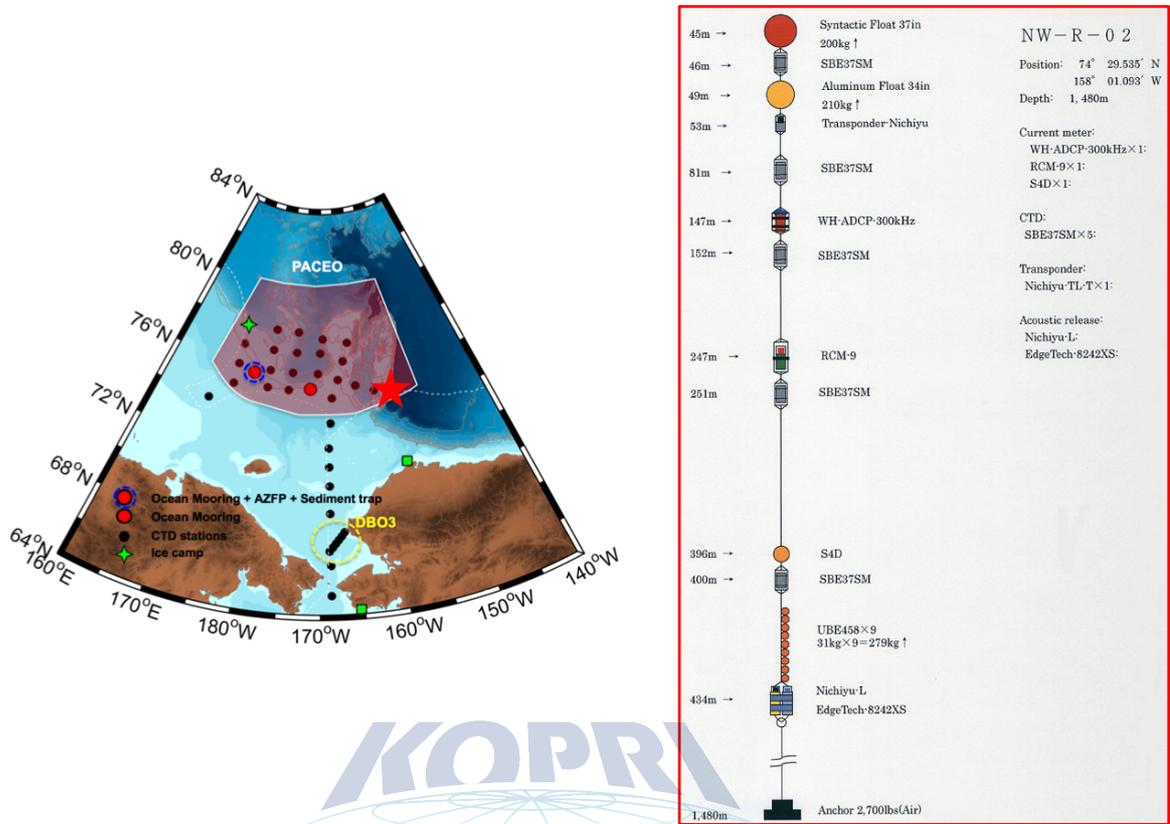


그림 36. 연구 해역과 무어링 정점 (74° 29.535'N, 158° 01.093'W) 그리고 JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science And Technology)의 해저면 계류형 무어링 디자인.

JAMSTEC은 노스윈드 리지 (Northwind ridge)와 캐나다 분지 근처 ($74^{\circ} 29.535'N$, $158^{\circ} 01.093'W$) 에서 해저면 고정형 계류 시스템을 이용하여 3년 (1997, 2002, 2003) 동안 운용 하였다 (그림 36). 노스윈드 리지 주변의 수층 구조는 바람에 기인한 용승, 소규모 소용돌이에 의한 복잡한 혼합 패턴을 보여주기 때문에 영양염과 일차생산성 변화에 의한 해양생태계에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 캐나다 분지 주변 해역은 다수의 중층 소용돌이가 발생하고 하계 기간 해빙 면적이 시공간적으로 변하면서 해양생물, 물리, 화학 연구에 있어서 중요한 관측 해역으로 알려져 있다.

그림 37은 음향 도플러 유속계를 이용해서 1년 (2002년 9월 - 2003년 8월) 동안 관측한 해류 방향과 속도 그리고 음향 신호 세기의 수직 구조 (표층 - 140 m) 를 보여 준다. 유속의 세기 (vertical magnitude)는 수심에 따른 변화는 크지 않으며 0 - 50 cm/sec 범위에서 관측되었다. 특히 8 - 9월, 2월 15일 - 3월 15일 기간에 40 cm/sec 이상의 상대적으로 강한 흐름의 유속이 나타났으며 동-서 방향의 유속과 남-북 방향의 유속 역시 같은 시기에 상대적으로 강한 흐름의 강한해류가 관측되었다. 전체적으로 해류는 북동방향의 흐름이 주를 이루면서 3월, 8월, 9월에 강한 서쪽 방향의 흐름이 관측되었다. 음향 신호의 세기는 음향 산란층내에 분포하는 동물플랑크톤과 소형어류와 같은 부유성 해양생물의 생물량을 나타낸다. 음향 신호의 세기는 수심에 따른 차이를 보였으며 표층 0 - 40 m 에 가장 강한 음향 산란층이 분포하였다. 음향 산란층 수직 구조의 일 변화와 해류 유속과의 관계를 보기위해서 하계 기간인 9월 15일 - 30일의 분포를 확인하였다 (그림 38). 해류 유속의 세기는 9월 20 - 23일, 25 - 27일 20 cm/sec 이상으로 뚜렷하게 강하였으며 20 - 23일에는 강한 북서쪽 방향의 흐름이 25 - 27일에는 남동쪽 방향의 해류 흐름이 나타났다. 수심에 따른 변화는 크지 않지만 1일 반조 주기의 뚜렷한 일 변화를 확인할 수 있었다. 음향 산란층의 세기는 시간에 따른 뚜렷한 일주기 수직 변화가 일정하게 나타났으며 유속의 강약과 방향과 무관하게 나타나는 것으로 보아 음향 산란층의 일주기 수직 변화는 해류의 유속 또는 방향에 영향을 받지 않는 것으로 판단되었다.

그림 39는 음향 산란층 일주기 수직 변화의 월별 패턴을 보여준다. 1년 중 6 개월 (9 - 11월, 6 - 8월)은 뚜렷한 일주기 수직 변화가 나타났으며 다른 6 개월은 일주기 변화가 뚜렷하게 확인되지 않았다. 일주기 변화가 뚜렷한 6 - 11월 동안에도 일주기 패턴의 차이가 나타났다. 시간이 지나면서 수심 깊은 곳으로 내려온 후 일정 시간 머무르고

다시 얇은 수심으로 올라갈 때 6 - 9월에는 약 6시간 동안 깊은 수심에 머무르는데 반해 10 - 11월은 약 10 시간 동안 깊은 수심에 머무르는 다른 패턴을 확인할 수 있었다. 음향산란층 일주기 수직 변화가 월별로 다른 패턴을 보이는 이유는 북극해 해빙 면적의 계절 변화가 주요 원인인 것으로 판단된다 (그림 40).



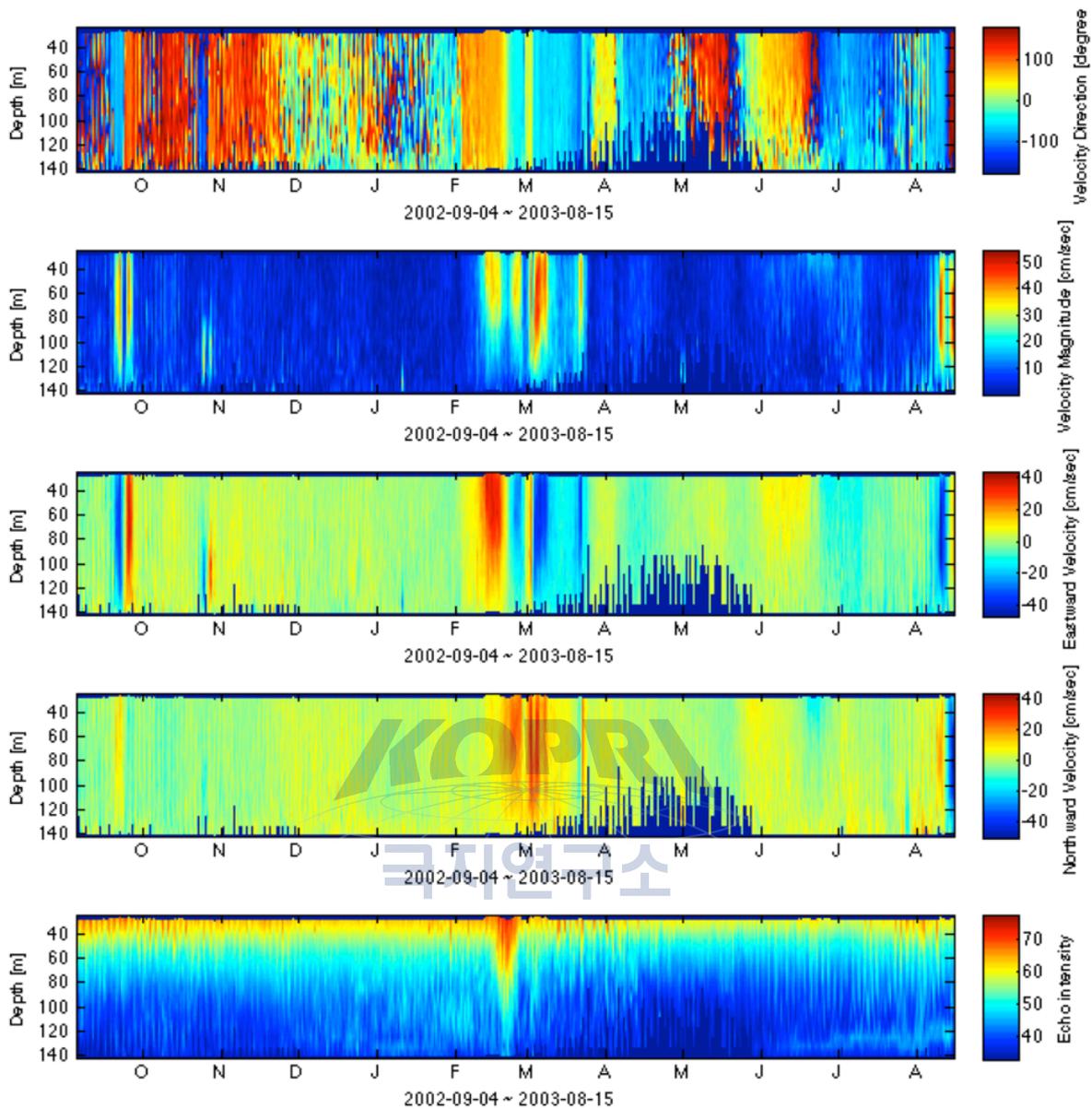


그림 37. 음향 도플러 유속계 (300 kHz)로 관측된 해류와 음향산란층 수직 구조의 시간에 따른 변화 (2002. 9월 - 2003년 8월). 유속의 방향 (velocity direction)과 세기 (velocity magnitude), 동-서 방향 유속 (Eastward velocity), 남-북 방향 유속 (Northward velocity), 그리고 상대적인 음향 세기 (Echo intensity, automatic gain control)

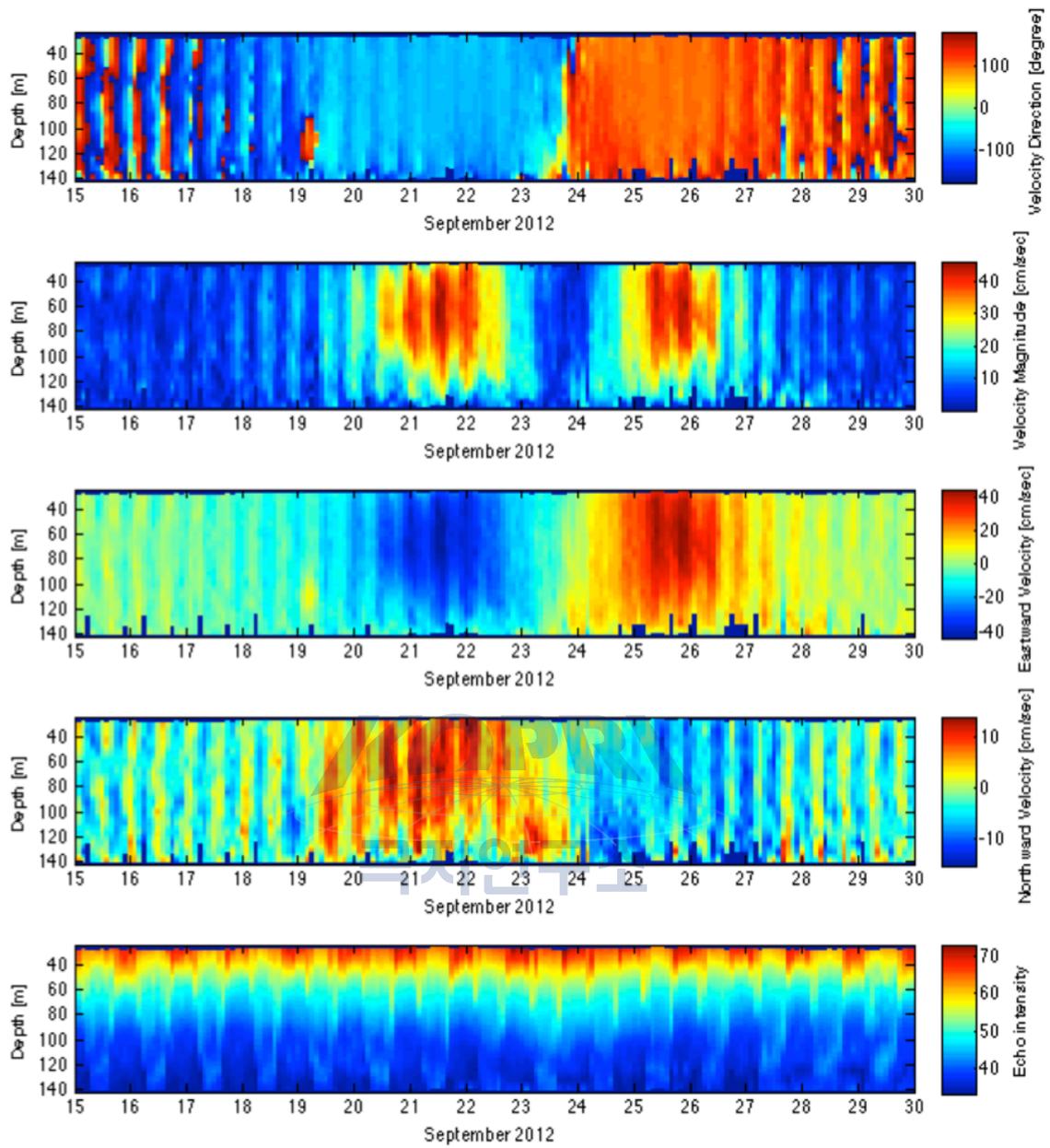


그림 38. 2002년 9월 15 - 30 일 음향 도플러 유속계 (300 kHz)로 관측된 해류와 음향산란층 수직 분포 변화. 유속의 방향 (velocity direction)과 세기 (velocity magnitude), 동-서 방향 유속 (Eastward velocity), 남-북 방향 유속 (Northward velocity), 그리고 상대적인 음향 세기 (Echo intensity, automatic gain control).

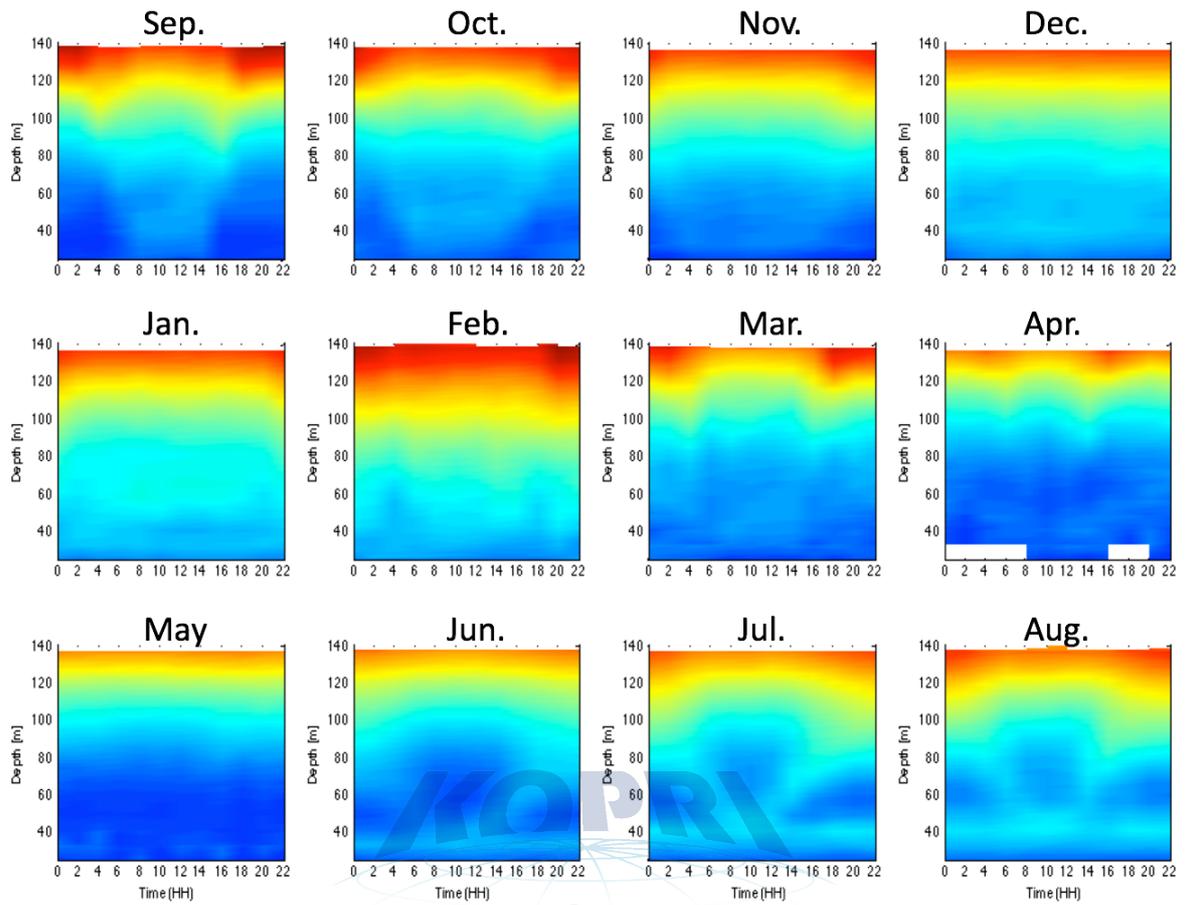


그림 39. 음향산란층의 평균 월 변동.

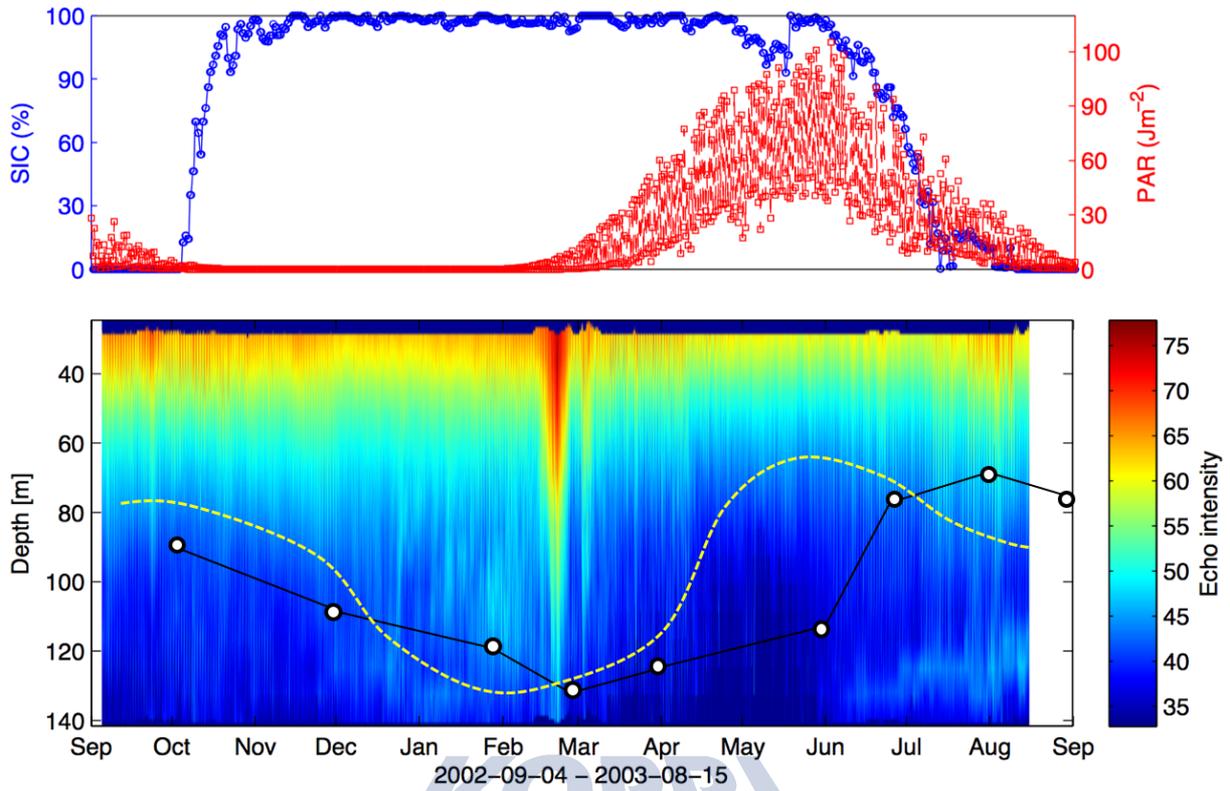


그림 40. 북극해 해빙 변화에 따른 음향산란층의 일주기 반응. 해빙 농도 (sea ice concentration, SIC), 광합성 유효 방사 (photosynthetic active radiation, PAR), 상대적인 음향 세기 (echo intensity, automatic gain control). 노란색 점선은 음향 산란층 최대 수심의 계절 변화를 나타내며 흰색 원은 요각류 oil sac의 계절 변화 (Pasternak et al., 2001)를 나타냄.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표달성도

1. 연구개발 목표 및 내용

구 분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2016-2017)	계류형 다중주파수 음향시스템을 활용하여 북극해 주요 동물플랑크톤 생태계의 장기 변동성 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석 - 북극해 아라온 관측 해역에서의 동물플랑크톤 군집 특성 파악 - 계류형 다중주파수 음향시스템 설치 및 회수 - 다중주파수 음향데이터 분석 및 주요 동물플랑크톤 분포 (주요 서식 수심 및 생물량) 의 장기 변동성 파악

2. 추진전략 및 목표 달성도

본 연구 목적을 위해 계획한 추진 전략과 목표 달성 예상도는 표 8.과 같다. 북극해 해양환경에 대한 이해를 위해서 기존에 관측된 데이터를 바탕으로 물리, 생물, 화학적 환경 특성을 이해하고 동물플랑크톤 군집 구성 및 주요 종을 파악하고자 하였다. 동물플랑크톤의 장기 변동성을 파악하기 위한 다중주파수 음향 시스템을 계류 및 회수하여 관측된 음향 데이터와 북극해 해양환경 변화와의 관계를 연구하고자 하였다. 하지만 연구 수행 중 애기치 못한 북극해 해양환경 변화에 의해서 당초 계획했던 해저면 계류형 무어링 시스템을 회수하지 못하였다. 따라서 연구 추진 전략과 목표 달성도를 수정하였으며 표 9. 와 같이 해상실험에 장기 계류형 다중주파수 음향시스템 대신 단기 계류형 음향시스템을 활용하여 동물플랑크톤의 일주기 변화와 이들 변화에 영향을 미치는 해양 환경 인자를 파악하고자 하였다.

표 8. 월별 추진일정 및 달성도

세부연구분야	월별 추진일정 및 달성도											
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
- 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석	■	■	■	■								
- 북극해 동물플랑크톤 분포 및 생태학적 특성 파악					■	■	■	■	■	■	■	■
- 해상실험: 계류형 다중주파수 음향시스템 회수 및 재계류			■	■	■							
- 다중주파수 음향데이터 분석 및 주요 동물플랑크톤 생태계의 장기 변동성 파악							■	■	■	■	■	■

표 9. 변경된 추진일정 및 달성도

세부연구분야	월별 추진일정 및 달성도 (변경 안)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
- 북극해 해양환경 기초 자료 수집 및 분석	■	■	■	■								
- 북극해 동물플랑크톤 분포 및 생태학적 특성 파악					■	■	■	■	■	■	■	■
- 해상실험: 단기 계류형 음향시스템 활용 연구			■	■	■							
- 단기 계류형 음향데이터 분석 및 주요 동물플랑크톤의 일주기 변동 파악							■	■	■	■	■	■

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 기술적 파급효과

- 북극 해양생태계에서 중위영양단계 (동물플랑크톤)는 하위영양단계 (식물플랑크톤)와 상위포식자 (어류, 새, 고래)를 연결하는 먹이 생태계의 주요 연결 고리로서 해양생태계 전체의 건강상태를 압축 표현하는 평가 지표로 활용될 수 있음
- 이들 생태계가 지구 온난화에 따른 급격한 해빙면적 감소, 수온상승, 해양산성화로 심각한 위협을 받으며 종 분포, 군집 구성, 생물량, 서식지 변동, 생리학적 기능에 큰 변화를 겪고 있으며 이러한 생태계의 변화를 이해하고 원인 파악을 위한 장기 관측 필수.
- 동물플랑크톤은 해양생태계의 주요 연결 고리로서 이들의 분포와 거동을 장기 관측하는 것은 북극해 해양환경과 해양생태계 변화에 대한 이해 증진과 연결되며 향후 기후 변화에 따른 급격한 변화를 겪고 있는 북극해 해양생태계의 상태를 파악하고 예측하는 평가지표로 활용될 수 있음. 하지만 시공간 변동성이 큰 동물플랑크톤의 경우 해빙으로 인한 접근성의 제한, 연속 관측의 어려움 그리고 고비용의 연구선 사용과 같은 문제로 인하여 충분한 장기 관측 데이터가 없음.
- 동물플랑크톤 관측에 전통적으로 활용되는 네트는 군집 구성 파악을 위한 최선의 관측 방법이지만 광대역에 분포하고 있는 동물플랑크톤의 공간 변화 및 시간에 따른 연속 관측에 제한이 있음. 연구선 선저에 부착된 음향센서를 활용하는 연구선 기반 음향 조사 방법 또한 해빙 면적이 최소가 되는 하계기간에 제한되며 연속 관측의 어려움이 있음. 따라서 거친 해양 환경과 시공간 변화가 큰 북극해 해빙의 분포와 무관하게 장기적으로 동물플랑크톤의 생물량 및 서식 특성을 파악할 수 있는 새로운 관측 방법이 필요함.

2. 사회적 경제적 과학적 파급효과

- 북극해는 풍부한 지하자원과 수산자원의 보고, 경제적 이용 가치 그리고 전 지구적 해양생태계변화 연구에서의 중요성으로 전 지구적인 관심 해역으로 대두되고 있음.
- 북극해 수산자원 변화에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 동물플랑크톤의 장기적인 자료 수집 및 기초 데이터 제공에 기여할 수 있음.
- 여전히 '미개척' 연구 분야로 남아 있는 북극해 해빙 변화와 동물플랑크톤 행동과 생물량 변화를 이해하기 위한 지표로 활용될 수 있으며 북극해 해양생태계의 건강상태를 장기 모니터링 할 수 있는 자료로 활용 가능.
- 북극해 국제 커뮤니티에서 한국 극지과학의 사회적 위상 증대 기대.
- 다양한 관측 시스템 확대를 통하여 극지연구소 주도의 국제공동연구 기반 마련.
- 하루 수천만원의 비용이 소요되는 연구선의 단 며칠 비용으로 연구선으로는 관측이 불가능한 동물플랑크톤 생태계의 장기 변화를 관측 할 수 있어 운영비 대 데이터 품질이 매우 높음.
- 본 연구는 향후 북극해 장기 해양생태계의 변동성 감시와 미래 예측 체계 구축을 위한 기반 연구로 활용될 수 있을것으로 판단됨.

제 5 장 연구개발 결과 활용 계획

- 본 과제를 통해서 확인된 계류형 음향시스템 활용성은 향후 남극과 북극의 해양생태계의 변화를 이해하고 미래 전망을 위해 크다고 할수 있다. 특히 기존의 관측이 어려웠던 해양생태계의 중위영양단계 (동물플랑크톤, 어류)와 상위영양단계 (해양 포유류)의 장기 모니터링에 유용하게 활용될 수 있다 (그림 42).
- 남북극해 결빙해역은 현재 가장 많이 활용하고 있는 연구선 기반 관측방법으로는 시공간적인 제약이 따른다. 계류형 음향 관측 플랫폼은 시간에 따른 장기적인 연속 관측과 해빙 하부에서 형성되는 해양생태계 변화를 파악하는데 유용한 관측 방법으로 사려된다.
- 향후 북극해에서 운용되고 있는 다양한 관측 플랫폼 (해빙 부이, 표층 표류형 부이, 수중 글라이더, 해저면 고정형 무어링 등)과의 융합을 통해서 급격한 북극해 온난화에 따른 해양생태계 전체의 반응을 함께 관측하고 상호 관계를 파악하는데 활용할 수 있을것으로 판단된다 (그림 43).
- 본 과제를 수행하는 중 해저면 고정형 무어링 라인이 없어지는 애기치 못한 상황이 발생하였고 북극해의 두꺼운 다년생 해빙이 그 원인으로 예상된다. 따라서 지속적인 극지 해양연구를 안정적으로 수행하기 위해서는 시공간 변동이 큰 해빙과 빙하를 탐지 - 판단 - 회피 할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.
- 해저면 고정형 계류 장비의 경우 표층에 존재하는 해빙 또는 빙하를 관측할 수 있는 해빙 관측 음향시스템을 함께 탑재하여 능동적으로 파악하고 판단해서 회피할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 41. 남극해와 북극해 주요 해양생물 자원



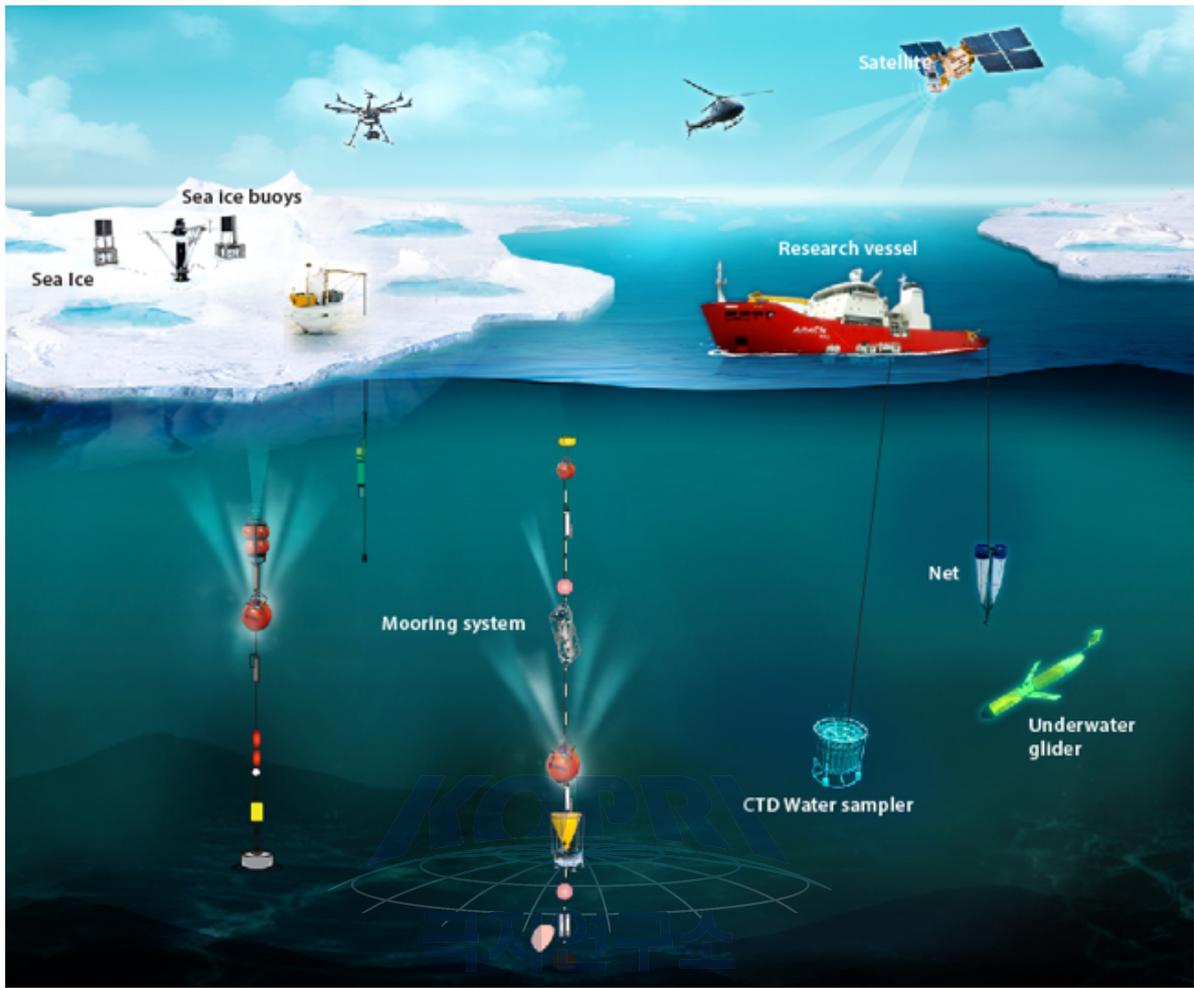


그림 42. Korea Arctic Ocean Observing System (K-AOOS)에 구상중인 해빙-해양 관측 시스템 개념도.

제 6 장 참고문헌

김수암 외 1998. 남극해 유용생물자원 개발 연구 보고서. 해양수산부.

Al-Mutairi, H., Landry, M.R., 2001. Active export of carbon and nitrogen at station ALOHA by diel migrant zooplankton. *Deep-Sea Res. II* 48, 2083-2103.

Anderson, Marti J., 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*. 26 (1): 32-46.

Anderson, Marti J., and Trevor J. Willis., 2003. Canonical analysis of principal coordinates: a useful method of constrained ordination for ecology. *Ecology* 84(2) 511-525.

Benoit, D., Simard, Y., Fortier, L., 2008. Hydro-acoustic detection of large winter aggregations of Arctic cod (*Boreogadus saida*) at depth in ice-covered Franklin Bay (Beaufort Sea). *J. Geophys. Res.* 113 (C06), S90.

Berge, J., Cottier, F., Last, K.S., Varpe, O., Leu, E., Soreide, J., Eiane, K., Falk-Petersen, S., Willis, K., Nygard, H., Vogedes, D., Griffiths, C., Johnsen, G., Lorentzen, D., Blachowiak-Samolyk, K., Kwasniewski, S., Richardson, K., Dmoch, K., Hansen, E., Hop, H., Falk-Petersen, S., Mouritsen, L.T., 2006. Arctic zooplankton do not perform diel vertical migration (DVM) during periods of midnight sun. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 308, 101-116.

Borg, I., Groenen, P., 2005. *Modern Multidimensional Scaling: theory and applications* (2nd ed.). New York: Springer-Verlag. pp. 207-212

Bollens, S.M., Frost, B.W., Thoreson, D.S., Watts, S.J., 1992. Diel vertical migration in zooplankton: field evidence in support of the predator avoidance hypothesis. *Hydrobiologia* 234, 33-39.

Breiman, Leo; Friedman, J. H.; Olshen, R. A.; Stone, C. J., 1984. *Classification and regression trees*. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.

Brierley, A.S., Saunders, R.A., Bone, D.G., Murphy, E.J., Enderlein, P., Conti, S.G., Demer, D.A., 2006. Use of moored acoustic instruments to measure short-term

- variability in abundance of Antarctic krill. *Limnol. Oceanogr. Methods* 4, 18-29.
- Brierley, A.S., 2009. Diel vertical migration of Arctic zooplankton during the polar night. *Biol. Lett.* 5, 69-72.
- Cha BY, Chang DS and Kim BY., 2004. Seasonal variation of fish catch by a set bet in Hamdeuk fishing ground off Jeju island. *J Kor Fish Soc* 37, 65-72.
- Cho SH, Kang DH, Na JY, Myoung JG, Kim JM., 2006. Side-Aspect Target Strength Measurement of Swimbladdered Fish Using Multi-Frequencies System: Black Sea Bream (*Acanthopagrus schlegeli*). *J Acou Soc Kor* 25(3E), 101-109.
- Cisewski, B., Strass, V.H., Rhein, M., Kragefsky, S., 2010. Seasonal variation of diel vertical migration of zooplankton backscatter time series data in the Lazarev Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res.* 57, 78-94.
- Clarke, K. R., 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Austral Ecology.* 18 (1), 117-143.
- Clarke, K.R., Gorley, R.N., 2006. *PRIMER 6 User Manual/Tutorial*. PRIMER-E Ltd, Plymouth.
- David A. Freedman, 2009. *Statistical Models: Theory and Practice*. Cambridge University Press. pp. 128.
- Flagg, C.N., Smith, S.L., 1989. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance. *Deep-Sea Res.* 36 (3), 455-474.
- Fortier, M., Fortier, L., Hattori, H., Saito, H., Legendre, L., 2001. Visual predators and the diel vertical migration of copepods under Arctic sea ice during the midnight sun. *J. Plankton Res.* 23, 1263-1270.
- Forward, R.B., 1988. Diel vertical migration: zooplankton photobiology and behaviour. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 26, 361-396
- Geoffroy, M., Robert, D., Darnis, G., Fortier, L., 2011. The aggregation of polar cod (*Boreogadus saida*) in the deep Atlantic layer of ice-covered Amundsen Gulf (Beaufort Sea) in winter. *Polar Biol.* 34, 1959-1971.
- Hill, M.O. and Gauch, H.G., 1980. Detrended Correspondence Analysis: An Improved Ordination Technique. *Vegetatio* 42, 47-58.

- Itoh, M., Carmack, E., Shimada, K., McLaughlin, F., Nishino, S., & Zimmermann, S., 2007. Formation and spreading of Eurasian source oxygen-rich halocline water into the Canadian Basin in the Arctic Ocean. *Geophysical research letters*, 34(8).
- IPCC, 2007. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kang, D.H. and J.Y. Na, 1994. Comparison of the Temperature Profile with the Backscattering Strength by the ADCP Data in the Southwestern Part of the East Sea. *J. Korean Soc. Oceanog.*, 29(3), 287-295.
- Kang DH, Hwang DJ, Soh HY, Yoon YH, Suh HL, Kim YJ, Shin HC and Iida K., 2003. Density estimation of an euphausiid (*Euphausia pacifica*) in the sound scattering layer of the East China sea. *J Kor Fish Soc* 36, 749-756.
- Kang DH, Im YJ, Lee CW, Yoo JT and Myoung JG., 2008. Hydroacoustic survey of spatio-temporal distribution of demersal fish aggregations near the West Coast of Jeju Island, Korea. *Ocean and Polar Res* 30, 181-191.
- Kaneko, A., Koterayama, W., Honji, H., Mizuno, S., Kawatate, K., Gordon, R.L., 1990. Cross-stream survey of the upper 400 m of the Kuroshio by an ADCP on a towed fish. *Deep-Sea Res.* 37, 875-889.
- Kang, S.K., Jung, K.T., Yun, K.D., Lee, K.S., Park, J.S., Kim, E.J., 2012. Tidal dynamics in the strong tidal current environment of the Uldolmok waterway, southwestern tip off the Korean Peninsula. *Ocean Sci. J.* 47 (4), 453-463.
- Kim JI, Yang WS, Oh TY, Seo YI, Kim ST, Hwang DJ, Kim EH and Jeong SB., 2008. Acoustic estimates of anchovy biomass along the Tongyoung-Namhae coast. *J Kor Fish Soc* 41, 61-67.
- Lee H.B., Kang DH, Im YJ, and Lee KH., 2014. Distribution and Abundance of Japanese Anchovy *Engraulis japonicus* and other Fishes in Asan Bay, Korea, estimated Hydroacoustic Survey. *Kor J Fish Aquat Sci* 47(5), 671-681.
- Lee JB, Oh TY, Yeon IJ, Kim BY, Shin HO, Hwang BK, Lee KH and Lee YW., 2012.

- Estimation of demersal fish biomass using hydroacoustic and catch data in the marine ranching area (MRZ) of Jeju. *J Kor Soc Fish Tech* 48, 128-136.
- Lu, L.G., Liu, J., Yu, F., Wu, W., Yang, X., 2007. Vertical migration of sound scatterers in the southern Yellow Sea in summer. *Ocean Sci. J.* 42 (1), 1-8.
- Mantel, N., 1967. The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research.* 27 (2): 209-220.
- McGarigal, K., S. Cushman, and S. Stafford, 2000. *Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research.* New York, New York, USA: Springer
- McLachlan, G. J., 2004. *Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition.* Wiley Interscience.
- Miyashita, K., Aoki, I., Seno, K., Taki, K. and Ogishima, T., 1996. Acoustic identification of isada krill, *Euphausia pacifica* Hansen, off the Sanriku coast, north-eastern Japan. *Fish. Oceanogr.* 6, 266-271.
- MOF Report., 2002. A study for the development of marine ranching program in Tongyeong, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea, 1-783.
- MOF Report., 2006. A study on the development of Jeonnam archipelago marine ranching program in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea, 1-640.
- MOF Report., 2007. Studies on the development of marine ranching program in the East, West and Jeju coast of Korea, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea, 1-562.
- Na, J.Y. and J.S. Park., 1989. Acoustic estimation of zooplankton distributions from the backscattered signal of the Acoustic Doppler Current Profiler in the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 24(4), 172-183.
- Nikolopoulos, A., Pickart, R.S., Fratantoni, P.S., Shimada, K., Torres, D.J. and Jones, E.P., 2009. The western Arctic boundary current at 152° W: Structure, variability, and transport. *Deep-Sea Research II* 56, 1164-1181.
- Pasternak, A., Arashkevich, E., Tande, K., & Falkenhaus, T., 2001. Seasonal changes in feeding, gonad development and lipid stores in *Calanus finmarchicus* and *C. hyperboreus* from Malangen, northern Norway. *Marine Biology*, 138(6), 1141-1152.

- Plueddemann, A.J., Pinkel, R., 1989. Characterization of the patterns of diel migration using a Doppler sonar. *Deep-Sea Res.* 36, 509-530.
- Ringelberg, J., 1995. Changes in light intensity and diel vertical migration: a comparison of marine and freshwater environments. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 75, 15-25.
- SeaBird Electronics, 2008. SeaSoft-Win32: SBE Data Processing User's manual.
- Shin, C.W., Kim, C., Byun, S.K., Jeon, D.J., Hwang, S.C., 2006. Southwestward intrusion of Korea Strait bottom cold water observed in 2003 and 2004. *Ocean Sci. J.* 41 (4), 291-299.
- Socha, D. G., J. L. Watkins, and A. S. Brierley., 1996. A visualization-based post-processing system for analysis of acoustic data. *ICES Journal of Marine Science*, 53. pp. 35-338.
- Steinberg, D.K., Goldthwait, S.A., Hansell, D.A., 2002. Zooplankton vertical migration and the active transport of dissolved organic and inorganic nitrogen in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res.* 49, 1445-1461.
- Thorisson, K., 2006. How are the vertical migrations of copepods controlled? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 329, 86-100.
- van Haren, H., 2007. Monthly periodicity in acoustic reflections and vertical motions in the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.* 34 (L12), 603. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL029947>.
- Wade, I.P., Heywood, K.J., 2001. Acoustic backscatter observations of zooplankton abundance and behavior and the influence of oceanic fronts in the northeast Atlantic. *Deep-Sea Res. II* 48 (2), 899-924.
- Wallace, M.I., Cottier, F.R., Berge, J., Tarling, G.A., Griffiths, C., Brierley, A.S., 2010. Comparison of zooplankton vertical migration in an ice-free and seasonally icecovered Arctic fjord: an insight into the influence of sea ice cover on zooplankton behavior. *Limnol. Oceanogr.* 55 (2), 831-845.
- Watkins, J. L., and A. S. Brierley. 2000. Verification of acoustic techniques used to identify Antarctic krill. Submitted *ICES Journal of Marine Science*.
- Woodgate, R.A., Aagaard, K. and Weingartner, T.J., 2005. A year in the physical

- oceanography of the Chukchi Sea: Moored measurements from autumn 1990-1991. Deep-Sea Research 52, 3116-3149.
- Zhou, M., Nordhausen, W., Huntley, M., 1994. ADCP measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsula in winter. Deep-Sea Res. 41, 1425-1445.
- Zimmerman, R.A., Biggs, D.C., 1999. Patterns of distribution of sound-scattering zooplankton in warm- and cold-core eddies in the Gulf of Mexico from a narrowband acoustic Doppler current profiler survey. J. Geophys. Res. 104 (C3), 5251-5262.
- Zaret, T.M., Suffern, J.S., 1976. Vertical migration in zooplankton as a predator avoidance mechanism. Limnol. Oceanogr. 21, 804-813.



뒷 면



(국내 과제용)

극지연구소

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.