

신진연구(우수신진연구) 최종보고서

| ① 부처사업명(대) | 기초연구사업 | 보안등급(보안, 일반) | 일반 | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--|--------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------|
| ② 사 업 명(중) | 신진연구 | 공개가능여부(공개, 비공개) | 공개 | | | | | |
| ③ 세부사업명(소) | 우수신진연구 | | | | | | | |
| ④ 과제성격(기초, 응용, 개발) | 기초 | ④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화) | 비실용화 | | | | | |
| ⑤ 연구개발과제명 | 국 문 | 화학 종조성 특성에 따른 대양 미량원소의 생지화학 거동 규명 연구 | | | | | | |
| | 영 문 | Study on biogeochemical behavior trace elements in the ocean based on chemical species | | | | | | |
| ⑥ 주관연구개발기관 | 한국해양과학기술원 | | | | | | | |
| ⑦ 연구책임자 | 성 명 | 김인태 | 직급(직위) 선임연구원 | | | | | |
| | 소속부서 | 해양환경연구부 | 전 공 화학해양학 | | | | | |
| ⑧ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, M·Y) | | | | | | | | |
| 연 도 | 정부지원 연구개발비 (A) | 기업체부담금 | | | 정부외 출연금 (B) | 상대국 부담금 (F) | 합계 G=(A+B+E) | 참여 연구원수 |
| | | 현금 (C) | 현물 (D) | 소계 E=(C+D) | | | | |
| 1년차 | 150,000 | | | 0 | | | 150,000 | 1 |
| 2년차 | 50,000 | | | 0 | | | 50,000 | 1 |
| 3년차 | 100,000 | | | 0 | | | 100,000 | 2 |
| 4년차 | | | | 0 | | | 0 | |
| 5년차 | | | | 0 | | | 0 | |
| 합계 | 300,000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 300,000 | 4 |
| ⑨ 총연구개발기간 | 2020. 03. 01 ~ 2022. 02. 28 (36개월) | | | | | | | |

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2023 년 3 월 27 일

연구책임자 : 김 인 태

주관연구개발기관의 장 : 강 도 형

과학기술정보통신부장관 귀하

※ 전자접수이므로 연구책임자 및 주관연구개발기관의 장 서명(인, 직인)은 생략

〈 연구결과 요약문 〉

| | | | | | | |
|--|---|----------------|--------------------|---------|------------|-----------|
| 연구개요 | <p>○ 최종 연구 목표</p> <p>대양에서 주요 미량원소의 화학 종분화 (chemical speciation) 양상에 따른 분포 특성을 이해하기 위하여 (콜로이드 상, 유기 착화결합 종조성 등) i) 용존 미량원소의 화학 종분화에 따른 분석법을 구축, 확립하고 ii) 그에 따른 해양생물 가용성 (bioavailability) 등 해양 수층에서의 생지화학 거동을 평가하는데 적용하고자 함</p> | | | | | |
| 연구 목표대비 연구결과 | <p>○ 세부 목표, 현장 관측을 통한 대양 수층 해수 중 청정해수시료 획득의 목표에 따라 (한반도 주변해 및 인도양 등 대양) 해양과학 종합연구선 이사부호 기반 청정 해수 채취 방법을 활용하여 미량원소 청정 해수 시료를 채취하고, 미량원소의 화학 종 조성(콜로이드 및 유기결합 등)을 정성/정량적으로 분석하고 그 분포 특성을 조사함</p> <p>○ 2020-2021년 연구 1-2차년 코로나 확산으로 인해 대양 조사관측 일정 취소 등으로 시료 채취 범위가 축소된 대신, 한국 주변해 해양 주요 미량원소 공급원인 대기기원 미량원소의 종분화를 파악하기 위해서, 2020-2021년 소청초에서 2년간 채취된 대기분진 시료를 확보, 대기분진 내 미량원소의 화학 종조성 (해수 용해 가능성분-잠재 생물 가용성) 연구를 통해 예비결과 확보</p> <p>○ “콜로이드, 유기리간드 등 해수 중 미량원소 화학 종조성 실험 분석법 구축” 연구 목표 수행을 위해 미량원소의 화학 종 조성(콜로이드 및 유기결합 등)에 따른 해수 중 분포 특성을 정성/정량적으로 분석하는 분석 환경 (유동 주입 분석장비, 전기전압 분석 장비 등)을 국내 최초로 구축하고, 해수 미량원소 정밀 분석법 개발 및 정립</p> <p>○ “미량원소 종분화에 따른 정량 분석법 상호검증 통한 국제 분석 인증 확보“ 목표 수행을 위해, 국내에서 최초로 입자상 미량원소의 해양 상층 분포 및 거동을 규명하고 이를 국제학술지 발표를 통해 국제 분석법 인증을 수행함</p> <p>○ “유기 리간드 결합 형태의 미량원소의 생물 이용가능성 자료해석 및 평가” 목표 수행을 위해, 미량원소의 하나인 납(Pb)의 해양 상층 유입량 평가를 통해 인위적 기원 유입 미량원소의 용해도와 그에 따른 해양생물 가용성 영향을 규명함, 본 연구 결과는 국제학술지 투고 계획 중에 있음</p> | | | | | |
| 연구발성과의 활용 계획 및 기대효과 (연구개발결과의 중요성) | <p>○ 본 연구 결과는 ,다양한 형태의 물리적/화학적 종조성을 가진 미량원소가 생물 이용성에 미치는 영향 (증가 혹은 감소)을 국내외에서 처음으로 규명하는 연구 시도로서, 본 신진연구 과제 수행을 통해, 다양한 미량원소의 화학 종 조성(콜로이드 및 유기결합 등)에 따른 해수 중 분포 특성을 정성/정량적으로 분석하는 분석 환경 및 최신 분석장비, 인프라(유동 주입 분석장비, 전기전압 분석 장비 등)을 국내 최초로 구축하고, 해수 미량원소 정밀 분석법 개발 및 정립을 하는 시도를 하였음</p> <p>○ 따라서, 신진 연구의 취지에 따라 기존에 해양에서 분포, 일부 거동 특성만을 밝혀낸 미량원소 연구 범위를 확장하고, 후속 연구를 통해 해양의 물질수지 및 물질순환 재평가를 위한 새로운 국제최고 수준의 연구수행을 시도하기 위한 기반을 갖추</p> <p>○ 이사부호 청정 해수채취를 통해 국제 미량원소 공동연구프로그램인 GEOTRACES의 연구 성과 기여를 통한 국제사회 기여 및 한국의 대양 관측 연구 역량 강화 의의</p> <p>○ 국내 최초로 도입되어 전세계에서 3대만 보유 중인 이사부호 장착 청정해수채취시료 장비 (PRISTIN Ultra Clean CTD) 및 본 연구원 최신 도입 분석장비 (Cyclic Voltammetry, 해수 전처리 자동화 질량분석기 SeaFAST ICP-MS 등) 적극 활용 및 국제수준의 대량 미량원소 연구 역량 제고 기대됨</p> | | | | | |
| 중심어 | 국문 | 미량원소 | 대양 물질순환 | 콜로이드 | 종조성 | 지오펜트레이스 |
| | 영문 | Trace elements | Cycle in the ocean | Colloid | Speciation | GEOTRACES |

〈 목 차 〉

| | |
|---|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 | 04 |
| 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용 | 05 |
| 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 | 06 |
| 4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도 | 14 |
| 5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 | 14 |
| 6. 자체점검표 | 14 |
| 7. 참고문헌 | 15 |
| | |
| <붙임1 세부 정량적 연구개발성과> | 16 |
| <붙임2 연구책임자 대표적 연구실적 및 증빙(요약문 및 사본)> | 17 |

1. 연구개발과제의 개요

○ 연구 목표

대양에서 주요 미량원소의 화학 종분화 (chemical speciation) 양상에 따른 분포 특성을 이해하기 위하여 (콜로이드 상, 유기 착화결합 종조성 등) i) 용존 미량원소의 화학 종분화에 따른 분석법을 구축, 확립하고 ii) 그에 따른 해양생물 가용성(bioavailability) 등 해양 수층에서의 생지화학 거동을 평가하는데 적용하고자 함

○ 연구의 필요성

- 대양에서 주요 미량원소는 생물 생산에 필수적인 미세 영양염으로 작용하나, 기존의 미량원소의 생물 가용성은 모델 결과, 혹은 pH 변화에 의한 무기화학 종조성에 관련하여서만 주로 연구가 이루어짐 (Buck et al. 2012, 2015).
- 무기 형태 (예, 자유 이온 Fe^{2+} , Cu^{2+} 등)의 미량원소는 대부분 생물 이용 가능한 것으로 알려져 있는 반면, 초소형 입자인 콜로이드 상 혹은 유기결합(Organic complexed) 형태의 미량원소는 각 원소의 종류에 따라 유기화합물이 증가할수록 생물이용도가 증가하거나(예, Fe) 감소(예, Cu)하는 것으로 알려져 있는 등, 아직 많은 부분이 연구되어 규명되지 못하고 있음 (Gerringa et al. 2015; Echeveste et al. 2018).
- 실제 해양에서 미량원소는 대부분 과반, 혹은 그 이상이 유기착화물 형태의 유기리간드 (Ligand)와의 결합한 형태로 분포하고 있어, 미량원소의 유기화학결합 종조성은 미량원소의 용해도(Solubility)와 그에 따른 생물 이용성 및 독성 (Toxicity) 등 그 생지화학 거동을 결정하는 가장 중요한 요인임 (Buck et al. 2017). 그럼에도 불구하고, 유기화합 형태의 미량원소 종조성은 예측불가능한 다양한 생물/비생물 요인의 영향으로 인해 모델 결과로 예측이 불가하여, 간접적인 방법에 의한 정량에만 의존하고 있음.
- 이러한 중요성에도 불구하고, 대양에서 미량원소 연구는 국내에서도 본 연구원의 이사부호의 건조와 함께 이제 막 시작단계에 있으며, 미량원소의 분포 및 기초적인 거동을 밝히는 연구만 수행중에 있어, 이러한 화학적 종조성과 그 생지화학적 영향에 대한 연구는 국내에서는 전무함.
- 이사부호의 건조와 함께 한국해양과학기술원(KIOST)는 대양 미량원소 청정 해수채취장비를 국내에서 처음 도입하여 관련 연구에 활용하고 있으며, 2018년 이후 관련 실적을 국내에서 처음으로 학술지 게재, 국제사회 발표 등 본 연구자가 국내에서 최초로 대양 미량원소 연구 성과를 GEOTRACES 프로그램의 국내 대표자로서 기여 시작함.

○ 연구 범위

- 해양의 생물 1차 생산에 필수 미세영양염 및 영향을 미치는 6대 주요 미량원소 (Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Pb 등) 및 기타 미량원소 등
- 연구 지역은 한국 주변해 (동해 등) 및 대양 (인도양 등) 및 수층(water column)
- 미량원소의 해양에서 크기 분별 기준인 용존/입자태 미량원소에 국내에서는 처음으로 콜로이드 ($10kDa < colloid < 0.2 \sim 1 \mu m$) 상을 분리, 분석하여 일반 용존상 (및 입자상)미량원

소의 분포와의 비교 분석

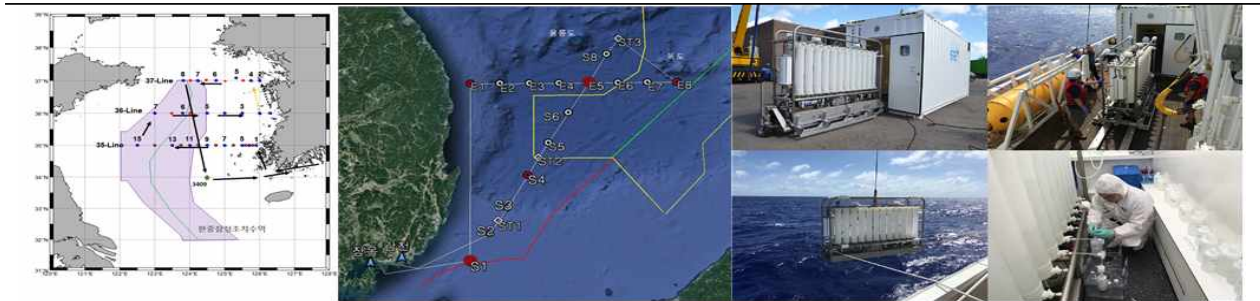
- 현장 (해양 선상) 미량원소 직접 분석을 위한 분석 장비 구축 (유동 주입 분석장비, Flow injection analysis) 및 유기착화 형태의 미량원소 분리 정량 분석을 위한 전기전압법 분석장비 (CVS, Cyclic Voltammetry)를 국내에서는 최초로 도입 하고 실험법을 구축 및 활용 적용
- 수층 분포 미량원소의 총 농도, 유기 리간드 농도, 유기물과 결합(binding)되어 있는 미량원소의 농도, 유기화학 종조성 등을 국내에서 처음으로 정량 분석하여, 해양 미량원소의 생물 가용성 및 대양 생지화학 순환 규명을 위한 첫 연구 결과 확보

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

- 해양에서(한반도 주변해 및 인도양 등 대양) 해양과학 종합연구선 이사부호 기반 청정 해수 채취 방법을 활용하여 미량원소 청정 해수 시료를 채취하고, 미량원소의 화학 종조성(콜로이드 및 유기결합 등)을 정성/정량적으로 분석하고 그 분포 특성 규명
- 시료 채취 범위가 축소된 대신, 한국 주변해 해양 주요 미량원소 공급원인 대기기원 미량원소의 종분화를 파악하기 위해서, 2020-2021년 소청초에서 2년간 채취된 대기분진 시료를 확보, 대기 분진 내 미량원소의 화학 종조성 (해수 용해 가능성분-잠재 생물 가용성)에 대한 분석 결과 획득 및 평가.
 - 미량원소의 화학 종 조성(콜로이드 및 유기결합 등)에 따른 해수 중 분포 특성을 정성/정량적으로 분석하는 분석 환경 (유동 주입 분석장비, 전기전압 분석 장비 등)을 국내 최초로 구축하고, 해수 미량원소 정밀 분석법 개발 및 정립 (국내 최초)
- 해수 중 콜로이드 상 미량원소를 분리/측정하여 대양 상층부(한반도 주변해 및 인도양 등 대양) 에서 생물학적 유기물결합-미량원소의 분포 특성을 이해하고 용존/입자상 미량원소와의 거동 차이 비교 규명
- 인도양에서 미량원소의 입자/용존상 화학 종조성에 대해 처음으로 조사하여, 해양 상층 (500m 상층)에서 입자상 미량원소의 침강 체류시간 및 거동에 대해 국내 최초 규명함
- 입자상 미량원소의 자료 획득 및 국제 학술지 논문 발표를 통해 미량원소 분석 국제 공인 인증 획득
- 동해에서 미량원소 및 미량금속(Th)의 콜로이드 상 시료를 분리법을 구축하여, 콜로이드 상 미량원소 및 미량금속(Th 등) 시료채취를 수행하였으며, 콜로이드 상 미량원소 분석을 통한 해양 종조성 평가 진행 중
- 인도양 및 동해에서 인위적 기원 미량원소 (납 등)의 해양 유입량을 평가하고, 대기 기원 미량원소(납 등)의 용해도(solubility) 규명을 통한 해양생물 가용성 평가
- 남해 해수에서 플랑크톤의 크기별 미량금속의 농도 조사를 통해 식물플랑크톤의 미량금속 생물가용성 및 흡수 비율을 평가하고자 시료 플랑크톤 내 미량금속 시료 분석
- 본 시료 분석을 통한 유기물결합된 미량원소의 분포 특성을 이해하고, 관련하여 생물기원(biotic)/비생물기원(Abiotic) 미량원소의 분포 및 분별과정 거동 규명 진행 중

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 수준

1) 정성적 연구개발성과(연구개발결과)



○ 이사부호 기반 동해 선상관측을 통해 이사부호 청정해수채취장비 (Ultra Clean CTD)기반 청정미량금속 해수채취장비 활용 미량원소 해수 분석 시료 확보

그림1. 금년차 연구 수행의 일환으로 수행한 황해(2021년 3월)와 동해에서의 연구항해 (2020년 3월, 2021년 2월) 이사부호 연구항해 정점도 (가운데 그림) 및 해수 미량원소 시료채취 정점 (빨간색점, 왼쪽 그림) RV연구선 이사부호 관급장비인 미량원소 오염 방지 청정해수채취(UCC) 장비 운영 모습 (오른쪽 그림)

| Element | Procedural blank | MDL | CASS-6 (n=11) | | NASS-7 (n=11) | | GSC (n=5) | | GSP (n=5) | |
|---------|------------------|-------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | | Certified values | KIOST | Certified values | KIOST | Certified values | KIOST | Certified values | KIOST |
| Fe | 0.17 | 0.08 | 27.3±2.1 | 28.3±0.8 | 6.14±0.46 | 6.4±0.3 | 1.53±0.12 | 1.43±0.06 | 0.15±0.05 | 0.048±0.002 |
| Mn | 0.05 | 0.03 | 39.6±2.2 | 40.2±1.0 | 6.3±0.5 | 14.7±0.03 | 2.15±0.13 | 2.38±0.01 | 0.76±0.05 | 0.80±0.03 |
| Co | 0.003 | 0.001 | 1.117±0.088 | 1.144±0.010 | 0.242±0.024 | 0.252±0.007 | 0.084±0.004 | 0.089±0.007 | 0.005±0.001 | 0.007±0.001 |
| Cu | 0.08 | 0.1 | 8.0±0.49 | 8.3±0.2 | 3.0±0.22 | 3.6±0.5 | 1.16±0.03 | 0.93±0.01 | 0.55±0.01 | 0.30±0.03 |
| Cd | 0.002 | 0.002 | 0.192±0.016 | 0.223±0.011 | 0.141±0.014 | 0.159±0.003 | 0.369±0.024 | 0.405±0.006 | <D.L | 0.004±0.001 |
| Ni | 0.1 | 0.08 | 6.83±0.67 | 6.86±0.10 | 4.05±0.3 | 3.80±0.12 | 4.12±0.29 | 3.87±0.08 | 2.46±0.13 | 2.05±0.02 |
| Zn | | | 18.97±2.75 | 18.83±0.86 | 6.27±1.22 | 6.83±0.12 | 1.41±0.10 | 1.53±0.02 | 0.16±0.05 or <D.L | 0.041±0.003 |
| Pb | | | 0.050±0.002 | 0.049±0.004 | 0.012±0.003 | 0.014±0.001 | 0.040±0.002 | 0.036±0.001 | 0.062±0.003 | 0.055±0.001 |
| V* | | | 9.62±2.36 | 12.27±0.35 | 24.93±1.57 | 26.56±0.39 | | | | |
| Cr* | | | 1.88±0.31 | 1.93±0.05 | 2.02±0.31 | 2.23±0.00 | | | | |

표1. GEOTRACES 제공 해수 미량원소 표준물질인 GSC와 GSP를 분석하여 상호 비교한 결과, 잘 일치하는 결과를 얻었으며 이를 통해 국제 분석 공인 인증을 성공적으로 수행함
본 미량금속 청정해수 채취 시료는 국제상호검증 (GEOTRACES) 프로그램에 참여하여, 두가지 국제 공인 표준물질 분석 결과를 통해, 미량원소의 청정도와 분석 능력 인증을 확보 받음

○ 연구 장비 도입 및 실험 연구 환경 및 연구 기반 구축



그림2. 해수 미 해양 환경 시료 중 미량금속 분석 위한 전처리 장비 (콜로이드 상 분리 위한 원심분리 장비 및 선상 등 현장 활용용 이동형 청정 실험 환경 벤치 (왼쪽), 유기 착화 형태 미량원소 농도 분석 용 전기전압법 장비 (Cyclic voltammetry) (가운데) 및, 현장(선상) 적용 가능 미량원소 분석 장비 (유동 주입 분석장비, Flow injection analysis) (오른쪽) 을 및 본 연구자의 연구실에 도입하여 현재 기초 장비운영 개시 및 실험 방법 구축 중

○ 대기 기원 해양 유입 미량원소의 용존 가능부분 (dissolvable) 및 해양 생물 가용성 (bioavailability) 평가

- 이사부호 국외 인도양 연구 향해 향차의 취소로 채취 범위가 축소된 대신, 한국 주변해 해양 주요 미량원소 공급원인 대기기원 미량원소의 증분화를 파악하기 위해서, 2019-2020년 소청초에서 1년간 채취된 대기분진 시료를 확보, 대기 분진 내 미량원소의 화학 종조성 (해수 용해 가능성분-잠재 생물 가용성)을 연구함
- 기존에 여과지 시료를 강한 산으로 완전 용해 (total-digestion)하는 방식과, 해수와 유사한 산도 (pH~8)에 가까운 증류수 기반 인공해수를 제작하여 leaching되어 녹아나오는 양을 비교하였으며, 이 비교를 통해 실제 대기를 통한 미량원소의 유입 성분이 실제로 상층 해양에서 용존가능하여 (dissolvable) 실제로 물에 녹아 (actual-dissolvable in seawater) 장기적으로 생물에 실제로 가용되는 (actual-bioavailable) 미량원소의 양을 평가하고자 함

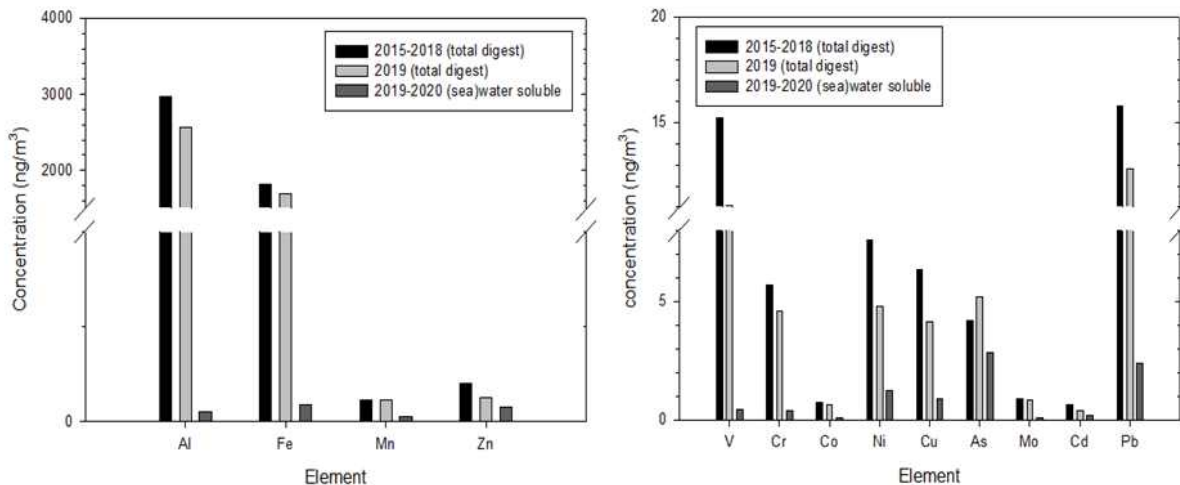


그림3. 황해/남해 소청초 해양과학 기지에서 2019-2021년 채집된 대기분진(에어로졸)시료에서 total digestive (총용해) 대비, 해수-증류수 soluble한 portion만을 용출(leaching)하여 측정된 주요 미량원소 농도 분율의 비교. 이를 통해 대기를 통한 유입된 미량원소가 해수 중에 water-soluble한 portion을 분리/정량-정성 비교하였으며 본 자료는 현재 학술지 논문 투고 예정에 있음

- Al, Fe, Mn, Zn 등 주로 lithogenic한 기원의 미량 금속의 경우, 전체 농도의 0.1~10% 이내의 portion만이 인공해수에 leaching되어 실제 대기분진 등 에어로졸이나 대기 낙진으로부터 기인한 미량원소 Al, Fe, Mn, Zn 등은 실제로 1% 미만의 portion만이 해수 중에서 생물에가용한 것으로 나타났다. (Fe은 1-2%, Al은 1-5%, Zn는 5-16%, 40%, 나머지 Pb,Cu, Ni, Mn, Cd ~ 20-70%)
- 그 외 생물 활동 기반의 V, Cr, Co Cu, Mo, Cd 전체 입자상 농도 중 10~20% 정도의 양이 인공해수를 통해서도 용출 되는 결과를 얻었으며, 상기 원소들은 외부에서 입자상/고체상으로 유입 시 전체 최대 10-20% 의 농도가 생물에 가용 될 수 있음을 밝혀냄
- 가장 높은 용해도를 보이는 원소는 Pb으로 30%에 가까운 입자상 농도가 해수 pH에서 용해 가능한 것으로 나타났는데, 이는 Pb은 lithogenic하거나 자연적으로 기원하는 원소들에 비해 상대적으로 입자크기가 작은 인위적 기원의 (wild-fire, 도로 비산먼지, 화석연료)유입원으로 인해 다른 원소에 비해 더 높은 용해성을 보이는 것으로 판단됨

○ 입자상 (거대입자/미세입자) 미량원소의 대양 상층 거동 평가 연구

- 본 연구에서는 국내에서 최초로 대양(인도양)에서 청정해수채취장비를 이용해 입자상 미량원소의 시료 채취 및 분석을 수행하였으며, 입자상 미량원소가 해양 상층에서 어떤 침강 거동을 보이는지 국내에서 처음으로 평가한 연구를 수행함
- 미량금속 인도양 위도 4내지 5도 간격으로 총 8개의 정점에서 UCC를 운용하여 시료채취

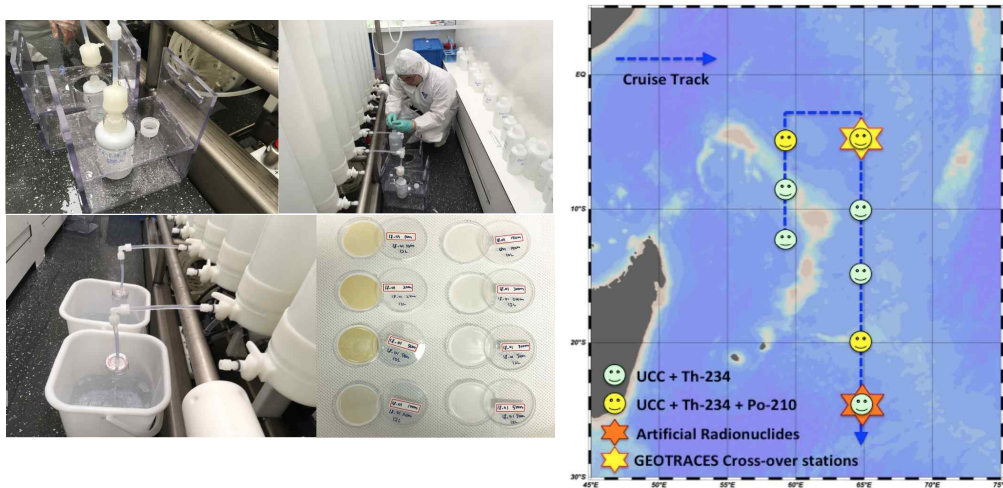


그림4 UCC를 이용한 용존 (물시료) 청정 해수 시료 subsampling 및 여과 방법(왼쪽)과 인도양 미량원소/동위원소 항목별 시료채취 정점도 (오른쪽)



그림 5 연구청사 1연구동에 구축된 청정 실험 환경과 용존 미량원소 실험 관련 세척 및 전처리 장비(왼쪽)와 본 청정실험실에 구축된 해수 중 용존 미량원소 전처리-질량분석기 (seaFAST)의 운용 사진 (오른쪽)

- 국내에서는 처음으로 국제 공인된 GEOTRACES 표준 프로토콜을 도입, 기존의 여과지 자체를 용해시키는 방법 대신, 용해액을 지속적으로 상대적으로 저온에서 Reflux시키며 입자물질만을 leaching 시켜 바탕농도 및 교차 오염을 최소화시키는 청정 전처리 방법 정립 및 구축



그림 6 입자상 미량원소의 전처리 실험 모습

- 입자상 미량원소의 침강 플럭스는 방사성동위원소 추적자 ^{234}Th 을 활용해 계산하였으며,
 - 어미핵종인 U-238과 Th-234의 비평형을 이용한 Th-234의 입자상 침강 flux를 산정하기 위하여, 아래 물질수지 계산식을 적용, (^{238}U 과 ^{234}Th 는 total ^{238}U 과 ^{234}Th activity, λ 는 ^{234}Th 의 붕괴상수 (0.0288 day^{-1}), P는 ^{234}Th 의 침강 입자에 의한 export flux, V는 수평 이류에 의한 ^{234}Th 의 수평 공급)

$$\partial^{234}\text{Th}/\partial t = (^{238}\text{U}-^{234}\text{Th})\lambda - P + V$$

- 정상상태 (steady state)를 가정하고 계산된 ^{234}Th 의 침강 플럭스는 60E SCTR 지역 section에서 약 $4170 \pm 3010 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 68E section에서는 평균 $1350 \pm 947 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 나타남

- 해양에서 미세 영양염으로 역할을 하는 것으로 잘 알려진 7대 주요 미량원소인 Al, Fe, Mn, Co, Cu, Zn, Cd의 얻어진 입자상 미량원소 농도 (concentration of Particulate Trace Element, CP_{TE})와 ^{234}Th 의 $\text{CP}_{\text{TE}}/^{234}\text{Th}$ 비 값은 각각 Al: $871 \pm 332 \sim 1740 \pm 664$, Fe: $697 \pm 266 \sim 1260 \pm 481$, Mn: $57.5 \pm 21.9 \sim 963 \pm 367$, Co: $4.66 \pm 1.78 \sim 5.27 \pm 2.01$, Cu: $231 \pm 88.0 \sim 797 \pm 304$, Zn: $17.4 \pm 6.64 \sim 43.6 \pm 16.6$, Cd: $0.46 \pm 0.18 \sim 1.81 \pm 0.69$ (단위는 모두 pmol dpm^{-1})로 계산됨

- 이를 적용하면, 서인도양 60E와 67E 종단 (남위 3도~25도) 가을철 입자상 미량원소의 일차생산이 일어나는 PPZ지역에서의 (Local source가 강하게 나타난 SCTR region은 제외) 침강 속도, 심층으로의 export flux는 약 Al: $1020 \sim 2030 (\pm 1100) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Fe: $812 \sim 1470 (\pm 878) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Mn: $67.0 \sim 1120 (\pm 72.4) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Co: $5.4 \sim 6.1 (\pm 5.9) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Cu: $269 \sim 929 (\pm 291) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Zn: $20.3 \sim 57.8 (\pm 21.9) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Cd: $0.54 \sim 2.11 (\pm 0.58) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 산정됨

이렇게 산정된 입자상 미량금속의 상층(<100m)해양에서 침강플럭스를 기반으로 입자상 미량금속의 상층 체류시간을 산정한 결과는 아래 표2와 같으며, 본 연구결과는 국제학술지(SCOPUS)에 2021년 게재하였다. 이는 대양에서 청정해수시료 채취 기반 입자상 미량금속 최초 국내 연구결과의 의의가 있음

표2. 서인도양 60도와 68도 종단선에서 입자상 미량원소의 플럭스 및 100m 상층해양에서의 체류시간(괄호) 산정 결과

Table 2. The export flux of particulate trace element ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for Al, Fe, and Zn, and $\text{nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for the other trace elements) in the upper (< 100 m) Indian Ocean based on $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium. Values in the parenthesis indicate the estimated residence time (< 100 m) of particulate trace element (τ_{100} , unit: day) in Indian Ocean (in 2018). Result from Kim et al. (2018)

| | Al (τ_{100}) | Fe (τ_{100}) | Mn (τ_{100}) | Co (τ_{100}) | Cu (τ_{100}) | Zn (τ_{100}) | Cd (τ_{100}) | Ni (τ_{100}) | V (τ_{100}) | Pb (τ_{100}) |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 60°E (SCTR) | 63±75 (8.3±3.4) | 27±32 (9.6±5.2) | 470±570 (7.6±6.1) | 34±41 (11±24) | 400±480 (8.2±3.1) | 22±27 (8.9±3.7) | 20±24 (7.9±5.2) | 360±430 (7.6±2.6) | 160±190 (9.8±4.7) | 350±420 (10±5) |
| 68°E | 20±24 (16±11) | 9.0±10 (2.5±1.1) | 150±180 (18±10) | 11±13 (11±5) | 130±150 (16±3) | 7.3±8.6 (15±34) | 6.4±7.5 (17±11) | 116±137 (18±5) | 51±59 (14±5) | 113±133 (13±13) |

○ 인도양 대기 기원 미량금속(납Pb)의 실제 해수 중 용해 가능한 (actual dissolvable) 해양 유입양 산정 및 해양 생물 가용성 평가

- 서인도양에서 용존 미량금속 Pb과 방사성 동위원소 Pb-210의 수직-수평분포를 조사하였다. Pb은 특히, 기존 연구들로부터 알려진 해수의 용해도가 그 입자크기에 따라서 20~90%로 그 범위가 매우 다양하게 나타나는 원소로 그 기원(화학적 종조성)에 따라 해수의 용해도 및 그에 따른 생물 가용성의 차이가 크게 나타날 것으로 예상되는 원소이다.

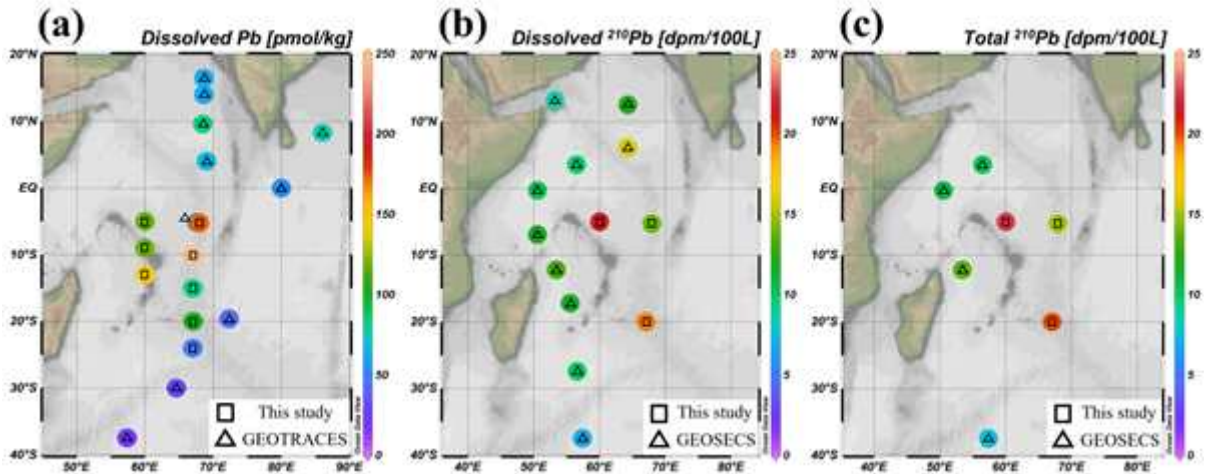


그림7. 서인도양에서 표층 용존 납과 방사성 동위원소 ^{210}Pb 의 수평 분포도

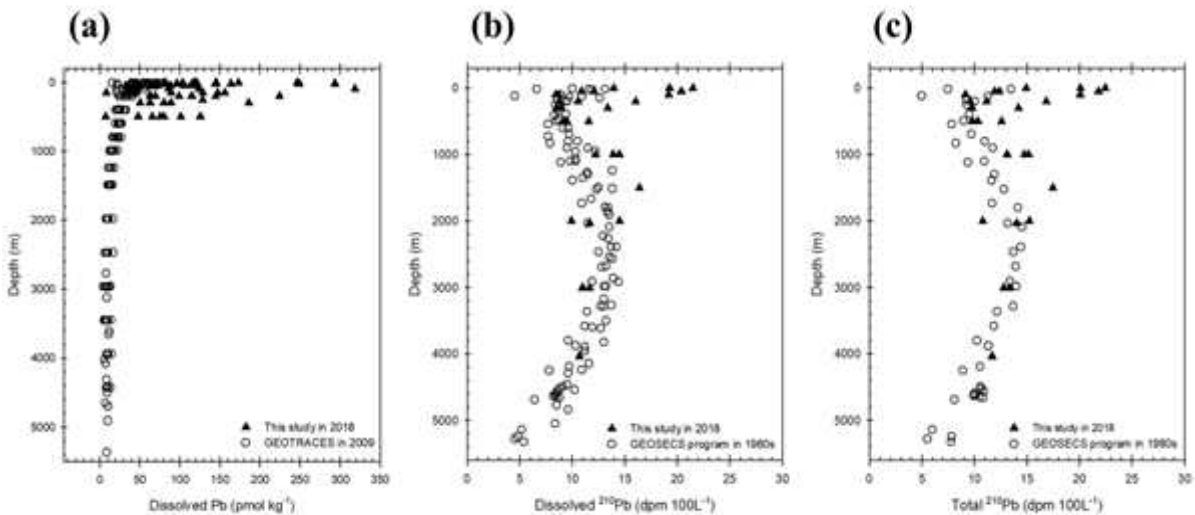


그림8. 서인도양에서 용존 납과 방사성 동위원소 ^{210}Pb 의 수직 분포

-납의 표층 분포는 서인도양에서 위도, 지역별로 2배 이상 다소 차이가 나타나며, 이는 지역적 local input의 영향이 다르게 나타남을 시사한다. 심층(수심>500m)에서 Pb과 ^{210}Pb 의 농도 분포는 과거 70년대 GEOSECS의 조사 자료, 2000년대 일본의 GEOTRACES 1회 조사 자료와 유사한 농도 분포를 보이지만, 상층 300미터 위층에서는 Pb과 ^{210}Pb 이 일관되게 다른 연구보다 3배까지 높은 농도가 나타났으며, 이는 지난 30여년간 꾸준한 인위적 기원 Pb이 해수 중에 녹아서 수평 수송을 통해 해당 연구지역에 꾸준히 유입되고 있음을 시사한다.

- 본 연구에서는 국내에서는 처음으로 인도양에서 ^{210}Pb 의 물질수지 mass balance를 기반으로 대기로부터 유입되는 F_{Atm} 납의 유입양(플럭스)를 산정하고자 하였다. 특징적으로, 용존상의 ^{210}Pb 의 물질수지 모델을 기반으로 유입양을 산정함으로써, 대기로부터 어떠한 형태의 Pb이 유입되었는지 관계없이 (입자상, 용존상, 총, 거대입자, 미세입자 등등) 실제로 표층 해수 중에 물에 녹아 든 (actual dissolvable) 상을 인도양에서 처음으로 산정-시도하였다. 본 연구에서 정립한 물질수지 모델에서 ^{210}Pb 의 유입항으로는 어미핵종 Ra-226으로부터의 방사붕괴, 대기로부터 유입이 있으며, 제거항으로는 Pb-210의 방사붕괴 및 입자와의 흡착을 통한 침강 제거항으로 규정하여, 아래와 같은 물질수지 식을 만들었다.

$$\frac{\partial A_{\text{Pb-210}}}{\partial t} = \lambda_{\text{Pb-210}} \times (A_{\text{Ra-226}} - A_{\text{Pb-210}}) + F_{\text{Atm}} - k_{\text{Pb-210}} A_{\text{Pb-210}} = 0$$

- 본 연구의 이전 연구에서, 수심<100m 상층 해양에서 Th-234 방사성 동위원소를 적용하여 추정된 Pb의 침강률 (scavenging rate)에 기인한 ^{210}Pb 의 체류시간은 약 26~34년으로 산정되었으며 (Kim 2021), 정상상태를 가정하였을 때, 이 체류시간을 적용하여, Pb의 (^{210}Pb 과 같은 체류시간일 것이므로) 대기 기원 실제 해수 중 용해가능한 (dissolvable) Pb의 유입양은 170~400 nmol m⁻² yr⁻¹로, 이는, 다른 대양에서의 간접 추정 연구결과와 유사한 결과로 나타났다 (아래 표 3)

표3, 본 연구에서 산정한 actual dissolvable Pb 대기 기원 유입량 및 다른 지역에서의 연구결과와의 비교

| AeolianPb flux (nmol m ⁻² yr ⁻¹) | Study region | Chemical form |
|--|--|--------------------|
| 170~400 | Indian Ocean (This study) | Actual dissolvable |
| 100~240 | Southern Indian Ocean (before1990s) | Total deposition |
| 300±460 | North Atlantic | Wet deposition |
| 500±80 | North Pacific | Wet deposition |

- 일반적으로 대기기원 해양유입 미량원소 중 90% 이상 가장 중요한 portion은 습식침적 (wet deposition)으로 알려져 있는데, 본 연구에서 산정한 actual dissolvable Pb flux는 대서양과 북태평양에서의 습식침적 플럭스와 매우 유사한 것으로 나타났다, 비록 최근 인도양에서 연구된 total aeolian Pb flux (대기로부터 유입된 Pb의 총양) 연구가 없어서 직접적으로 비교는 불가하지만, 90년대의 대기기원 총 Pb의 유입양과 비교하면 거의 유사한 양으로 나타났으며, 이는 인도양에서 대기기원 Pb의 유입의 실질적 용해도 (actual dissolvable portion/total Pb Flux)가 대략 90%~100%에 이르는 것을 시사한다.

- 일반적으로, 인위적 기원 오염원으로부터 기인한 Pb은 그 입자 크기가 상대적으로 작아, 해양에서 더 높은 용해도를 보여주는 것으로 알려져있다. 이를 고려하면, 본 연구결과는 동남아시아와 인도아프리카 등 인도양 주변국에서의 최근 산업화와, wild-fire 등 현안 이슈가 되고있는 대기 오염원이 지난 90년대 이후 꾸준히 증가하면서 이 지역의 인위적 기원 Pb 유입양이 증가되고 있음을 시사한다.

○ 해양 생물의 미량원소 흡착 양상 및 가용성 평가 연구 진행 중

- 2022년 남해에서 선상 netting 작업을 통해 해양 생물 (식물플랑크톤 <20um, 동물플랑크톤 <300um) 시료를 채취, 미량원소 청정 프로토콜에 기반한 전처리를 수행하였으며, 현재 플랑크톤 생체 내 미량원소 분포의 분석을 진행 중에 있음. 본 과제 종료 이후에도, 분석 결과의 해석 및 논문 작성을 계속 수행할 예정임. 본 연구 결과 획득을 통해, 해양생물이 일차생산을 위해 미량원소를 얼마나, 어떠한 화학적비율(Stoichiometry)를 보이며 미량원소를 가용하게 되는지에 대한 평가가 가능할 것으로 기대됨

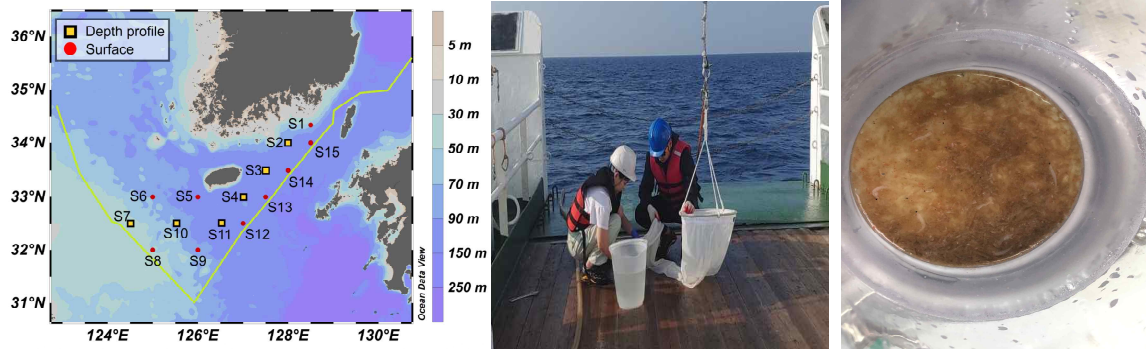


그림9 2022년 남해에서 플랑크톤 시료채취 정점 (노란색) 및 시료채취 현장 및 플랑크톤 시료

○ 콜로이드 상 미량금속/미량원소 분포 및 해양 거동 연구 진행 중

- 또한 2022년 동해와 인도양에서 청정해수채취 기반 미량원소 시료채취를 수행했으며, 이 시료들은 본 연구자의 실험실에서 최근 구축한 콜로이드 상 분리법(Centrifuge 방법, 혹은 연직 유동형 여과(Tangential Filtration Flow, TFF))을 적용하여 산처리 전에 콜로이드 상 분리(<10kDa)를 수행함
- 이 시료는 미량원소/미량금속 및 방사성 원소 금속 (^{210}Po , ^{234}Th)의 현재 분석 중에 있으며, 본 과제 종료 이후에도, 분석 결과의 해석 및 논문 작성을 계속 수행할 예정임. 본 연구 결과를 통해 실제 대양에서 미량원소의 분포 중 어느 정도의 비중이 콜로이드 상으로 분포하고 있는지 국내에서 처음으로 실제 관측 결과를 낼 수 있을 것으로 기대됨

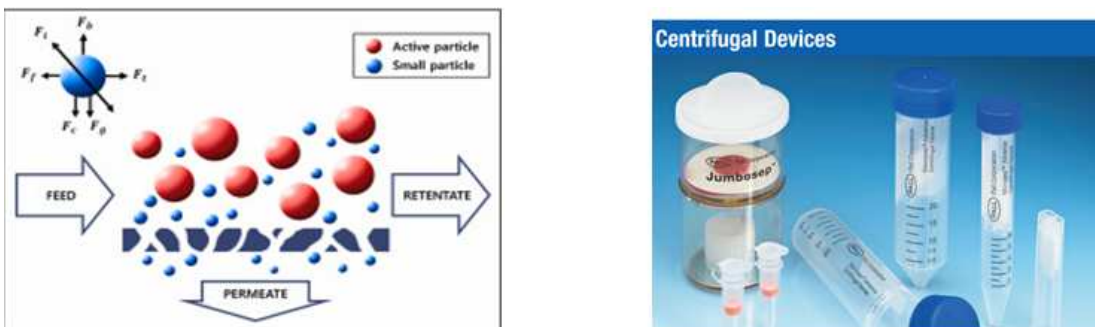


그림10 본 연구에서 테스트 완료 후, 구축 적용한 콜로이드 분리법(대용량 (>5L)시료에 적용하는 연직유동형 여과 (Tangential Filtration Flow, TFF) (왼쪽) 및 소량시료에 적용하는 원심분리형 콜로이드 분리 장비 (오른쪽)

2) 세부 정량적 연구개발성과: [붙임1] 참조

3) 목표 달성 수준

| 추진 목표 | 달성 내용 | 달성도 (%) |
|---|---|---------|
| 현장 관측을 통한 대양 수층 해수 중 청정해수시료 획득 | 이사부호 기반 인도양과 동해에서 (2021-2022 총 4회) 현장 관측을 통한 대양 수층 해수 중 청정해수시료 획득 | 100% |
| 콜로이드, 유기리간드 등 해수 중 미량원소 화학 종조성 실험 분석법 구 | 해수 중 미량원소에서 콜로이드, 입자상 화학 종조성 실험법은 구축 및 국제 공인획득, 유기리간드 중 종조성 실험환경 및 실험 인프라는 현재 구축하였으며, 분석법 관련 상호검증 및 인증은 현재 구축 진행중 | 80% |
| 미량원소 증분화에 따른 정량 분석법 상호검증 통한 국제 분석 인증 확보 | 국제 학술지 논문 게재 및 국제 상호검정 프로그램 참여 (GEOTRACES 분석참여)를 통한 를 통한 인증 확보 | 100% |
| 유기 리간드 결합 형태의 미량원소의 생물 이용가능성 자료해석 및 평가 | 현재 시료 분석을 통한 예비결과 확보 중에 있으며, 콜로이드, 플랑크톤 시료 내 미량원소 분석 결과 획득을 통해 과제 종료 이후에도 연구를 완료할 예정 | 60% |

4) 목표 미달 시 원인 분석(해당 시)

4-1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

| |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - 코로나 확산으로 인한, 2020-2021년 조사 관측 전면 취소-연기로 1,2년차 과제 수행중에 시료채취 기회의 전면취소가 됨, 또한 실험 장비 및 인프라 수급 지연으로 콜로이드-유기리간드에 관련된 실험 인프라 준비가 2년차 이후에야 시작됨 - 코로나 확산으로 지체된 연구로 1년 수개월만에 실험방법 구축에 매진하였으나, 해양조사 관측 시료의 분석을 통한 연구결과 발표는 지연됨 |
|--|

4-2) 자체 보완활동

| |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - 2020-2021년 1,2년차 조사 관측이 취소된 관계로, 실험방법 구축 및 관련 배경이론, 조사 획득을 위한 논문 등 기존 문헌 검토를 통한 연구 주제 확립, 실험방법 확립에 집중하였고, 신진과제의 취지에 맞게, 신규 도입된 분석장비와 화학 분석법의 정립과 구축에 더 힘씀. 그 결과 해수 중 미량원소의 국제 분석 공인인증을 획득하는 성과 거둠 - 코로나 확산으로 인한 분석장비 및 시료채취 조사 기회의 전면 취소로, 대신 본 연구와 연관성이 있는 입자상 시료 (대기시료 및 대양 해수 중 여과된 입자상 시료) 의 분석을 통한 국내 최초 입자상 미량원소 거동 및, 대기기원 미량원소 생물가용성 연구 수행 |
|---|

4-3) 연구개발 과정의 성실성

| |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - 연구 기간 내 총 4편의 논문 게재, 연구 과제와 관련한 2편의 총설(Review) 논문 포함, 본 연구과제를수행하며 얻은 대양자료의 분석 및 해석 know-how를 적용한 SCIE급 2편, 국내 1편 대양 관측 연구 결과 논문 게재 성과를 거둠 - 코로나로 인해 대양조사관측이 2년간 취소-연기되었지만, 해양미량원소 유입 관련 입자 (대기분진시료, 입자상 여과시료)를 대신 취득하여 분석하고, 본 연구주제와 관련한 종조성/생물가용성 관련 연구를 진행하여 결과를 얻었고, 논문화가 진행 중임 - 1,2년차 조사관측연기로 인해, 2년차 후반부터 약 1년간 총 4차례의 관측에 모두 참여하여, 과제 기간 종료이후에도 성과 생산을 위해 분석법 구축 및 현재 시료 분석 중에 있으며, 2023년 2월 종료 과제이지만, 금년 내 3편의 국제학술지 논문 투고를 본 과제의 성과로 지속할 예정임. |
|--|

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도(연구개발결과의 중요성)

○ 본 연구 결과는, 다양한 형태의 물리적/화학적 종조성을 가진 미량원소가 생물 이용성에 미치는 영향 (증가 혹은 감소)을 국내외에서 처음으로 규명하는 연구 시도로서, 본 신진연구 과제 수행을 통해, 다양한 미량원소의 화학 종 조성(콜로이드 및 유기결합 등)에 따른 해수 중 분포 특성을 정성/정량적으로 분석하는 분석 환경 및 최신 분석장비, 인프라를(유동 주입 분석장비, 전기전압 분석 장비 등)을 국내 최초로 구축하고, 해수 미량원소 정밀 분석법 개발 및 정립을 하는 시도를 하였음

○따라서, 신진 연구의 취지에 따라 기존에 해양에서 분포, 일부 거동 특성만을 밝혀낸 미량원소 연구 범위를 확장하고, 후속 연구를 통해 해양의 물질수지 및 물질순환 재평가를 위한 새로운 국제최고 수준의 연구수행을 시도하기 위한 기반을 갖추

○ 이사부호 청정 해수채취를 통해 국제 미량원소 공동연구프로그램인 GEOTRACES의 연구 성과 기여를 통한 국제사회 기여 및 한국의 대양 관측 연구 역량 강화 의의

○ 국내 최초로 도입되어 전세계에서 3대만 보유 중인 이사부호 장착 청정해수채취시료 장비(PRISTIN Ultra Clean CTD) 및 본 연구원 최신 도입 분석장비 (Cyclic Voltammetry, 해수 전처리 자동화 질량분석기 SeaFAST ICP-MS 등) 적극 활용 및 국제수준의 대량 미량원소 연구 역량 제고 기대됨

5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

○ 대기 기원 미량금속 생물가용성 연구 및 용해성 납생물 해양상층 거동 및 용해도 연구는 상반기 금년 상반기 내 논문을 투고하여 과제 종료 이후에도 성과 생산 지속

○콜로이드 상 및 생물 내 미량금속 분석 결과는, 상반기 내 자료 획득 및 결과 해석을 완료하여 금년 내 논문 투고 계획 - 과제 종료 이후에도 성과 생산 지속

○ 본 연구개발을 통해 구축된 미량원소 화학 종조성별 분석법 및 분석 인프라를 향후 적극 활용하여, 후속과제 개발을 통해 미량원소 연구 범위를 확장하고, 해양의 물질수지 및 물질순환 재평가를 위한 새로운 국제최고 수준의 연구수행을 시도 예정

6. 자체점검표

| 구분 | 아주 우수 | 우수 | 보통 | 미흡 | 불량 | 비고 |
|------------------|---|----|----|----|----|----|
| 연구성과의 우수성/창의성 | | | √ | | | |
| 연구성과의 파급 효과 | | √ | | | | |
| 연구성과에 대한 활용 가능성 | | | √ | | | |
| 연구수행의 성실도 | | √ | | | | |
| 연구성과에 대한 종합의견 기술 | 본 연구과제는 국내에서 처음 시도되는 대양 화학 종조성에 따른 미량원소 연구였지만, 1,2년차 잇다른 조사관측 취소로 인한 현장 관측 시료-분석결과를 얻는데 다소 일정이 늦춰서 모든 연구 목표를 달성하지 못한 아쉬움은 있지만, 신진연구과제의 목표에 따라 본 연구개발을 통해 구축된 미량원소 화학 종조성별 분석법 및 분석 인프라를 향후 적극 활용하여, 세계최고 수준의 관련 연구과제를 발굴 할 수 있는 기반을 갖추는데 큰 의의가 있다고 평가됩니다. | | | | | |

7. 참고문헌

1. Buck, K. N., Moffett, J., Barbeau, K. A., Bundy, R. M., Kondo, Y., & Wu, J. (2012). The organic complexation of iron and copper: an intercomparison of competitive ligand exchange-adsorptive cathodic stripping voltammetry (CLE-ACSV) techniques. *Limnology and Oceanography: Methods*, 10(7), 496–515.
2. Buck, K. N., Sohst, B., & Sedwick, P. N. (2015). The organic complexation of dissolved iron along the US GEOTRACES (GA03) North Atlantic Section. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 116, 152–165.
3. Buck, K. N., Lohan, M. C., Sander, S. G., Hassler, C., & Pižeta, I. (2017). Organic Ligands—A Key Control on Trace Metal Biogeochemistry in the Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 4, 313.
4. Buck, K. N., Sedwick, P. N., Sohst, B., & Carlson, C. A. (2018). Organic complexation of iron in the eastern tropical South Pacific: results from US GEOTRACES Eastern Pacific Zonal Transect (GEOTRACES cruise GP16). *Marine Chemistry*, 201, 229–241.
5. Echeveste, P., Croot, P., & von Dassow, P. (2018). Differences in the sensitivity to Cu and ligand production of coastal vs offshore strains of *Emiliania huxleyi*. *Science of the total environment*, 625, 1673–1680.
6. Gerringa, L. J. A., Rijkenberg, M. J., Schoemann, V., Laan, P., & De Baar, H. J. (2015). Organic complexation of iron in the West Atlantic Ocean. *Marine chemistry*, 177, 434–446.
7. Kim, I., Kim, S., & Kim, G. (2010). Analytical artifacts associated with the chelating resin extraction of dissolved rare earth elements in natural water samples. *Aquatic geochemistry*, 16(4), 611–620.
8. Kim, I., & Kim, G. (2011). Large fluxes of rare earth elements through submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island, Jeju, Korea. *Marine Chemistry*, 127(1–4), 12–19.
9. Kim, I., & Kim, G. (2014). Submarine groundwater discharge as a main source of rare earth elements in coastal waters. *Marine Chemistry*, 160, 11–17.
10. Kim, I., Kim, G., & Choy, E. J. (2015). The significant inputs of trace elements and rare earth elements from melting glaciers in Antarctic coastal waters. *Polar Research*, 34(1), 24289.
11. Kim, I., & Kim, G. (2015). Role of colloids in the discharge of trace elements and rare earth elements from coastal groundwater to the ocean. *Marine Chemistry*, 176, 126–132.
12. Kim, S. H., Ra, K., Kim, K. T., Jeong, H., Lee, J., Kang, D. J., ... & Kim, I. (2019). R/V Isabu-Based First Ultraclean Seawater Sampling for Ocean Trace Elements in Korea. *Ocean Science Journal*, 1–12.
13. Seo, H., Kim, G., Kim, Y. I., & Kim, I. (2021). Tracing the atmospheric input of seawater-dissolvable Pb based on the budget of ²¹⁰Pb in the East Sea (Japan Sea). *Frontiers in Marine Science*, 8, 756076.
14. Kim, I. (2021). Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs. *Ocean and Polar Research*, 43(4), 335–352.

[붙임1] 세부 정량적 연구개발성과

| | | | | | |
|------|------------------|-------|--------------------------------------|------|-----------|
| 사업명 | 우수신진연구 | 연구책임자 | 김인태 | 주관기관 | 한국해양과학기술원 |
| 과제번호 | 2020R1C1C1006392 | 과제명 | 화학 중조성 특성에 따른 대양 미량원소의 생지화학 거동 규명 연구 | | |

과학기술/학술적 연구성과(단위 : 건)

| 전문학술지 논문게재 | | | | 초청 강연 실적 | 학술대회 논문발표 | | 지식재산권 | | | | 수상 실적 | 출판실적 | | 표준 | |
|------------|------|------|------|----------------|--------------|----|-------|----|----|----|----------|------|-----|----|----|
| 국내논문 | | 국외논문 | | | 국내 | 국제 | 출원 | | 등록 | | | 저역서 | 보고서 | 국내 | 국제 |
| SCI | 비SCI | SCI | 비SCI | | | | 국내 | 국외 | 국내 | 국외 | | | | | |
| 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

전문학술지 논문게재 성과정보

| 과제번호 | 게재연월 | 논문제목 | 총저자명 | 출처 | 학술지명 | 권(호) | 학술지구분 | sci 여부 | impact Factor | 국제공동 연구논문 | 기여도 |
|------------------|--------|---|---|------|---|-------|-------|--------|---------------|-----------|-----|
| 2020R1C1C1006392 | 202101 | First High-Frequency Underway Observation of DMS Distribution in the Southern Ocean during Austral Autumn | Kim, Intae; Zhang, Miming; Kim, Kitae; Park, Keyhong; | 직접입력 | ATMOSPHERE | () | 국외 | SCI등재 | 2.686 | 예 | 70 |
| 2020R1C1C1006392 | 202210 | Distributions of Radiocesium and Plutonium in the Korean Seas and North Pacific after the Fukushima Accident, 2011-2014 | Lee, Jaeun; Kim, Suk Hyun; Lee, Huisu; Lee, Hyunmi; Kim, Intae; | SCI | JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING | (0) | 국외 | SCI등재 | 2.744 | 아니오 | 90 |
| 2020R1C1C1006392 | 202109 | Anthropogenic Gadolinium (Gd) Inputs into the Ocean: Review and Future Direction | | 직접입력 | Ocean and Polar Research | 43(3) | 국내 | SCI미등재 | | 아니오 | 100 |
| 2020R1C1C1006392 | 202112 | Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs | | 직접입력 | Ocean and Polar Research | 43(4) | 국내 | SCI미등재 | | 아니오 | 100 |

[붙임2-1] 연구책임자(해당 시 참여연구자(공동) 포함) 대표적 연구실적

○ 논문 및 특허 실적

| 번호 | 구분 (논문/특허) | 논문명/특허명 | 소속기관명 | 역할 | 논문게재지/ 특허등록국가 | 논문게재일 /특허등록일 | 특기사항 (I.F. 등) |
|----|---------------|---|-----------|--------------|---|-----------------|---------------------|
| 1 | 논문 | Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs | 한국해양과학기술원 | 제1저자 교신저자 | Ocean and Polar Research | 2021.12 | |
| 2 | 논문 | Anthropogenic Gadolinium (Gd) Inputs into the Ocean: Review and Future Direction | 한국해양과학기술원 | 제1저자 교신저자 | Ocean and Polar Research | 2021.09 | |
| 3 | 논문 | Distributions of Radiocesium and Plutonium in the Korean Seas and North Pacific after the Fukushima Accident, 2011-2014 | 한국해양과학기술원 | 교신저자 | JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING | 2022.10 | Impact Factor 2.744 |
| 4 | 논문 | First High-Frequency Underway Observation of DMS Distribution in the Southern Ocean during Austral Autumn | 한국해양과학기술원 | 제1저자 | ATMOSPHERE | 2021.01 | Impact Factor 2.686 |
| 5 | | | | | | | |

○ 기타 실적(논문 및 특허 외 기타 실적 입력)

[붙임2-2] 주관연구책임자(해당 시 참여연구자(공동) 포함) 대표적 논문·특허실적 요약문

| | | | | |
|--|----------------|---|---------------------------|---------|
| 연구실적 유형 | | 논문(○) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(김인태) | | |
| 논문/특허명 | | Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs | | |
| 논문실적정보 <input type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | Ocean and Polar Research | | |
| | SCI 등재 여부 | | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 0회 |
| | ISSN | 2234-7313 | 게재년월 | 2021.12 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 제1 및 교신 | 참여자수 | 1명 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요 약 문 | | | | |
| <p>▣ 초록(abstract)</p> <p>Trace elements in the ocean have been known as essential micronutrients for the primary production of phytoplankton and the growth of marine organisms. The GEOTRACES program beginning in the mid-2000 provided a new understanding of the distribution, origin and behavior of trace elements in the ocean, together with the establishment of both clean seawater sampling and trace element analysis techniques. The Indian Ocean, one of the major oceans, is relatively the least explored area, despite playing an important role in global climate variability. Although trace element observations have recently been conducted in the Indian Ocean by Japanese-and Indian scientists, relatively not much study has been done compared to the Atlantic, Pacific and Polar Regions. Recently, together with the launch of R/V Isabu, a 5,000-ton grade large- and comprehensive research vessel, the observations of trace elements has been conducted in the Indian Ocean for the first time in Korea since 2018. In this paper, we introduce the key results of currently conducted GEOTRACES expedition in the Indian Ocean to present future trace element research directions in the Indian Ocean, and also reviewed the preliminary results in the Indian Ocean studies from Korea. In the 2020s, new Indian Ocean GEOTRACES projects are planned around European countries, and it is time for Korea to prepare for the next phase of the trace element study in the Indian Ocean in line with these international trends.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| <p>대양 미량원소의 화학적 종조성의 중요성, 최근 연구 결과 및 필요성, 관련 최근 지식의 논의 에 대해 discussion하고 총설함</p> | | <p>전공 전문 지식에 대한 이해와 중요성에 대한 강조로 관련 연구자들의 관심이 늘어날 것으로 기대됨</p> | | |

| | | | | |
|---|----------------|--|---------------------------|---------|
| 연구실적 유형 | | 논문(○) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(김인태) | | |
| 논문/특허명 | | Anthropogenic Gadolinium (Gd) Inputs into the Ocean: Review and Future Direction | | |
| 논문실적정보 <input type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | Ocean and Polar Research | | |
| | SCI 등재 여부 | | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 0회 |
| | ISSN | 2234-7313 | 게재년월 | 2021.09 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 제1 및 교신 | 참여자수 | 1명 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요 약 문 | | | | |
| <p>▣ 초록(abstract)</p> <p>Gadolinium (Gd), one of a rare earth element (REE), has been widely used worldwide since the 1980s, as a resource material for contrast agents injected into examiners of magnetic resonance imaging (MRI) test. The organic complexed form of Gd shows an extremely stable behavior in natural environment (water), so is known that the artificial Gd from medical uses is not removed from the waste water treatment plant (WWTP) and eventually introduced into the ocean through the estuary. Since the 1990s, some previous studies have often been conducted on Gd anomalies in natural water and their effects an artificial origin from land or metropolitan areas, but little research has been potential impacts on the ocean water. In this paper, we review and introduce recent studies related to Gd anomaly in natural water and related marine effects, and also propose the future research directions.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| 유기 착화물리간드화 형성된 미량원소/금속에 대한 연구 중에, 인위적기원에 의해 유기착화되어 해양에서 긴 체류시간을 지니는 신규오염물질-희토류원소에 대해 심화 연구하게 됨. | | 전공 전문 지식에 대한 이해와 중요성에 대한 강조로 관련 연구자들의 관심이 늘어날 것으로 기대됨 | | |

| | | | | |
|---|----------------|---|---------------------------|---------|
| 연구실적 유형 | | 논문(○) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(김인태) | | |
| 논문/특허명 | | Distributions of Radiocesium and Plutonium in the Korean Seas and North Pacific after the Fukushima Accident, 2011-2014 | | |
| 논문실적정보 <input type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 2.744 |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 1회 |
| | ISSN | 2077-1312 | 게재년월 | 2022.10 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 교신저자 | 참여자수 | 5명 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요 약 문 | | | | |
| <p>▣ 초록(abstract)</p> <p>The distributions of artificial radionuclides, radiocesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) and plutonium isotopes (^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$), in the surface water around the Korean seas (East/Japan Sea and Yellow Sea) in 2011-2012 and in three sections in the North Pacific between 2011 and 2014 were examined. The ^{137}Cs activities in the surface water in the Korean seas in 2011 (immediately after the Fukushima nuclear power plant (NPP) accident on 17 March 2011) were comparable or not significantly different relative to those in 2010 and 2012. However, ^{134}Cs, which had been not detected in the study area before the Fukushima accident (under the detection limit of 0.1 mBq kg^{-1} level), were detected rapidly in 2011 after the accident (in about 60% of the 72 samples) and gradually disappeared due to their short half-life ($t_{1/2} = 2.06$ years) in 2012 (detected in about 16% of the 24 samples). In addition, the highest activities of radiocesium and Pu isotopes appeared locally in some stations of the Korean Strait region (located between Korea and Japan) within 1-2 months immediately after the accident. This suggests that the radioactive nuclides released immediately after the Fukushima accident were significantly introduced through the atmosphere, based on recent studies conducted in neighboring areas. We also showed that the spatial distribution of radiocesium in the North Pacific moved eastward from 2012 to 2014, and we attempted to quantify the residence time of radiocesium (^{137}Cs) in the Korean seas based on the long-term (tens of years scale) temporal trends of ^{137}Cs activity data, which have been collected since the 1960s and 1970s. The estimated retention time of ^{137}Cs in the East/Japan Sea and Yellow Sea were 25 ± 0.6 and 8.0 ± 0.1 years, respectively. These results are expected to be used as a preliminary study for a potential future event of a marine radioactive accident (which, of course, cannot be predicted) and as basic data for predicting the influences of radionuclide releases in the ocean.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| <p>동해 대기 기원 미량금속의 화학 조성별 유입원에 대한 연구를 진행하는 중, GEOTRACES의 핵심 연구테마 중 하나인 인공방사능 금속원소(플루토늄, 세슘)의 화학종조성 및 생물가용성에 대한 연구를 진행하게 되어 얻어진 연구부산물</p> | | <p>전공 전문 지식에 대한 이해와 중요성에 대한 강조로 관련 연구자들의 관심이 늘어날 것으로 기대됨</p> | | |

| | | | | |
|---|----------------|---|---------------------------|---------|
| 연구실적 유형 | | 논문(○) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(김인태) | | |
| 논문/특허명 | | First High-Frequency Underway Observation of DMS Distribution in the Southern Ocean during Austral Autumn | | |
| 논문실적정보 <input type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | Atmosphere | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 2.686 |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 4회 |
| | ISSN | 2073-4433 | 게재년월 | 2021.01 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 제1 저자 | 참여자수 | 4명 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요약문 | | | | |
| <p>▣ 초록(abstract)</p> <p>We investigate the distribution of dimethyl sulfide (DMS) in the Southern Ocean's (50 W to 170 W) surface water, including the Antarctic Peninsula and the marginal sea ice zone (MIZ) in the Ross and Amundsen Seas. This is the first high-frequency observation conducted in the austral autumn (in April) in the Southern Ocean. The mean DMS concentration was 2.7 ± 2.5 nM (1) for the entire study area. Noticeably enhanced DMS (5 to 28 nM) concentrations were observed in the MIZ around the Ross and Amundsen Seas and the coastal regions in the Antarctic Peninsula; this could be attributed to biological production of local ice algae, which appears to be supplied with nutrients from glacial or sea ice melt water. These observed DMS inventories were significantly higher (an order of magnitude) than current climatological DMS inventories. The local DMS sources being transported outward from the polynyas, where strong bloom occurs during summer, could result in larger discrepancies between observed DMS and climatological DMS in the MIZ area (in the Amundsen Sea). Overall, this study is the first to highlight the significance of the underestimation of current DMS fluxes in the austral autumn, which consequently results in significant errors in the climate models.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| <p>대양 미량원소의 분석자료의 처리 및 해석방법 know-how를 통해 적용한 대양 미량기체의 분포 및 식원, 거동에 대한 연구 부산물</p> | | <p>전공 전문 지식에 대한 이해와 중요성에 대한 강조로 관련 연구자들의 관심이 늘어날 것으로 기대됨</p> | | |

< 대표적 연구 실적 사본 >

1. Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs

| | | |
|---|--------------------------|---------------|
| Vol. 43(4):335-352 http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2021.43.4.335 | Ocean and Polar Research | December 2021 |
|---|--------------------------|---------------|

Review

인도양에서 미량원소 연구 동향 및 향후 연구 방향

김인태*

한국해양과학기술원 해양환경연구센터
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385

Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs

Intae Kim*

Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology,
Busan 49111, Korea

Abstract : Trace elements in the ocean have been known as essential micronutrients for the primary production of phytoplankton and the growth of marine organisms. The GEOTRACES program beginning in the mid-2000 provided a new understanding of the distribution, origin and behavior of trace elements in the ocean, together

Trace Element in the Indian Ocean: Current Research Trends and Future Needs

349

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요 연구사업(PE99912)과 한국연구재단의 신진연구(PN90300)의 연구비 지원으로 작성되었습니다. 논문 작성에 도움을 준 이희수와 이재은, 두 연구원에게 감사의 인사를 전합니다. 그리고 논문을 세심하게 심사해 주신 두 분의 심사위원과 편집위원께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

Anderson RF (2020) GEOTRACES: accelerating research on the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. *Annu Rev Mar Sci* **12**:49-85
Anderson RF, Mawji E, Cutter GA, Measures CI, Jeandel C (2014) GEOTRACES: changing the way we explore ocean chemistry. *Oceanography* **27**(1):50-61
Bishop JK, Wood TJ (2008) Particulate matter chemistry and dynamics in the twilight zone at VERTIGO ALOHA and K2 sites. *Deep-Sea Res Pt I* **55**(12):1684-1706
Bridgman EA, Salter F, Edmond JM (1976) On the marine

(2020) Electrochemical evaluation of iron-binding ligands along the Australian GEOTRACES southwestern Pacific section (GP13). *Mar Chem* **219**:103736. doi:10.1016/j.marchem.2019.103736
Chen X, Seo H, Han H, Seo J, Kim T, Kim G (2021) Conservative behavior of terrestrial trace elements associated with humic substances in the coastal ocean. *Geochim Cosmochim Acta* **308**:373-383. doi:10.1016/j.gca.2021.05.020
Chester R, Berry AS, Murphy KJT (1991) The distributions of particulate atmospheric trace metals and mineral aerosols over the Indian Ocean. *Mar Chem* **34**(3-4):261-290
Chinni V, Singh SK, Bhushan R, Rengarajan R, Sama VVSS (2019) Spatial variability in dissolved iron concentrations in the marginal and open waters of the Indian Ocean. *Mar Chem* **208**:11-28
Chung Y (1987) ²²⁹Ra in the western Indian Ocean. *Earth Planet Sci Lett* **85**(1-3):11-27
Chung Y, Finkel R (1988) ²¹⁰Po in the western Indian Ocean: distributions, disequilibria and partitioning between the dissolved and particulate phases. *Earth Planet Sc Lett* **92**:1-11

< 대표적 연구 실적 사본 >

2. Anthropogenic Gadolinium (Gd) Inputs into the Ocean: Review and Future Direction

| | | |
|---|--------------------------|----------------|
| Vol. 43(3):165-178 http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2021.43.3.165 | Ocean and Polar Research | September 2021 |
|---|--------------------------|----------------|

Review

인위적 기원 가돌리늄(gadolinium)의 해양 유입 연구 동향 및 향후 연구 방향

김인태*

한국해양과학기술원 해양환경연구센터
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385

Anthropogenic Gadolinium (Gd) Inputs into the Ocean:
Review and Future Direction

Intae Kim*

Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology,
Busan 49111, Korea

Abstract : Gadolinium (Gd), one of a rare earth element (REE), has been widely used worldwide since the 1980s, as a resource material for contrast agents injected into examiners of magnetic resonance imaging (MRI) test. The organic complexed form of Gd shows an extremely stable behavior in natural environment (water), ...

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요 연구사업(PE99912)과 한국연구재단의 신진연구(PN90300)의 연구비 지원으로 작성되었습니다.

참고문헌

Alibo DS, Nozaki Y (1999) Rare earth elements in seawater: particle association, shale-normalization, and Ce oxidation. *Geochim Cosmochim Acta* **63**:363-372

Alibo DS, Nozaki Y (2000) Dissolved rare earth elements in the South China Sea: geochemical characterization of the water masses. *J Geophys Res-Oceans* **105**:28771-28783

Alibo DS, Nozaki Y (2004) Dissolved rare earth elements in the eastern Indian Ocean: chemical tracers of the water masses. *Deep-Sea Res Pt I* **51**:559-576

Bau M, Dulski P (1996) Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. *Earth Planet Sci Lett* **143**:245-255

subterranean estuary in Florida, USA. *Mar Chem* **176**:34-50

de Campos FF, Enzweiler J (2016) Anthropogenic gadolinium anomalies and rare earth elements in the water of Atibaia River and Anhumas Creek, Southeast Brazil. *Environ Monit Assess* **188**:281. doi:10.1007/s10661-016-5282-7

Ebrahimi P, Barbieri M (2019) Gadolinium as an emerging microcontaminant in water resources: threats and opportunities. *Geosci* **9**:93. doi:10.3390/geosciences9020093

Elderfield H, Greaves MJ (1982) The rare earth elements in seawater. *Nature* **296**:214-219

Goldberg ED, Koide M, Schmitt RA, Smith RH (1963) Rare-Earth distributions in the marine environment. *J Geophys Res* **68**:4209-4217

Hasdenteufel F, Luyasu S, Renaudin JM, Paquay JL, Carbutti G, Beaudouin E, Moneret-Vautrin DA, Kanny G (2008) Anaphylactic shock after first exposure to gadoterate meglumine: two case reports documented by positive allergy assessment. *J Allergy Clin Immunol* **121**:527-528

Hajek V, Bruland KW, Flegal AR (2014) Determination of rare earth elements after pre-concentration using NOBIAS-chelate PA-1® resin: method development and application in the San Francisco Bay plume. *Mar Chem* **160**:34-41

Article

Distributions of Radiocesium and Plutonium in the Korean Seas and North Pacific after the Fukushima Accident, 2011–2014

Jaeun Lee ^{1,2}, Suk Hyun Kim ², Huisu Lee ^{1,2}, Hyunmi Lee ² and Intae Kim ^{1,2,*} 

¹ Department of Ocean Science, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Korea

² Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

* Correspondence: ikim@kiost.ac.kr

Highlights:

What are the main findings?

- The first radiocesium and Pu isotopes data in Korean seas were present in 2011–2012;
- Higher ¹³⁴Cs were observed in Korean seas immediately after the Fukushima accident;
- Fukushima-derived nuclides were introduced to Korean seas by the atmosphere for up to 2 months.

What is the implication of the main finding?

- The residence times of ¹³⁷Cs in Korean seas water is estimated to be 8–25 years;
- The dataset could be used to predict the dispersion of anthropogenic pollutant;
- The dataset could also be used to validate the model for future NPP accident around the Korean seas.



Citation: Lee, J.; Kim, S.H.; Lee, H.;

Abstract: The distributions of artificial radionuclides, radiocesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) and plutonium isotopes (²³⁸Pu and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu), in the surface water around the Korean seas (East/Japan Sea and Yellow Sea) in 2011–2012 and in these regions in the North Pacific between 2011 and 2014 were

on 1 September 2022)). Furthermore, the dataset could be used to study the dispersion of anthropogenic pollutants in areas close to NPPs [61,62] in the future, and also for the validation of the models (e.g., dispersion and ecosystem). To predict and evaluate the potential influences of radionuclide releases into the ocean more accurately, more extensive studies are necessary, including: (i) the continuous monitoring of radionuclides in the marginal seas around the far eastern Asian region, especially where the major NPPs are concentrated; (ii) the quantitative inventory of the current radionuclide level including the deeper water column (based on activity data along with depth) in this region; (iii) the advancement of marine transport models of radionuclides based on the radionuclide inventory; and (iv) rapid detection technology for extremely low levels of radioactive nuclides in marine samples that require large amounts of sample volume, such as ~100 L of seawater from marine samples.

Author Contributions: J.L. and I.K. post-processed the data sets. H.L. (Huisu Lee) contributed significantly to the discussion. S.H.K. and H.L. (Hyunmi Lee) designed the research and conducted the field campaign. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was mainly funded by the KIOST project (PEA0012). IK is supported by the National Research Foundation (NRF) of South Korea (PN91050).

Acknowledgments: We thank the all the crew members of R/V Onnuri, R/V Ieodo (of KIOST) and IBR/V Araon (of KOPRI) who helped with field sampling on the ships. All datasets used in this paper are available upon request from the corresponding author (ikim@kiost.ac.kr).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

< 대표적 연구 실적 사본 >

4. First High-Frequency Underway Observation of DMS Distribution in the Southern Ocean during Austral Autumn



Article

First High-Frequency Underway Observation of DMS Distribution in the Southern Ocean during Austral Autumn

Intae Kim ¹, Miming Zhang ², Kitae Kim ³ and Keyhong Park ^{3,*}

¹ Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Busan 49111, Korea; ikim@kiost.ac.kr

² Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, Xiamen 361005, China; zhangmiming@tio.org.cn

³ Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon 21990, Korea; ktkim@kopri.re.kr

* Correspondence: keyhongpark@kopri.re.kr

Abstract: We investigate the distribution of dimethyl sulfide (DMS) in the Southern Ocean's (50° W to 170° W) surface water, including the Antarctic Peninsula and the marginal sea ice zone (MIZ) in the Ross and Amundsen Seas. This is the first high-frequency observation conducted in the austral autumn (in April) in the Southern Ocean. The mean DMS concentration was 2.7 ± 2.5 nM (1 σ) for the entire study area. Noticeably enhanced DMS (5 to 28 nM) concentrations were observed in the MIZ around the Ross and Amundsen Seas and the coastal regions in the Antarctic Peninsula; this could be attributed to biological production of local ice algae, which appears to be supplied with nutrients from glacial or sea ice melt water. These observed DMS inventories were significantly higher (an order of magnitude) than current climatological DMS inventories. The local DMS sources being transported outward from the polynyas, where strong bloom occurs during summer, could result in larger discrepancies between observed DMS and climatological DMS in the MIZ area (in the Amundsen Sea). Overall, this study is the first to highlight the significance of the underestimation of current DMS fluxes in the austral autumn, which consequently results in significant errors in the

check for updates

in seasons other than summer are imperative in order to calibrate the current climatological DMS inventories, which are significantly underestimated. Furthermore, more extensive studies on the sources of atmospheric sulfur compounds are necessary in order to improve the accuracy of future climate forecasts.

Supplementary Materials: The following are available online at <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/1/122/s1>, Figure S1: Massive sea ice algae colonies encountered in the Antarctic Peninsula sea ice zone and the raw data file.

Author Contributions: I.K. and K.P. conducted post-processing of data sets and flux calculations. M.Z. significantly contributed to discussion. K.P. and K.K. designed the research and conducted the field campaign. All authors were actively involved in writing and revising the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Korea Polar Research Institute (PE21110 and PE21120) and also supported by the international cooperation program managed by the National Research Foundation of South Korea (NRF-2019K2A9A2A06025329). I.K. is supported by grants from the "KIOST Indian Ocean Study" (PE99912) and National Research Foundation of Korea (PN68460). M.Z. is supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (4207060283 and 41911540471).

Acknowledgments: We thank the captain and all the crewmembers of the icebreaker IBR/V *Araon*, who helped with onboard sampling during the ANA08D cruise. We also thank Jung-Ok Choi, who helped with the processing of the dataset. All datasets used in this paper are available upon request from the corresponding author (keyhongpark@kopri.re.kr).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.