

연구결과 단계보고서 서식

I. 인쇄규격

1. 크기 : A4 신판(가로 210mm*세로 297mm)
2. 제본 : 좌철
3. 용지
 - 1)표지 200g/m . 양면 아트지
 - 2)내용 80g/m . 모조지
4. 인쇄방법:
 - 1) 표지 : 바탕 백색, 활자 흑색
 - 2) 내용 : 흑색 지정활자로 인쇄한다. 그림 또는 그래프 등이 삽입된 경우 연구책임자의 재량에 따라 칼라로 인쇄 가능, 양면 또는 단면인쇄

II. 편집순서

1. 표 지(앞면)
2. 제출문
3. 보고서 초록
4. 요약문
5. Summary
6. 목 차
7. 본 문
8. 뒷면지



III. 참고사항

※ 전자조판 인쇄시에는 이 요령에 준한다.

표 지

(뒷면)	(측면)	(앞면)
↑ 7cm ↓ 주 의 (편집 순서8) (16 포인트 굵게) ↑ 7cm ↓	용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미치는 영향 이해 극지연구소	↑ 7cm ↓ 용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미치는 영향 이해 Understanding the supply of trace metals by glacier meltwater discharge and its effect on the plankton distribution 국립부경대학교 산학협력단 ↓ 7cm ↑

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구” 과제의 위탁 연구 “용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미치는 영향 이해” 과제의 단계보고서로 제출합니다.



2026 . 1 . 17

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 국립부경대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김 태 진

위탁참여연구원 : 김 지 우

“ : 최 원 진

보고서 초록

위탁연구과제명		용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미친 영향 이해			
위탁연구책임자	김 태 진	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	130,000,000
연구기관명 및 소속부서명	국립부경대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	31
해수 중에 미량으로 존재하는 용존 미량금속은 식물 플랑크톤의 성장을 제한할 수 있는 제한 인자로 알려져 있으나 미량금속 분석을 위한 시료의 채수, 전처리 및 분석 과정에서 오염될 가능성이 높아 신뢰 가능한 데이터를 확보하는데 큰 어려움이 있었음. 최근 미량금속 분석용 해수시료를 채취하기 위한 청정해수시료 채수시스템의 발전과 더불어 여러 해역에서 미량금속의 농도 데이터가 발표 되고 있으며, 이를 통해 미량금속의 생지화학적 순환과정과 미량금속이 생태계에 미치는 영향 등 과거 규명하지 못하였던 새로운 과학적 정보에 대한 연구가 가능하게 됨. 최근까지 남극해의 경우 미량금속의 농도가 고갈되어 있어 일차생산을 제한하는 제한인자로 알려져 왔으나, 지구 온난화로 인해 빙붕이 남극대륙으로부터 떨어져 해양으로 유입되고, 이런 빙붕은 높은 농도의 미량금속이 포함되어 있어 용빙이 녹을 경우 해양환경으로 다양한 미량금속이 방출되고, 이로써 높은 일차생산성이 나타날 가능성이 높다고 제시됨. 따라서 서남극해 용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 우선적으로 미량금속 분석용 청정 해수시료를 채수할 수 있는 채수시스템을 구축할 필요성이 있음. 본 과제에서는 미량금속 분석용 청정해수시료 채취를 위한 청정해수시료 채수시스템을 쇠빙연구선 아라온호에 구축하고, 시험항해를 통해 해수시료를 채취하여 일반 채수시스템과 미량금속의 농도 비교를 통해 청정해수시료 채수시스템의 필요성을 확인 하였으며, 해당 시스템을 2023년 및 2025년 아라온호 남극 항해에서 활용하여 데이터를 산출, 용빙수 기원 미량금속의 공급 및 수층생물에 미치는 영향을 조사함.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	미량금속, 청정시료채수시스템, 생물생산성, 용빙수, 남극			
	영 어	Trace metals, Clean seawater sampling system, Bioavailability, Melt water, Southern Ocean			

요 약 문

I. 제 목

용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미치는 영향 이해

II. 연구개발의 목적 및 필요성

미량금속 관측을 위한 청정해수시료 채수시스템을 확립하여 용빙수 기원 미량금속의 공급과정을 이해하고 수층생물에 미치는 영향 이해

III. 연구개발의 내용 및 범위

1) 미량금속 관측 시스템 구축

- 미량금속 관측을 위한 청정해수시료 채수시스템 구축

2) 청정해수시료 채수시스템의 고도화

- 기 구축 완료된 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수장비 비교
- 청정해수시료 채수시스템을 이용한 미량금속 채수 방법 확립

3) 용빙수 기원 미량금속 추적

- 남극항해 참가 및 해수 시료 채취
- 채취된 해수 시료 분석을 통한 서남극해 미량금속 기원을 추적함

IV. 연구개발결과

1) 미량금속 관측 시스템 구축

- Teflon coated Niskin-X, Auto firing module, UHMWPE rope 등의 도입을 통한 청정해수 시료 채수시스템 구축을 완료함

2) 청정해수시료 채수시스템의 고도화

- 기 구축 완료된 채수시스템을 이용하여 미량금속 분석용 청정해수시료 채수법을 확립하기 위해 아라온 시험항해에 참가하여 청정해수시료 및 일반 채수방법을 통한 해수시료를 확보함
- 채취한 청정해수시료 및 일반채수 해수시료간의 미량금속 농도 비교를 통해 청정해수시료 채수시스템의 필요성을 확인함

3) 용빙수 기원 미량금속 추적

- 남극항해에서 용빙수 기원 미량금속의 공급과 수층생물에 미치는 영향을 이해하기 위해 항해 준비 및 연구 수행
- 남극해에서 용존 미량금속의 농도 분포 특성 조사

V. 연구개발결과의 활용계획

1) 학술적 파급효과

- 청정해수시료 채수시스템 구축으로 향후 극지 미량금속 연구의 발전에 기여
- 서남극 용빙수의 배출로 인한 미량금속의 농도분포 변화를 조사하고 해양생태계에 미치는 영향을 이해하여 해양학적 이해 증진에 활용
- 축적된 연구결과들을 국내,외 학술대회에서 발표하고, 국제 저명 학술논문에 게재하여 한국의 극지 연구에 대한 국제적 인지도 제고
- 오염이 쉽게 일어날 수 있는 미량금속 농도 분석을 위한 채수법 및 분석법에 대한 지식 전달을 통해 해당 분야의 인재양성에 기여

2) 사회적 파급효과

- 쇄빙선 아라온호의 적극적 활용으로 효율 증대
- 용빙수 배출에 따른 극지 해양생태계의 변동성을 파악함으로써 향후 남극 및 지구의 기후변화를 예측할 수 있는 자료로 이용 가능

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Understanding the supply of trace metals by glacier meltwater discharge and its effect on the plankton distribution

II. Purpose and Necessity of R&D

1. To establish the clean seawater sampling system for trace metal determination and understand the supply of trace metals by glacier meltwater discharge and its effect on the plankton distribution

III. Contents and Extent of R&D

- 1) Setup the clean seawater sampling system
 - Setup the clean seawater sampling system for trace metal determination
- 2) Improvement for clean seawater sampling system
 - Comparison dissolved trace metal concentrations in seawater samples between clean seawater sampling system and normal sampling system
 - Establishment of clean seawater sampling system for trace metal determination
- 3) Understanding the supply of trace metals by glacier meltwater discharge
 - Preparing and conducting the Southern Ocean research cruises
 - Tracing the sources of trace metals in the west Southern Ocean

IV. R&D Results

- 1) Setup the clean seawater sampling system
 - Clean seawater sampling system for trace metal determination has been setup by consisting of Tefon coated Niskin-X, Auto firing module, UHMWPE rope, etc.

2) Improvement for clean seawater sampling system

- Seawater samples have been obtained from both clean seawater sampling system and normal sampling system on the IBRV ARAON test cruise to compare trace metal concentrations between two sampling methods
- The necessity of clean seawater sampling system for trace metal determination has been clarified

3) Understanding the supply of trace metals by glacier meltwater discharge

- Preparing the Southern Ocean research cruises to understand the supply of trace metals by glacier meltwater discharge and its effect on the plankton distribution

V. Application Plans of R&D Results

1) Academically

- Contributing the research for trace metals in the Southern Ocean by setup the clean seawater sampling system
- Understanding the ecosystem in the Southern Ocean by investigating the distributions of trace metals from glacier meltwater discharge
- Improving scientific level of Korea by presenting scientific results at international conferences and publishing papers
- Educating the future researcher especially for clean seawater sampling and trace metal determination

2) Socially

- Improving the efficiency of IBRV ARAON operation by applying new sampling method
- Data would be available to predic future climate change in not only the Southern Ocean, but also the entire Earth by understanding the supply of trace metals by glacier meltwater discharge and its effect of the plankton distribution

목 차

제 1 장 서론

- 1절. 연구개발의 목적
- 2절. 연구의 필요성
- 3절. 연구의 범위

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1절. 국내외 청정해수시료 채수시스템의 현황
- 2절. 남극해에서 미량금속의 연구 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1절. 청정해수시료 채수시스템의 구축
- 2절. 남극 항해 시료 채취
- 3절. 채수된 시료의 농도분포 및 자료 해석

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 1절. 연구개발목표 달성도
- 2절. 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 1절. 추가연구의 필요성 및 타연구에 응용

제 6 장 참고문헌

본 문

제 1 장 서론

1절. 연구개발의 목적

1. 남극해에서 미량금속 관측을 위한 청정해수시료 채수시스템을 확립하여 용빙수 기원 미량금속의 공급과정을 이해하고 수층생물에 미치는 영향을 이해하는 것을 목적으로 함.

2절. 연구의 필요성

1. 서남극해에서의 미량원소 연구의 중요성

가. 미량금속 중 하나인 철의 농도는 남극해에서 고갈되어 있어 일차생산을 제한하는 제한인자로 알려져 있으나, 최근 연구 결과에 의하면 남극대륙에서 빙봉의 용해로 형성된 유빙에는 높은 농도의 철이 포함되어 있어 유빙이 녹으면서 철이 해수 중으로 방출 경우 높은 일차생산이 나타날 것이라는 연구결과가 제시된 바 있음 (그림 1).

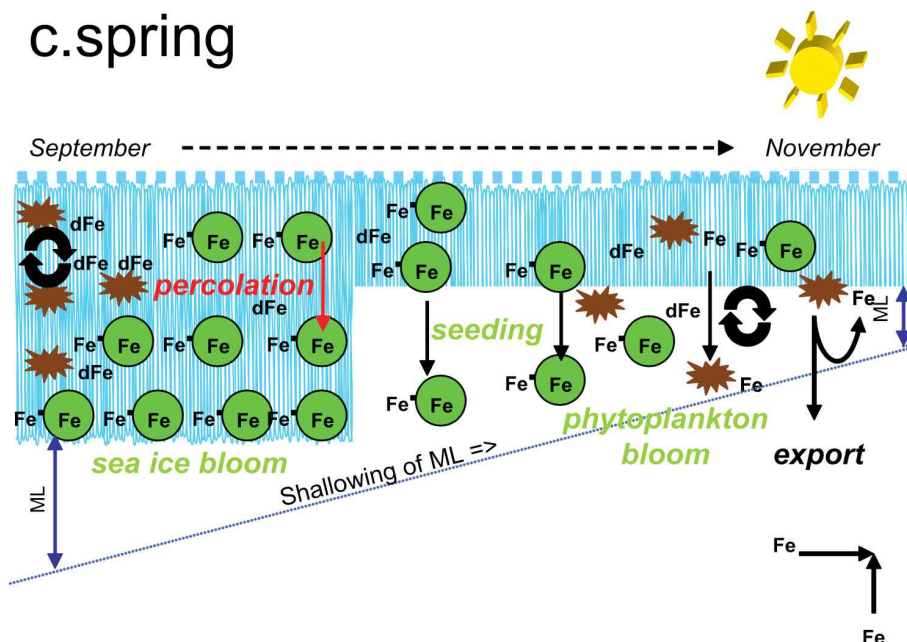


그림 1. 남극해역 유빙으로부터 철의 공급에 의한 식물플랑크톤의 증식을 보여주는 모식도 (Lannuzel et al., 2010)

나. 청정해수시료 채수시스템을 구축 및 이용, 분석을 통해 용존 미량금속의 분포 특성 및 생지화학적 순환 과정을 이해하고 수괴구별을 통하여 연안 미량금속의 기원을 추적하며, 최종적으로 용빙수 기원 미량금속의 공급이 식물플랑크톤 생물량 및 군집구조에 미치는 영향을 파악.

2. 미량금속 관측 시스템 필요성

가. 해수 중에 미량으로 존재하는 용존 미량금속 (철, 구리, 니켈, 코발트, 카드뮴, 아연 등)은 식물플랑크톤의 성장에 필수적이라는 가설이 주목을 받았으나, 각 연구마다 보고되는 해수 중의 용존 금속의 농도는 매우 큰 차이를 보였으며, 정확한 농도 레벨을 단정 지을 수 없었음.

나. 용존 미량금속은 채수, 전처리 및 분석 과정에서 오염될 가능성이 높아 신뢰 가능한 데이터를 확보하는데 큰 어려움이 있었음.

다. 해양 환경에서 미량금속의 생지화학적 순환과정과 미량금속이 생태계에 미치는 영향에 대한 이해도를 증진시키기 위한 국제 공동연구 프로그램인 GEOTRACES을 통한 청정해수시료 채수시스템의 발전으로 미량금속의 생지화학적 순환과정과 미량금속이 생태계에 미치는 영향 등 과거 규명하지 못하였던 새로운 과학적 정보에 대한 연구가 가능하게 됨.

라. 하지만, 기존 연구선에 청정해수시료 채수시스템을 적용하기 위해 CTD-CMS와 연결된 원치 케이블을 Titanium 또는 Kevlar armoured cable로 교체하는 것은 많은 비용이 발생하므로 경제적으로 비효율적이며 많은 부담이 따름.

마. 그러므로 극지해역에서 미량금속의 농도 분포를 알아보기 위해서는 우선적으로 미량금속 분석용 청정 해수시료를 채수할 수 있는 채수시스템을 보다 경제적인 방법으로 쇄빙연구선 아라온호에 구축하는 것이 필요함.

3절. 연구의 범위

1. 미량금속 관측 시스템 구축

가. 쇄빙연구선 아라온호에서 오염을 배제한 미량금속 분석용 청정해수시료를 채취하기 위해 청정해수시료 채수시스템을 아라온호에 적용.

나. 채수한 청정해수시료의 시료 분취시 외부로부터의 오염을 배제하기 위해 클린컨테이너를

개선.

다. 아라온호의 시험항해에 참가, 청정해수시료 채수시스템을 이용하여 채수한 해수 시료와 일반 채수시스템을 이용하여 채수한 해수 시료를 채취함.

라. 아라온호 시험항해에서 획득한 청정해수시료와 일반채수 해수시료의 중금속 농도 분석을 실시함.

마. 채수 방법에 따른 농도 차이를 확인하고 이전에 보고된 농도와 비교하여 청정해수시료 채수시스템의 필요성을 확인.

2. 청정해수시료 채수시스템을 이용한 남극 해수시료의 채취

가. 시료 오염을 방지하기 위해 해수 시료 채취 및 실험 진행 전 청정해수시료 채수시스템의 채수기, 채수병 등 산세척이 가능한 모든 실험 기구에 대해 산세척을 수행함.

나. 청정해수시료 채수시스템을 이용하여 총 2회 (2023년, 2025년)에 걸쳐 남극 해수시료를 채취함.

다. 채취된 시료는 선상에서 전처리를 수행한 후 육상 실험실로 이송하여 농축 과정을 거쳤으며, 이후 유도결합플라즈마 질량분석기 (ICP-MS)를 이용하여 분석을 수행함.

3. 서남극해에서 채수된 시료의 농도분석 및 자료 해석

가. 희토류 원소의 농도를 분석하고, 이를 수직적·공간적 분포로 나타내어 미량원소의 분포 특성을 파악함. 또한 PAAS(Post-Archean Australian Shale)를 기준으로 표준화하여 원소의 기원 및 지화학적 분별작용을 파악함.

나. 미량금속의 농도를 분석하고, 이를 수직적·공간적 분포로 나타내어 미량원소의 분포 특성을 파악함.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절. 국내외 청정해수시료 채수시스템의 현황

1. 미량금속의 오염을 배제한 청정해수시료 채수법의 발전

가. 해양환경에서 미량금속은 매우 작은 미량으로 존재하나, 선박으로부터 유래한 오염, 대기의 먼지 등으로부터 유래한 오염, 채수기 자체로부터 오는 오염 등, 시료의 오염을 배제하고 용존 미량금속을 정확히 측정하기 위해서는 청정해수시료 채수법의 확립이 필수적임.

나. 오염을 배제한 미량금속 분석용 청정해수시료를 채취하기 위한 채수시스템은 70년대 후반부터 발전되어 왔으나, 초기에는 비금속제 채수기인 Niskin-X 채수기를 산세척 한 후, 일일이 비금속제 로프에 매달아 내려보낸 뒤, 메신저를 통해 하나하나씩 채수하는 Hydrocast 방법이 주를 이루었음.

다. 하지만 이런 Hydrocast 방법은 많은 인력과 시간을 필요로 하였으며, 채수기를 일일이 원하는 수심으로 내려보내야 했으므로 매우 비효율적인 방법이었음.

라. 보다 효율적인 채수법을 개발하기 위해 여러 나라에서 다양한 방법으로 채수시스템을 발전시켜 옴.

2. 현재 개발된 미량금속 분석용 청정해수시료 채수시스템

가. 해양 환경에서 미량금속의 생지화학적 순환과정과 미량금속이 생태계에 미치는 영향에 대한 이해도를 증진시키기 위한 국제 공동연구 프로그램인 GEOTRACES을 통하여 다양한 방법으로 청정해수시료 채수시스템이 발전해 옴.

나. 그 예로 미국의 경우 시료 채취시 선박으로부터 오염을 배제하기 위해 일정 수심 아래에서 채수기의 채취구가 열리게 되는 Go-Flo 채수기를 사용하고, wire로부터의 오염을 배제하기 위해 Kevlar cable 등을 사용한 채수시스템을 개발하여 활용하고 있으며, 일본의 경우 채수기 내부에 존재하였던 스프링 또는 고무밴드를 외부로 옮겨 미량금속의 오염을 배제한 Niskin-X 채수기와 티타늄 케이블을 이용한 채수시스템을 활용 중임. 네덜란드의 경우 시판 중인 채수기를 사용하는 것이 아닌 Teflon제 채수기를 독자적으로 개발, TITAN이라는 채수시스템을 구축하여 활용중에 있으며, 우리나라 또한 해당 채수시스템을 한국해양과학기술원 이사부호에 도입하여 활용중에 있음 (그림 2; 표 1).

The “modern world” of trace metal sampling being utilized in the GEOTRACES Program

**The U.S. GEOTRACES
12 Liter GO-Flo samplers**



**The Japanese GEOTRACES
12 Liter Niskin-X samplers**



**Hein de Baar's new NIOZ
GEOTRACES system**



그림 2. GEOTRACES Program을 통해 활용되고 있는 청정해수시료 채수시스템의 예 (Sohrin and Bruland, 2011)

표 1. 청정해수시료 채수시스템에서 사용되고 있는 채수기, CTD-CMS frame, 윈치케이블 사양 (Kim et al., 2015)

Table 1. Major components of trace-metal-clean sampling devices for determination of trace Zn in seawater.

Sampler	Frame	Wire, Cable	Region	
Go-Flo water sampler	—	Kevlar wire	Eastern North Pacific	(Bruland et al. 1979)
			Eastern North Pacific	(Lohan et al. 2002)
Go-Flo water sampler	Epoxy painted Al frame	Kevlar cable	Eastern North Pacific	(Measures et al. 2008)
			Southern Indian Ocean	(Gosnell et al. 2012)
Go-Flo water sampler	Titanium Frame	Kevlar cable	Southern Ocean	(Croot et al. 2011)
Go-Flo water sampler	Polyurethane coating Al frame	Vectran cable	Western Atlantic	(Cutter and Bruland 2012)
External spring type water sampler (OTE)	Titanium frame	Plasma rope	South Atlantic	(Wyatt et al. 2014)
External spring type water sampler (Niskin-X)	Polyurethane coating Al frame	Ti cable	Subarctic North Pacific	This study

2절. 남극해에서 미량금속의 연구 현황

1. 남극해에서 제한인자로서의 미량금속

가. 해양환경에서 일차생산은 적절한 빛과 질소, 인, 규소 등의 영양염 농도 등에 의해 지배되고 있다고 알려져 왔으나 남극해와 같이 영양염의 농도가 충분히 존재함에도 불구하고 식물플랑크톤의 일차생산량이 낮은 High Nutrient, Low Chlorophyll 해역이 존재.

나. HNLC해역에서 철의 첨가 실험은 용존 미량금속이 해양 환경에서 식물플랑크톤의 일차생산을 제한하는 제한인자로서 존재한다는 것이 밝혀지며 용존 미량금속의 중요성이 대두되었음 (Moore et al., 2013) (그림 3).

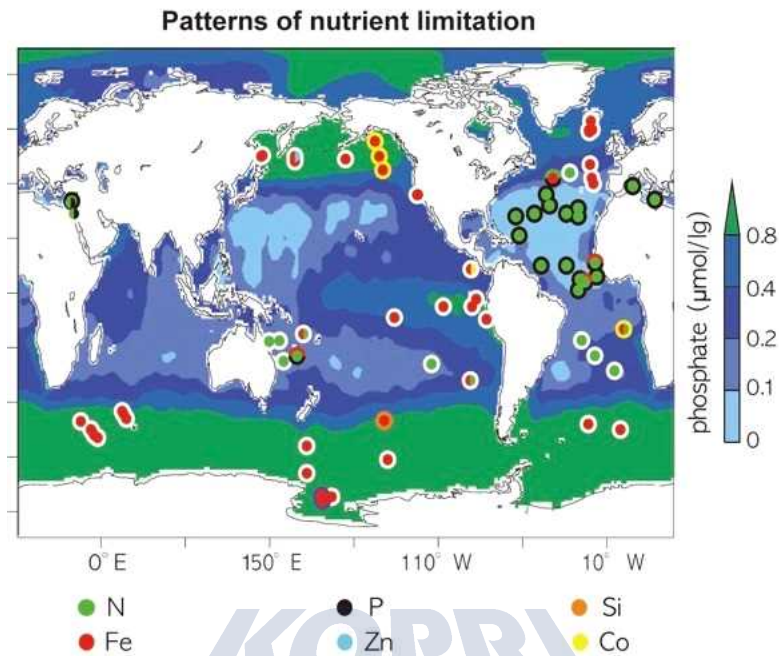


그림 3. 외양에서 일차생산을 제한하는 원소들. 남극해는 영양염(인)이 상대적으로 풍부함에도 불구하고 철(Fe)이 일차생산의 제한인자로 나타나는 HNLC해역이라는 것을 보여주고 있음

다. 최근까지 남극해의 경우 미량금속의 농도가 고갈되어 있어 일차생산을 제한하는 제한인자로 알려져 왔으나, 최근 연구 결과에 의하면 온난화로 인해 빙붕이 대륙으로부터 떨어져 해양으로 유입되고, 이런 빙붕은 높은 농도의 미량금속이 포함되어 있어 용빙이 녹을 경우 해양환경으로 다양한 미량금속이 방출되고, 이로서 높은 일차생산성이 나타날 가능성이 높다고 제시됨.

라. 하지만 아직까지도 남극해에서의 미량금속 농도 데이터는 많이 부족한 실정이며, 특히 본 과제에서 주목하고 있는 로스해의 경우 미량금속의 데이터는 전무한 실정임.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 청정해수시료 채수시스템의 구축

1. 채수시스템 장비 구비

가. 용존 미량금속은 채수, 전처리 및 분석 과정에서 오염될 가능성이 높아 신뢰 가능한 데이터를 확보하는데 큰 어려움이 있었음.

나. 오염을 배제한 청정해수시료를 채수하기 위해서 채수기는 가장 근본적으로 구비되어야 할 장비임. 이를 위해 채취를 닫히게 하는 스프링이 외부에 달려 있는 Teflon coated Niskin-X 채수기를 도입하였음. 본 채수기는 Go-Flo 채수기와 비교하여 구조가 단순하고 가격이 저렴하여 보다 경제적으로 채수시스템을 도입하기에 적합한 채수기임. 실제 사용전 산세척을 진행하여 내부에서의 오염을 원천 차단하였음.

다. 일반적으로 Kevlar cable을 많이 활용하지만, 해당 cable은 단가가 비싸고 선박 건조 이후 도입하기에는 많은 개조가 필요하므로 많은 비용이 발생함. 그러므로 본 구축에서는 채수기가 결합되어 있는 Rosette frame을 선상과 연결하기 위해 비금속제인 Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) 로프 (10mm diameter, 5000 m)를 이용하였음. 해당 로프를 사용함으로써 케이블로부터 유래할 수 있는 오염원을 배제하였음.

라. UHMWPE 로프를 활용할 경우 선상에서 채수기에 직접 신호를 전달하여 채수기를 firing 하는 것이 불가능함. 그러므로 본 구축에서는 원격 채수방법을 통한 해수시료의 채수법을 채택하였으며, 이를 위해 압력센서와 Auto firing module을 도입함. 본 원격 채수방법은 채수시스템을 내리기 전 희망 수심을 미리 입력하여 자동으로 채수하는 방법임.

마. 채수한 청정해수시료의 시료 분취시 오염을 배제하기 위해 극지연구소에서 보유중인 클린 컨테이너를 개조하여 도입함.

바. 본 과제에서 구축한 청정해수시료 채수시스템을 그림 4에 나타냄.



그림 4. 아라온호 시험항해시 구축된 청정해수시료 채수시스템. (a) 미량금속 분석용 채수시스템의 구축, (b) 아라온호 후부 갑판에 배치된 시료분취용 클린 컨테이너, (c) Niskin-X 채수기 거치가 가능하도록 개선된 클린컨테이너 내부에서 오염을 배제한 분석용 시료의 분취

2. 시험항해 참가 및 분석

가. 구성을 완료한 청정해수시료 채수시스템의 필요성을 확인하고 효율적인 채수 프로토콜을 확립하고자 2021년과 2022년 아라온 시험항해에 참가하여 동일한 수심에서 청정해수시료 채수 시스템과 일반 채수시스템을 이용하여 해수 시료의 채취를 진행함 (그림 5).

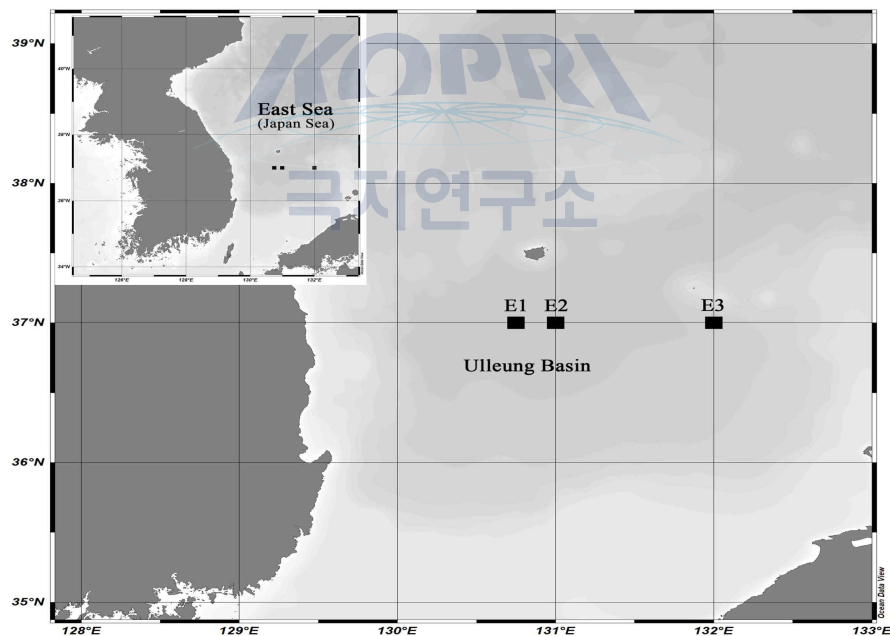


그림 5. 2021년 5월 (E1, E2), 2022년 6월 (E2, E3) 아라온 시험항해에서 청정해수시료 채수시스템을 활용하여 시료 채취를 진행한 정점도. 정점 E2의 경우 2021년, 2022년 모두 채취를 진행

나. 채취한 청정해수시료의 분취를 위해 외부의 오염원을 배제한 클린컨테이너 내부에서 시료의 분취를 실시하고 초순수 염산을 첨가하여 시료를 pH < 1.8로 조절하여 보관함

다. 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템간의 미량금속 농도 차이를 비교하기 위해 일반 채수시스템을 이용한 해수시료 또한 동일한 전처리 방법으로 분취 후 보관함.

라. 획득한 미량금속 분석용 청정해수시료는 육상의 연구실로 옮겨졌으며, 육상의 연구실에서 해수자동농축장치 (SeaFAST)가 연결된 유도결합플라즈마 질량분석기 (ICP-MS, Thermo Element 2)를 이용하여 시료를 농축, 분석함.

마. 분석법은 표준시료인 CASS-6와 GSC의 분석을 통해 검증을 실시, 신뢰도를 확보함.

바. 또한, 일반 채수시스템의 경우 CTD 자료를 선상에서 실시간으로 확인 후 선상에서 직접 신호를 입력하여 채수를 진행하지만, 청정해수시료 채수시스템은 작업 전 선상에서 희망하는 수심을 미리 입력하고 해당 수심에 장비가 도달할 경우 자동으로 채수가 진행되는 원격 채수 방식인 만큼, 희망 수심에서 채수가 제대로 이루어지는지에 대한 확인이 필요함.

사. 따라서 두 채수시스템에서 해수시료를 채취하여 영양염 농도를 분석하였으며, 그 결과 원격으로 채수가 진행되는 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템에서 동일한 영양염의 연직분포를 획득하였으며, 이를 통해 청정해수시료 채수시스템 또한 희망 수심에서 안정적으로 채수가 이루어지는 것을 확인함 (그림 6).

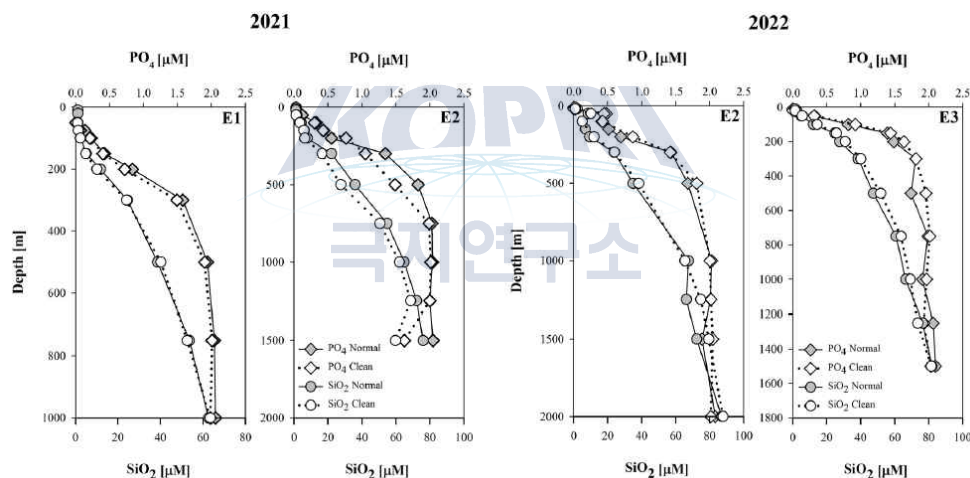


그림 6. 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템 간의 영양염 농도분포 비교

3. 청정해수시료 채수시스템의 필요성 확인

가. 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템과의 농도 비교

(1) 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템을 이용하여 획득한 해수시료를 통해 미량금속 (망간, 철, 구리, 아연, 카드뮴, 납)의 농도분석을 진행, 미량금속 농도 결과를 비교한 그림 7에서 일부 원소 간 농도 차이를 확인함.

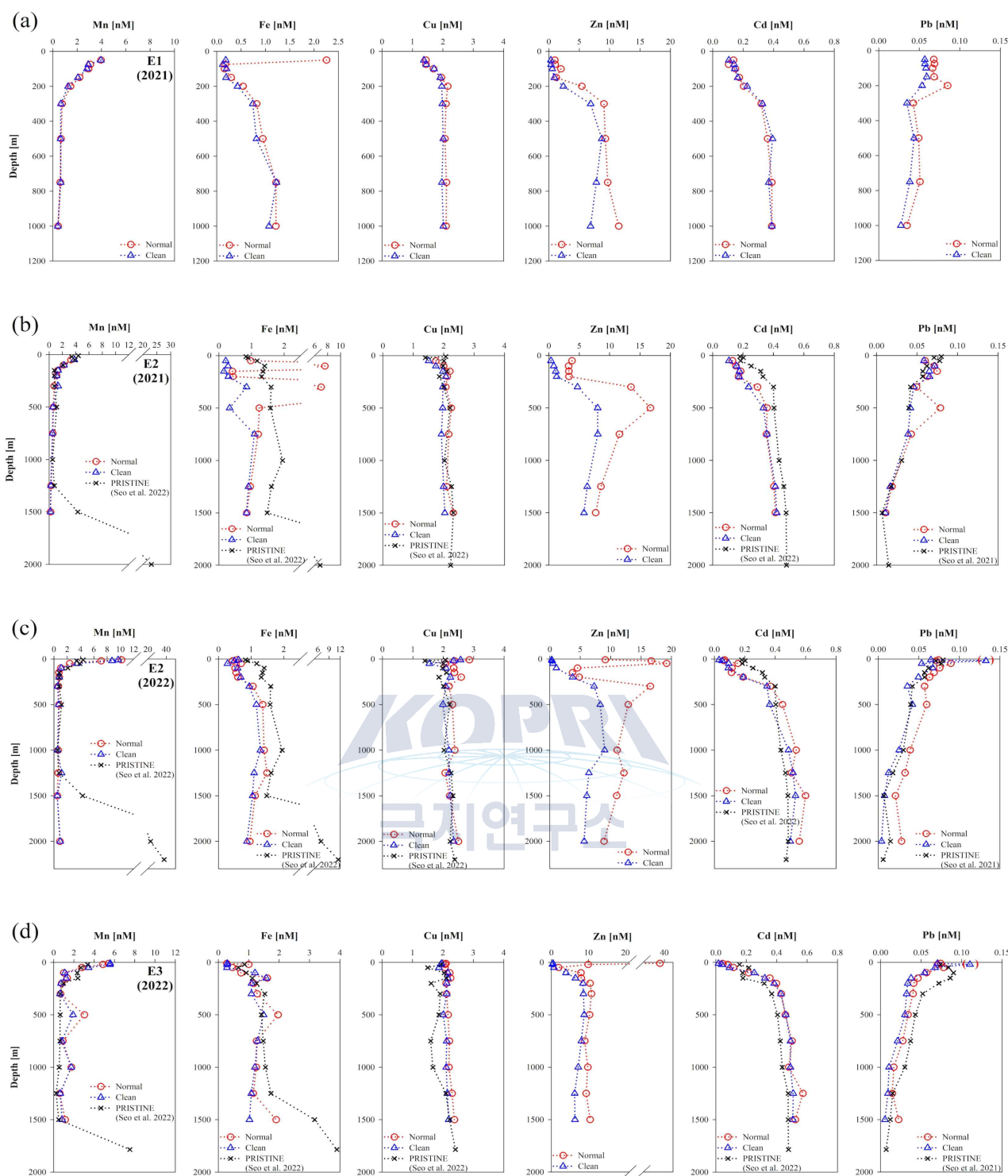


그림 7. 용존 미량금속의 수직 분포 그래프로 (a) E1 (2021년 시험항해), (b) E2 (2021년 시험 해), (c) E2 (2022년 시험항해), (d) E3 (2022년 시험항해)에서 각각 얻은 결과를 나타냄. 파란색은 청정해수시료 채수 시스템에서 얻어진 데이터, 빨간색은 일반 채수시스템에서 얻어진 데이터를 나타내며 같은 정점(E2, E3)에서 이전 보고된 데이터는 검정색으로 표시됨

(2) 농도 비교 결과, 망간, 구리, 카드뮴의 경우 유사한 농도 분포를 보였으나, 철, 아연, 납의 경우 청정해수시료 채수시스템과 비교하여 일반 채수시스템에서 상대적으로 높은 농도 또는 비이상적으로 높은 농도가 검출되어 일반 채수시스템에서 특정 원소의 오염이 지속적으로 발

생하는 것을 확인함.

(3) 또한, 청정해수시료 채수시스템을 이용한 미량금속 농도 분석의 신뢰성을 확인하기 위해 기 보고된 이전 연구 자료와의 비교를 진행, 동일한 농도 수준에서 유사한 분포 특성을 보임 (그림 7). 따라서 본 연구에서 구축한 시스템 이용 시 오염을 배제한 미량금속 시료 채취가 가능함.

4. 일반 채수시스템에서의 오염원인 파악

가. 본 연구 결과를 통해 철, 아연, 납 등, 오염에 민감한 특정 원소가 일반 채수시스템에서 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인함.

나. 철의 경우 선박에 존재하는 많은 장비들이 철 재질로 이루어져 있기 때문에 오염이 나타나는 것으로 판단되며, 납의 경우 일반 채수시스템에 무게를 가하기 위해 부착한 납을 통한 오염발생 가능성이 높은 것으로 판단됨. 마지막으로 아연의 경우 일반 채수시스템에서 사용하는 Niskin 채수기 내부의 고무 밴드를 통해 오염이 되었을 가능성이 높은 것으로 판단됨. 해당 고무 밴드는 라텍스 재질로 이루어져 있으며, 라텍스에는 아연이 포함되어 있는 것으로 알려져 있음 (그림 8).



그림 8. 일반 채수시스템에서 사용되는 Niskin 채수기 내부에 장착된 고무밴드는 아연의 오염을 초래할 가능성이 높음. 납의 경우 일반채수시스템에 무게를 가하기 위해 부착되어 있으며 사진에서 붉은색 원으로 표시됨

2절. 남극항해 시료채취

1. 시료병의 산세척 등 항해 참가 준비

가. 아라온호 남극항해에 참가하기 위해서는 시료의 오염을 배제하고자 시료 채수 관련 모든 기구의 산세척을 항해 전 미리 진행함.

나. 해수 시료 채취 시 사용되는 Niskin-X는 5% Extran, 0.1M HCl, 3차 증류수(Milli-Q Water)를 이용하여 약 3일간 산세척이 진행되었으며, 채취 후 보관에 사용되는 저밀도 폴리에틸렌 용기는 5% Extran, 3M HCl, 0.1M HCl, 3차 증류수를 이용하여 약 4일간 산세척을 실시함.

나. 2023년 및 2025년 1월에서 2월 남극 항해에 참가하여 앞서 설명된 청정해수시료 채수시스템을 이용한 해수 시료의 채취를 완료함.

2. 샘플링 및 전처리·분석 방법

가. 2023년 샘플링 및 전처리 분석 방법

(1) 2023년 샘플링

(가) 2023년 쇄빙연구선 아라온 남극해 연구항해에 참가, 청정해수시료 채수시스템을 이용하여 미량금속 분석용 해수시료를 채취함 (그림 9).

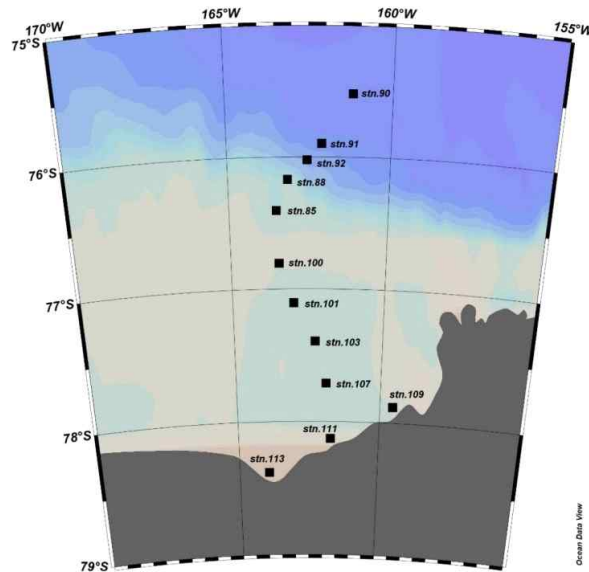


그림 9. 2023년 아라온호 남극해 연구 항차 (ANA13B)에서 청정해수시료 채수시스템을 활용하여 시료 채취를 진행한 정점도

(2) 희토류 전처리 및 분석

(가) 해수 중 미량으로 존재하는 용존 희토류 원소 분석을 위해 고체상 컬럼추출(Solid phase extraction)법을 활용하여 시료를 수동으로 농축하였으며, 이를 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS;Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)를 이용하여 농도분석을 진행함.

(나) 해수 시료 내 희토류원소를 농축하기 위해 킬레이트 수지 컬럼(Nobias Chleate-PA1 resin, Hitachi High-Technologies, Japan)을 사용함. 컬럼은 2 M 질산 60 mL로 세척한 후 초순수 및 0.05 M 암모늄 아세테이트 용액 30 mL을 차례로 통과시켜 레진을 세척함.

(다) 산처리된 해수 시료 10 mL에 3.6 M 암모늄 아세테이트 완충용액을 첨가한 뒤 4 % 암모니아 용액을 이용하여 pH 6.0으로 조정함.

(라) 전처리 과정은 2 M 질산 60 mL를 통과시킨 후 0.05 M 암모늄 아세테이트 완충용액 30 mL를 통과시킴. 이후 pH가 조정된 해수 시료를 통과시킨 후, 0.05 M 암모늄 아세테이트 용액 20 mL를 통과시켜 잔존 염을 제거함.

(마) 컬럼에 흡착된 희토류 원소는 2 M 질산 5 mL로 용출하여 산세척된 15 mL 테플론 튜브에 담아 분석 전까지 보관함.

(바) 농축된 시료는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, PerkinElmer)를 이용하여 분석함.

(3) 미량금속 전처리 및 분석

(가) 해수 중 미량으로 존재하는 용존 미량금속 분석을 위해 고체상 컬럼추출(Solid phase extraction)법을 활용하여 시료를 수동으로 농축하였으며, 이를 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)를 이용하여 농도분석을 진행함. 본 연구에서 진행한 시료의 전처리 및 농축 과정은 다음과 같음.

(나) 산처리 된 해수 시료 15 mL에 3.6 M 암모늄 아세테이트 완충용액을 첨가한 뒤 4 % 암모니아 용액을 이용하여 pH 6.0-6.2로 조정함.

(다) 해수 시료 내 미량금속을 농축하기 위해 킬레이트 수지 컬럼을 사용함. 컬럼은 1.5 M 질산 15 mL로 세척한 후 초순수 30 mL 및 0.05 M 암모늄 아세테이트 용액 40 mL을 통과시켜 준비함. 이후 pH가 조정된 해수 시료를 통과시킨 후, 0.05 M 암모늄 아세테이트 용액 40 mL와 초순수 30 mL를 순차적으로 통과시켜 잔존 염을 제거함.

(라) 컬럼에 흡착된 미량금속은 시료 주입 방향의 역방향으로 1.5 M 질산 5 mL를 사용하여 용출함. 용출된 시료는 산세척된 30 mL 테플론 튜브에 담아 분석 전까지 보관함.

(마) 농축된 시료는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, PerkinElmer)를 이용하여 분석함.

나. 2025년 샘플링 및 전처리 분석 방법

(1) 2025년 샘플링

(가) 2025년 쇄빙연구선 아라온 남극해 연구항해에 참가, 청정해수시료 채수시스템을 이용하여 미량금속 분석용 해수시료를 채취함 (그림 10).

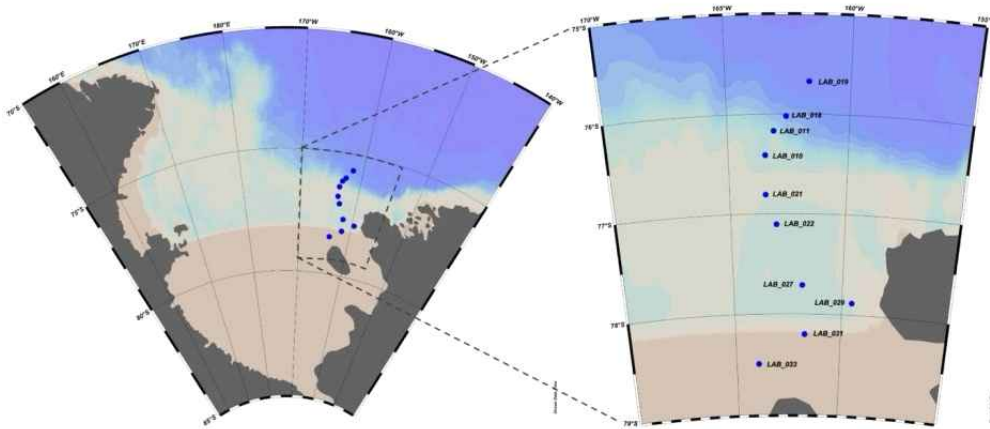


그림 10. 2025년 아라온호 남극해 연구 항차 (ANA15B)에서 청정해수시료 채수시스템을 활용하여 시료 채취를 진행한 정점도.

(2) 미량금속 전처리 및 분석

(가) 미량으로 존재하는 미량금속의 농도를 분석하기 위해서는 분석 전 컬럼을 이용한 시료 농축 과정이 필요하며, 이를 위해 시료 자동 농축 시스템(seaFAST, ESI)을 이용함. 해당 농축 시스템은 물 시료의 분석을 위해 자동화된 농축 시스템으로, 고체상 컬럼을 이용한 자동 농축과 외부 표준물질의 자동 희석 기능이 있어 실험 과정에서의 오염 및 오차의 최소화를 가능하게 함. 농축된 시료는 자동 농축 시스템과 바로 연결된 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, PerkinElmer)를 이용한 분석이 진행 중에 있음.

3절. 채수된 시료의 농도분포 및 자료 해석

1. 희토류 결과 및 고찰

가. 2023년 서남극해에서 채수된 시료를 이용해 희토류 원소의 농도를 분석함.

나. 해양환경에서 희토류 원소(Rare Earth Elements; REEs)는 매우 낮은 농도로 존재함에도 불구하고 각 원소들간이 가지는 분별작용 (fractionation)으로 인해 수괴 추적 및 지화학적 프로세스를 이해하는데 매우 유용한 원소로 알려져 있음.

다. 희토류 원소는 무게에 따라 가벼운(LREE; Light REE), 중간 무게(MREE; Middle REE), 무거운(HREE; Heavy REE) 원소로 구분할 수 있고, La-Nd, Sm-Dy, Ho-Lu 원소들이 각각 이에 해당함. 이들의 수직분포를 확인하고자 그림 11에 나타냄.

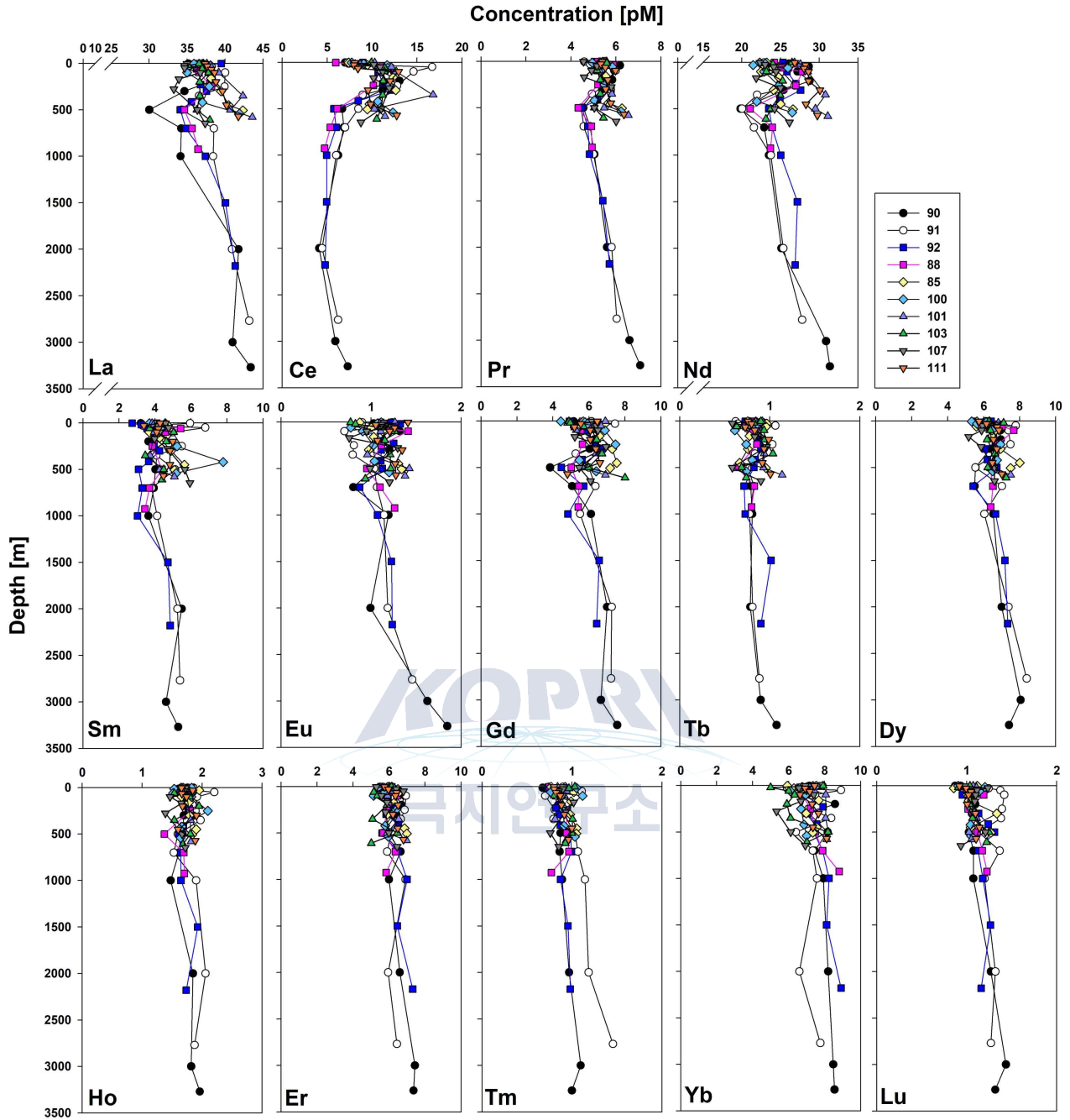


그림 11. 2023년 아라온호 남극해 연구 항차(ANA13B)에서 얻어진 용존 희토류 원소 중 Nd, Gd, Yb의 농도 연직분포. Nd, Gd, Yb은 각각 가벼운(Light), 중간 무게(Middle), 무거운(Heavy) 희토류 원소를 대표함

라. 쉽게 산화되고 입자와 친화력이 높은 Ce을 제외한 희토류 원소는 일반적으로 해양에서 영양염형(nutrient-type) 수직 분포를 보이는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 세 원소 모두 500m 수심까지는 농도가 증가했다가 다시 감소하고, 500m 이하 깊은 수심에서 다시 증가하는 양상을 보임.

마. 표층에서 희토류 원소가 상대적으로 높게 나타난 것은 남극대륙 주변부에서 희토류 원소의 유입 가능성을 제시함.

바. 자연 상태의 희토류 원소는 Oddo-Harkins rule에 따라 짝수 원자번호를 가진 원소들이 홀수 원자번호 원소보다 풍부하게 존재하므로, 이러한 효과를 보정하고 기원 및 지화학적 분별 작용을 보다 명확히 이해하기 위해 참조 물질인 PAAS(Post-Archean Australian Shale)를 사용하여 표준화함 (그림 12).

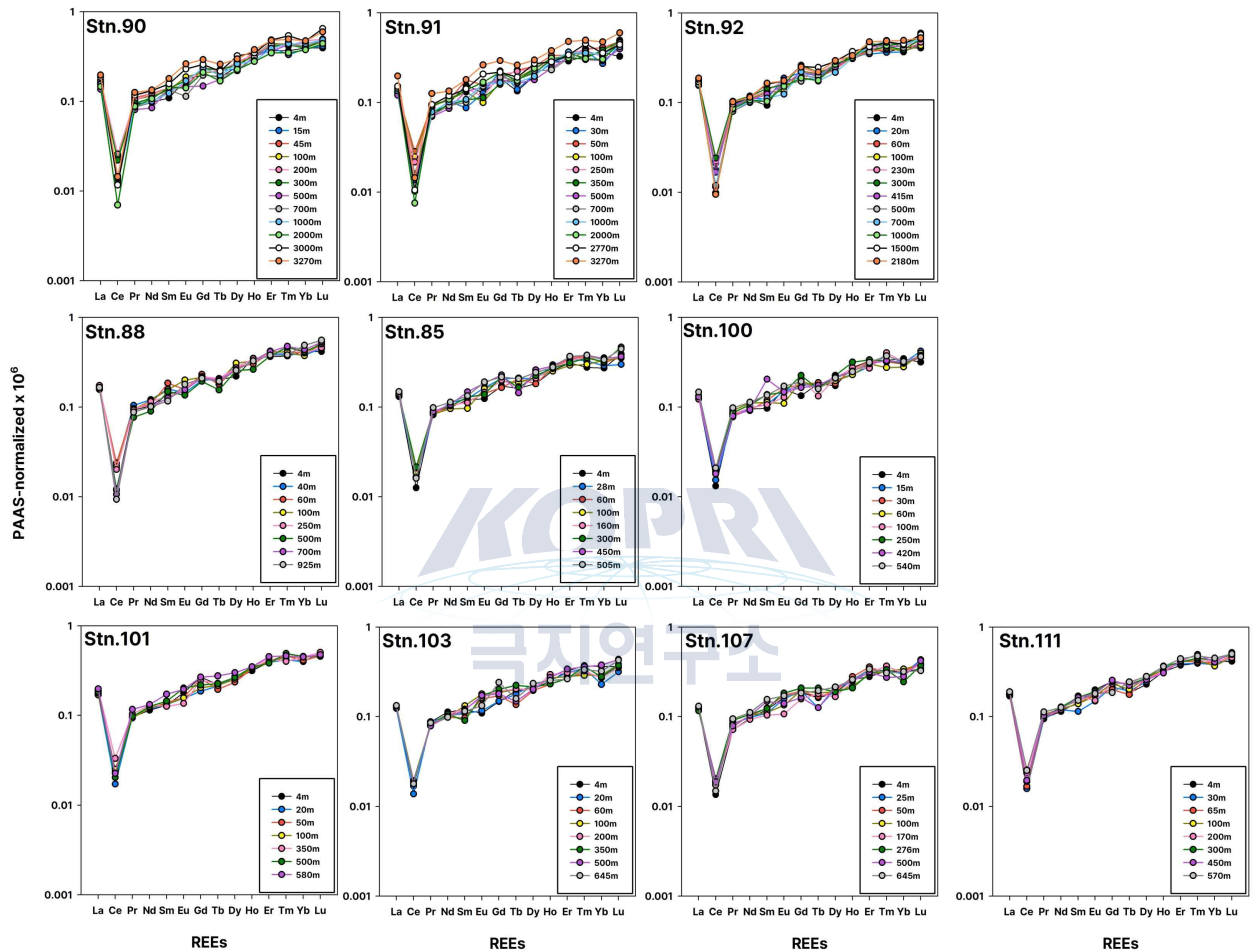


그림 12. 2023년 아라온호 남극해 연구 항차(ANA13B)에서 정점 90, 101, 111의 용존 희토류 원소 농도를 PAAS (Post Archean Australian Shale)로 표준화하여 수심별로 나타낸 그래프.

사. Ce anomaly는 Ce 양옆의 La과 Nd 농도를 PAAS로 표준화한 후, 이를 바탕으로 계산된 Ce의 배경농도 대비 실제 측정값의 비율로 계산되며, 계산 결과 Ce/Ce* 값이 1보다 작을수록 anomaly 정도가 큰 것으로 해석할 수 있음.

아. 본 연구에서 Ce anomaly는 0.05에서 0.23 범위로 계산되었으며, 특히 500m 보다 깊은 수심, 외양쪽 Stn. 88 - Stn. 90에서 매우 큰 anomaly 보여짐에 따라 500m 보다 깊은 수심의 경우 외양 기원 수괴의 영향을 받았을 것으로 판단됨 (그림 13).

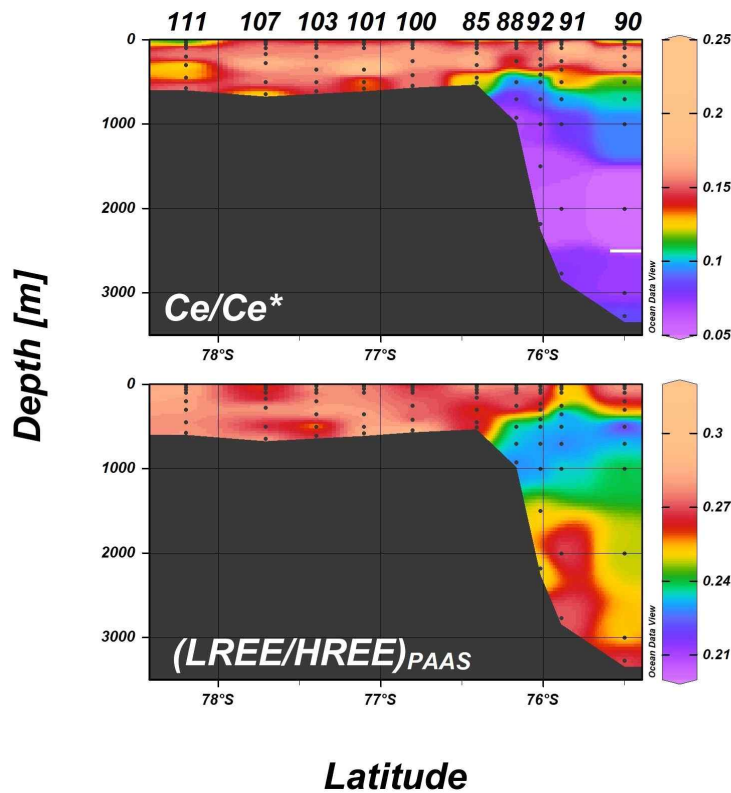


그림 13. 2023년 아라온호 남극해 연구 항차(ANA13B)에서 계산된 Ce anomaly(Ce/Ce^*)와 PAAS (Post Archean Australian Shale)로 표준화한 값을 가벼운 희토류 원소(LREE: La + Pr + Nd)와 무거운 희토류 원소(HREE: Er + Yb + Lu)의 비로 나타낸 섹션 분포도.

자. 가벼운 희토류 원소 대 무거운 희토류 원소 비(LREE/HREE) 또한 Ce anomaly와 유사한 분포를 보였으나, 대륙사면 근처의 깊은 수심에서 또한 상대적으로 높은 값이 나타났으며, 이는 남극대륙 주변부를 통한 희토류 원소의 유입뿐만 아닌, 대륙사면에서 퇴적물을 통한 희토류 원소의 유입 가능성을 시사함.

2. 미량금속 결과 및 고찰

가. 미량금속의 수직 분포는 대표적으로 해수에서 큰 농도변화 없이 존재하여 수심에 따라 작은 농도 변화를 보이는 보존형분포(conservative-type), 생물학적 과정에 밀접하게 관계되어 표층에서는 고갈되고, 수심이 증가함에 따라 재광물화되어 다시 증가하는 특징을 갖는 영양염형 분포(nutrient-type), 짧은 체류시간과 입자와의 반응성으로 인해 수심에 따라 농도가 급격히 감소하는 스케벤징형분포(scavenged-type)로 구분될 수 있으며, 일부 원소의 경우, 생물학적 과정과 스케벤징 과정의 영향으로 인해 하나의 특징이 아닌 여러 특징을 보이는 혼합된 분포(hybrid)를 보이기도 함.

나. 2023년 아라온호 남극해 연구항차에서 얻어진 용존 미량금속 (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Cd)의 정점별 수직분포를 그림 14에 나타냄.

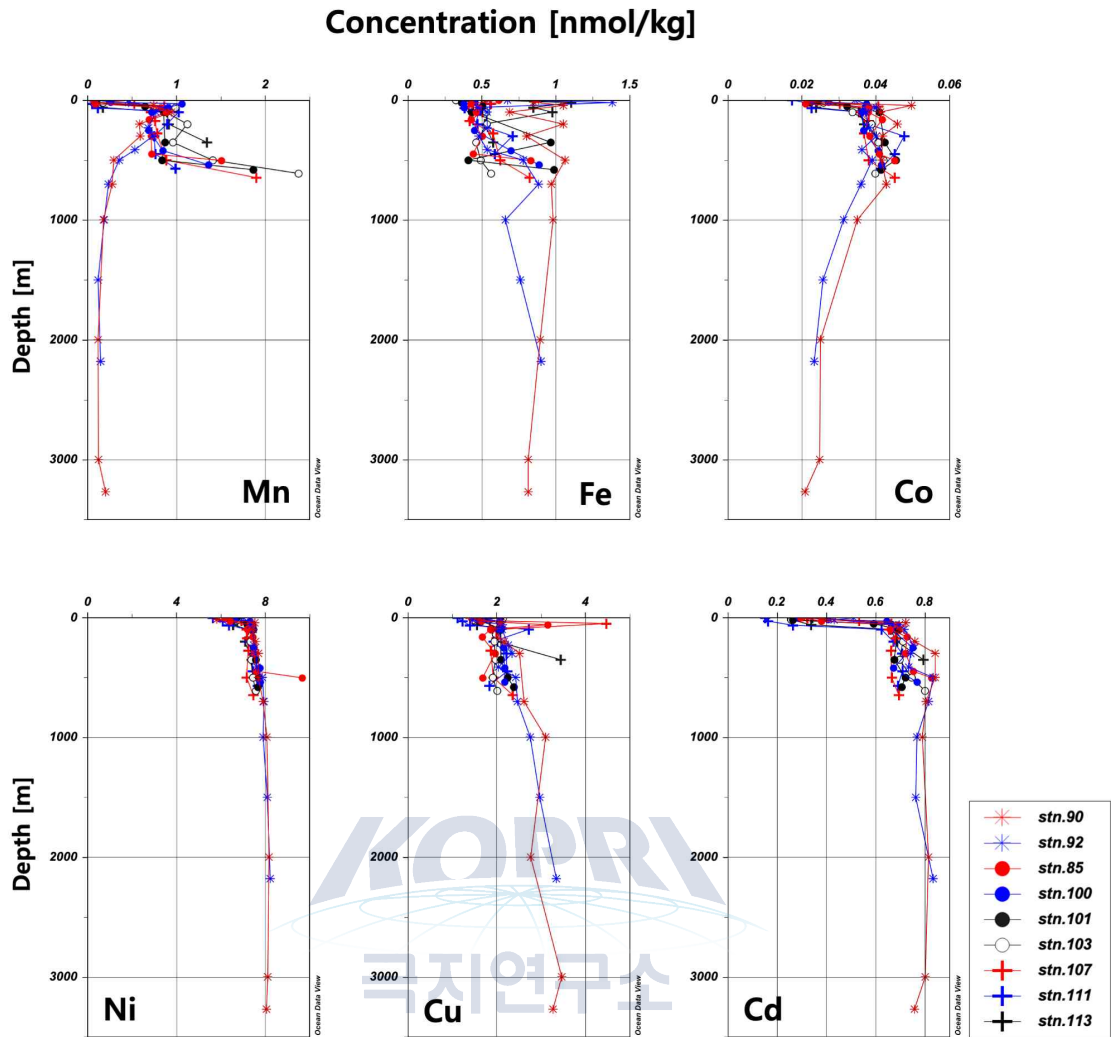


그림 14. 2023년 아라온호 남극해 연구 항차(ANA13B)에서 얻어진 용존 미량금속의 정점별 수직분포.

다. Ni, Cd은 일반적으로 해수 중 영양염형 분포 특징을 보이는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 영양염형 분포 특징이 나타남. 이는 이들이 본 해역에서 생물학적 과정에 의해 주로 제어됨을 시사함.

라. Co와 Mn의 수직분포는 표층에서 고갈되었다가 표층 아래에서 다시 증가하고, 심층으로 가면서 다시 감소하는 혼합형분포 특징을 보였으며, 이러한 분포는 일반적으로 해수 내에서 두 원소가 나타내는 분포 특성과 일치함. 본 연구에서 두 원소는 생물학적 과정 뿐만아니라 지화학적 과정에 의해 제어됨을 의미함.

마. 외양역인 Stn 90과 Stn 92에서 Mn의 분포는 다른 정점에 비해 전체적으로 고갈된 형태로 나타났으며, 이 두 정점을 제외한 대부분의 저층에서 급격하게 증가한 농도 특징이 나타남. 이는 퇴적물로부터의 Mn 유입 가능성을 시사함.

바. Fe와 Cu의 경우, 일반적으로 해수 중 혼합형 분포로 존재한다고 알려져 있으나, 본 연구에서는 이러한 분포 특징을 보이지 않았음.

사. 미량금속의 공간적 분포 특징을 알아보기 위하여 그림 15와 같이 섹션분포도로 나타냄.

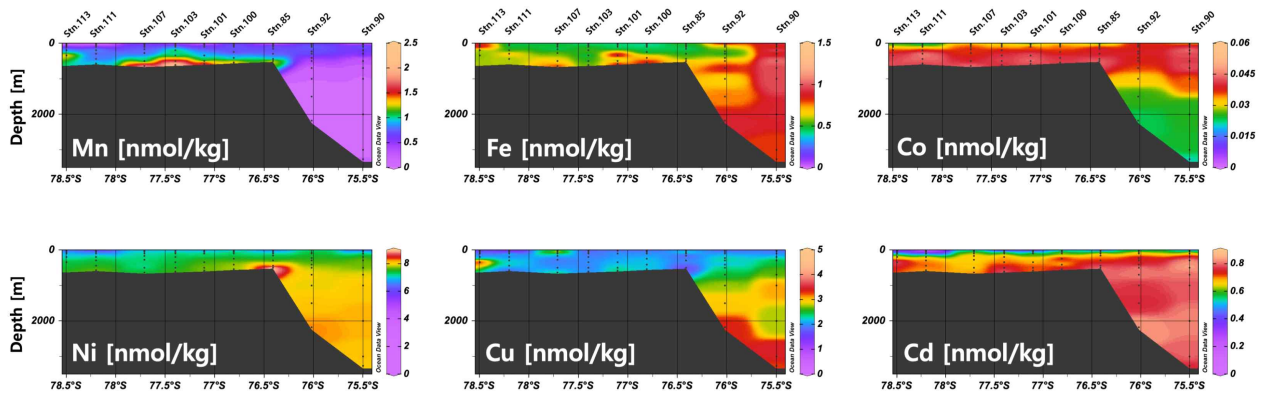


그림 15. 2023년 아라온호 남극해 연구 항차(ANA13B)에서 얻어진 용존 미량금속의 섹션분포.

아. Mn은 표층에서 고갈된 형태로 존재했으며, 상대적으로 외양에 위치한 Stn. 90, Stn.92를 제외한 대부분의 정점에서는 저층에서 농도가 증가하는 경향을 보임. 이는 퇴적물 기원 Mn 유입의 영향으로 판단됨.

자. Fe은 남극대륙과 근접한 Stn. 113과 외양 정점인 Stn. 90, Stn. 92를 제외하고 표층에서 상대적으로 낮은 농도로 나타났으며, 저층과 가까운 수심에서 증가하는 농도 특징을 보임. 전체적으로 외양 정점인 Stn. 90, Stn. 92를 제외한 대륙 주변 정점에서 상대적으로 낮은 농도를 나타냄.

차. Co는 일반적으로 표층에서 낮은 농도로 존재하며 표층 아래에서 다시 증가한 농도 분포를 보였으나, Stn. 90, Stn. 92의 심층에서는 다시 감소하는 경향이 나타남. Stn. 90, Stn. 92의 수심에서 다시 감소한 Co의 농도 특징은 외양 기원 수괴의 상대적으로 낮은 농도 특성을 반영한 것으로 판단됨

카. Ni, Cd은 상대적으로 표층에서 낮은 농도로 존재하지만 수심이 증가함에 따라 증가하는 농도분포를 보였음. 남극대륙과 근접한 Stn. 111, Stn. 113에서 다른 정점들과 비교했을 때 상대적으로 깊은 수심까지 고갈된 특징이 나타남.

타. Cu는 Stn. 90, Stn. 92의 저층에서 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 이는 퇴적물로부터 유입 또는 재광물화로 인한 결과로 판단됨.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절. 연구개발목표 달성도

1. 연구개발목표 달성도

가. 연구개발목표 달성도를 표 2에 나타냄.

표 2. 연구개발목표 달성도.

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
청정해수시료 채수시스템의 구축	1-1	채수시스템 장비 구비	- Niskin-X 채수기의 구비 - UHMWPE 로프의 구비 - Auto firing module의 도입 - 클린 컨테이너의 개선	100
	1-2	시험항해 참가	- 2021년과 2022년 아라온 시험항해 참가하여 청정해수시료 채수시스템을 이용한 해수시료를 확보 - 비교를 위한 일반 채수시스템을 이용한 해수시료의 확보	100
	1-3	청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템과의 농도 비교	- 청정해수시료 채수시스템과 일반 채수시스템을 이용하여 획득한 해수시료의 미량금속 농도 결과를 비교 - 농도 비교를 통해 일부 오염에 민감한 원소의 오염을 일반 채수시스템에서 확인	100
	1-4	일반 채수시스템에서의 오염원인 파악	- 선박으로부터 기원한 오염, 일반 채수시스템에 부착된 금속에 의한 오염, 채수기 내부에 장착된 부품으로부터 유래한 오염 등을 파악 - 미량금속 농도분석용 청정해수시료의 채취를 위해서는 청정해수시료 채수시스템이 필요하다는 것을 확인	100
남극항해 참가를 위한 준비 및 시료채취	2-1	시료병의 산세척 등 항해 참가 준비	- 아라온호 남극항해에 참가하기 위해 시료병, 캡슐필터 등의 산세척 및 시약의 정제 등, 항해 준비를 진행	100
	2-2	서남극해에서의 시료채취	- 23년 및 25년 1-2월 서남극해 연구항해에 참가하여 해수시료를 채취	100
채취된 시료의 전처리 및 분석	3-1	희토류 원소의 전처리 및 분석방법	- 고체상 컬럼추출법을 활용하여 희토류 원소를 농축 및 분석 - 분석 완료된 희토류 원소의 분포 및 기원 파악	80
	3-2	미량금속의 전처리 및 분석방법	- 고체상 컬럼추출법 및 해수자동농축시스템을 활용하여 미량금속 농축 및 분석 - 분석 완료된 미량금속의 분포 및 기원 파악	80

2절. 대외기여도

1. 본 연구를 통한 대외 기여도

가. 해수 중에 미량으로 존재하는 미량금속은 농도가 매우 낮게 존재함에도 불구하고 식물플랑크톤의 성장에 밀접한 관련이 있어 많은 주목을 받고 있으나, 시료의 채취 및 분석 시 오염이 발생할 가능성이 높아 아직까지도 데이터가 많이 부족할 실정임.

나. 이런 중요성에 의해 해외에서는 청정해수시료 채수시스템을 개발하여 많은 연구를 진행하고 있으며, 최근 우리나라 한국 해양과학기술원에서도 청정해수시료 채수시스템을 도입하여 연구를 진행하고 있지만, 이는 외국의 기술을 도입한 것으로서 자체적으로 채수시스템을 개발하지 못하였음.

다. 기존 연구선에 청정해수시료 채수시스템을 적용하기 위해서는 많은 비용이 발생하므로 경제적으로 비효율적이며 많은 부담이 따르게 되며, 이를 해결하기 위해 본 과제에서는 보다 경제적인 방법으로 채수시스템을 구축하였음.

라. 이를 통해 우리나라에서 아직 청정해수시료 채수시스템을 구비하지 못한 여러 연구선에 적용할 수 있는 방향을 제시할 수 있으며, 이미 구축 완료된 아라온호에서 향후 남극해 및 북극해에서 미량금속의 농도 분포 조사 및 이와 연계된 다양한 연구가 가능하게 됨.

마. 본 채수시스템을 활용하여 확보된 해수 시료는 해수 중 용존 미량금속의 농도 분포 및 거동 특성 이해를 위한 기초 자료로 활용 가능하며, 향후 극지 해역을 포함한 다양한 해역에서 미량금속의 생지화학적 순환기작 규명 연구에 기여할 수 있음.

사. 나아가 본 연구를 통해 확보된 자료는 국내외에서 수행 중인 미량금속 관련 연구에서 참고 자료로 활용될 수 있으며, 향후 관련 연구의 기초 자료로 기여할 수 있음.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1절. 추가연구의 필요성 및 타연구에 응용

1. 추가연구의 필요성

가. 본 과제를 통해 확립한 청정해수시료 채수시스템을 활용하여 본격적으로 남극해에서 해수시료를 채취, 미량금속 농도 측정을 통한 분포를 파악하고, 용빙수기원을 추적하여 용빙수기원 미량금속이 플랑크톤의 성장에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 연구가 필요하다고 판단하여 현재 배양실험과 연계하여 연구를 추진 중임. 남극해 뿐만 아닌, 기후변화에 민감하게 변화하는 북극해에서도 미량금속의 농도분포 조사가 가능해짐에 따라 향후 기후변화에 따른 미량금속의 농도 분포 변화가 전지구적 환경변화에 어떠한 영향을 끼칠 수 있는지에 대한 연구가 가능하게 됨.

2. 타연구에 응용

가. 미량금속의 농도 뿐만 아닌, 배양실험을 통한 미량금속의 생물가용성을 평가하기 위한 해수시료의 채취가 가능해지게 됨에 따라, 철 부족 환경으로 알려져 있는 남극해에서 철 주입에 따른 1차 생산량의 변화를 알아보는 배양실험이 가능할 것으로 기대됨.

제 6 장 참고문헌

- Bruland, K.W., Franks, R.P., Knauer, G.A. and Martin, J.H., 1979. Sampling and analytical methods for the determination of copper, cadmium, zinc, and nickel at the nanogram per liter level in sea water. *Analytica Chimica Acta*, 105: 233 - 245. doi:10.1016/s0003-2670(01)83754-5
- Croot, P.L., Baars, O. and Streu, P., 2011. The distribution of dissolved zinc in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58(25-26): 2707 - 2719. doi:10.1016/j.dsr2.2010.10.041
- Cutter, G.A. and Bruland, K.W., 2012. Rapid and noncontaminating sampling system for trace elements in global ocean surveys. *Limnology and Oceanography: Methods*, 10: 425 - 436. doi:10.4319/lom.2012.10.425
- Gosnell, K.J., Landing, W.M. and Milne, A., 2012. Fluorometric detection of total dissolved zinc in the southern Indian Ocean. *Marine Chemistry*, 132-133: 68 - 76. doi:10.1016/j.marchem.2012.01.004
- Kim, T., Obata, H., Gamo, T. and Nishioka, J., 2015. Sampling and onboard analytical methods for determining subnanomolar concentrations of zinc in seawater. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(1): 30 - 39. doi:10.1002/lom3.10004
- Lannuzel, D. et al., 2010. Distribution of dissolved iron in Antarctic sea ice: Spatial, seasonal, and inter-annual variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115: G03022. doi:10.1029/2009jg001031
- Lohan, M.C., Statham, P.J. and Crawford, D.W., 2002. Total dissolved zinc in the upper water column of the subarctic North East Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(24-25): 5793 - 5808. doi:10.1016/s0967-0645(02)00215-1
- Measures, C.I., Landing, W.M., Brown, M.T. and Buck, C.S., 2008. A commercially available rosette system for trace metal clean sampling. *Limnology and Oceanography: Methods*, 6: 384 - 394. doi:10.4319/lom.2008.6.384
- Moore, C.M. et al., 2013. Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature Geoscience*, 6(9): 701-710. doi:10.1038/ngeo1765
- Sohrin, Y. and Bruland, K.W., 2011. Global status of trace elements in the ocean. *Trends in Analytical Chemistry*, 30(8): 1291 - 1307. doi:10.1016/j.trac.2011.03.006
- Wyatt, N.J. et al., 2014. Biogeochemical cycling of dissolved zinc along the GEOTRACES South Atlantic transect GA10 at 40°S. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(1): 44 - 56. doi:10.1002/2013gb004637

뒷 면

주 의

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

위탁과제 국·영문 사사(acknowledgment) 표기 방법

☐ 국문 표기

- 이 연구는 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.(본과제 계정번호*)

* 본과제 계정번호: 극지연구소에서 부여한 과제번호로 연구소 연구관리담당부서에 확인

☐ 영문 표기

- This work was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI, 본과제 계정번호)

* 연구결과의 발표 내용에 따라 위의 표기방식을 변경할 수 있으나, 밑줄 친 내용이 반드시 포함되어야 함

극지연구소