

BSPE99674-11942-4

방사성 추적자를 이용한 인도양 수층 내 입자성  
미량원소의 침강 거동 연구

Study on the cycles of particulate trace elements in the  
Indian Ocean water column using radioactive tracer

2019.02.22

한 국 해 양 과 학 기 술 원

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “방사성 추적자를 이용한 인도양 수층 내 입자성 미량원소의 침강 거동 연구 에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 2. 22

총괄연구책임자 : 김 인 태

## 보고서 초록

과제고유 번호	E99674	해당단계 연구기간	2018.04.01. - 2018.12.31	단계 구분	종료
연구사업명	중사업명	창의사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	신진연구자지원			
	세부과제명	방사성 추적자를 이용한 인도양 상층 내 입자성 미량원소의 침강 거동 연구			
연구책임자	김인태	해당단계 참여연구원수	총 : 1명 내부: 1명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 1명 내부: 1명 외부: 0명	총 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	40
<p>- 국내 최초로 대양 (인도양) 미량원소 청정 해수 채취와 선상 방사성동위원소(Th-234) 측정 수행</p> <p>- 국제 표준 프로토콜을 도입, 해수 중 입자상 미량원소의 시료채취, 전처리, 및 분석 수행</p> <p>- 국내 최초로 입자상 미량원소의 대양(인도양)에서 수직-수평 분포도 작성</p> <p>- 방사성 동위원소 Th-234 이용하여 인도양 상층에서 입자 물질의 침강 속도 계산</p> <p>- 방사성 동위원소 Th-234 이용하여 세계 최초로 입자상 미량원소의 인도양 상층 침강 속도 규명</p> <p>- 인도양 상층(&lt;500미터)에서 주요 입자상 미량원소의 심층으로의 export flux는 약 Al: 20.4(±24.0) umol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Fe: 8.8(±10.4) umol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Mn: 154(±181) nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Co: 11.0(±12.9) nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Cu: 129(±152) nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Zn: 7.30(±8.60) umol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Cd: 6.39(±7.53)nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Ni: 116(±137)nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, V: 50.5(±59.5) nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Pb: 113(±133)nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 로 산정됨</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	미량원소, 입자성 미량원소, 침강, 추적자, 방사성 동위원소, 인도양			
	영 어	Trace element, Particulate, Scavenging, Radioactive nuclide, tracer, Indian Ocean			

# 요 약 문

## I. 제 목

방사성 추적자를 이용한 인도양 수층 내 미량원소의 침강 거동 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### II. 1 연구개발의 목적

- 방사성 추적자 현장 관측을 통한 인도양 수층 내 입자 침강 속도 연구
  - 이사부호 활용 인도양 주요사업 관측 연계
  - $^{234}\text{Th}$  방사능 추적자 현장 선상 분석
- 극미량원소 분석기술 경험 축적 및 선진국 수준 연구능력 확보
  - 입자성 미량원소 청정 분석법 구축
  - 국제 상호검정 통해 청정도 및 분석기술 신빙성 확보
- 방사능 추적자 이용한 입자성 미량원소의 수층 내 침강 및 순환 연구
  - $^{234}\text{Th}$  자료 해석 통해 입자 침강 및 체류시간 산정
  - $^{234}\text{Th}$  추적자와 결합하여 입자성 미량원소 거동 규명

### II. 2 연구개발의 필요성

#### 1. 연구의 중요성

- 미량 원소(Trace Elements; Fe, Zn, Cu, Mn, Al, Ni, Co, Pb 등)는 해양 일차 생산의 필수적인 미세 영양염으로 전 지구적인 해양 탄소순환, 기후변화, 해양생태계 변화 및 환경 오염과 밀접하게 연관
  - 국제 미량원소 및 동위원소 관련 국제 공동 연구 프로그램인 GEOTRACES의 최근 연구 결과에 따르면 입자성 미량원소(Particulate trace elements)의 거동 및 해양에서의 역할 역할이 강조되고 있음
    - 입자성 미량원소는 대양 수층 내에서 입자 물질의 침강 및 유기 탄소 거동(생물학적인 탄소 펌프)을 조절하는 핵심 인자임에도 국내에서는 해양 미량원소 청정 해수시료 채취 인프라의 부재로 관련 연구가 전혀 이루어지지 않음
    - 과거 미량원소 연구는 용존 미량원소에 치중하여 입자상 미량원소 자료 획득은 전지구적으로도 많은 연구 결과가 발표되지 않음
    - 입자성 물질의 거동을 밝혀내기 위해서는 방사성 동위원소 추적자와의 결합이 필수적임에도, 국제적으로도 이와 같은 시도는 거의 이루어지지 않음

- 인도양은 국제적으로도 미량 원소 관련 연구가 가장 적게 수행된 지역(전 세계적으로 미량원소 자료중 0.5%의 자료만이 보고됨)으로 적도 및 남반구의 남인도양에서의 입자성 미량 원소 자료는 현재 전무한 실정임
- 최첨단 청정해수채취 시스템을 갖춘 대형 종합 연구선 이사부호 취항과, 청정 실험 환경 및 설비가 갖춰진 부산 신청사 이전으로, 한국의 해양 극미량 원소 연구시대가 개막, 최근 구축된 최첨단 연구 인프라의 적극 활용 필요성

## 2. 상위 목표(해양과기원 임무 및 국가적 아젠다)와의 연계성

- 본 연구는 ‘해양과학기술의 창의적 원천기초연구, 응용 및 실용화 연구와 해양분야 우수 전문인력의 교육·훈련을 통하여 국내·외적으로 해양과학기술의 연구개발을 선도하고 그 성과를 확산’한다는 해양과기원 정관상 설립 목적에 부합하며, ‘해양과학기술 및 해양산업 발전에 필요한 원천연구, 응용 및 실용화연구’ 등의 고유 임무에 부합
- 본 연구는 해양과기원의 목적 ‘해양의 체계적인 연구’와 ‘국가 해양과학기술의 발전과 국제경쟁력 확보’ 달성에 기여할 것으로 기대됨
- 해양과기원 경영목표 중 ‘해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응’에 연계
- 정부 140개 국정과제 (이 중 해양 관련 8개) 중 해양과 관련된 국정과제는 8개가 포함되어 있고 이 중 국정과제 99 : “기상 이변등 기후변화적응”을 위해 기후변화의 해양 영향 및 연동되는 생태계 반응에 대한 이해와 예측 능력을 강화가 필요하며 본 과제의 목표와 부합

## Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

### Ⅲ. 1 연구기간

- 2018.04.01. - 2018.12.31. (9개월)

### Ⅲ. 2 연구개발의 내용 및 범위

- 방사능 동위원소 추적자를 이용한 대양의 인도양 입자 침강 속도 연구
  - 입자성 물질의 침강 추적자인 방사성동위원소  $^{234}\text{Th}$ 을 2018년도 인도양 현장(선상)에서 분석
- 국내 최초로 대양 (인도양 등) 입자성 미량원소 분포도 작성 및 특성 규명
  - 타 인도양 주요사업 항해에 공동연구로 참여하여 청정 해수 시료채취
  - 청정시료채취 및 전처리 방법 구축을 통한 선진국 수준 분석기술 확보
  - GEOTRACES 상호 검정 정점 방문하여 미량원소 시료의 청정도 신빙성 확보 (2017년 예비결과를 통해 좋은 상호 검정 평가를 받음)
- 방사능 추적자를 이용한 인도양 등 입자성 미량원소의 침강 및 순환 연구
  - $^{234}\text{Th}$  추적자 해석을 통해 인도양 상층의 입자침강속도 및 체류시간 산정

- 미량원소 자료와 결합을 통해 입자성 미량원소의 수층내 침강 거동 규명
- 타 연구원 주요사업 (인도양 쌍극진동 및 물질순환 변동 이해, 책임자 노태근)과 연계하여 인도양 탐사, 추가적인 해수 여과장치를 이용하여 입자상 미량원소 시료를 분리 채취 예정.

#### IV. 연구개발결과

##### IV. 1 방사성동위원소 추적자 이용, 인도양 수층 내 입자 침강 속도 연구

- 방사성동위원소  $^{234}\text{Th}$ 을 2018년도 인도양 현장에서 분석
  - $^{234}\text{Th}$ 은 미량원소 UCC 청정 해수 시료 채취정점과 같은 8개 정점에서 500 미터 상층부에서 각 8개 깊이에서 채수 및 선상 처리 후 분석
  - $^{234}\text{Th}$ 의 짧은 반감기 고려, 선상에서 곧바로  $\beta$ -counter 이용하여 측정.

##### IV. 2 입자성 미량원소 분석법 개발 및 고도화

- 이사부호 기반 미량원소 청정 해수 시료 채취
  - 국내 최초로 Clean water sampler인 Ultra Clean CTD 대양 도입
  - 비금속 재질인 PVDF 재질의 채수기부터 티타늄 재질의 CTD 및 프레임,우레탄 코팅된 Kevlar Wire로 구성되어 미량 원소 전용 샘플러
  - 선상에서 운용 가능한 컨테이너로 제작된 클린룸에서 Subsampling
- 미량원소의 청정시료 전처리 방법 구축 통한 선진국 수준 분석기술 확보
  - 2018년 7월까지 본 연구청사 1연구동 1층에 미량원소/금속 연구 목적에 맞게 청정 실험 환경 및 전처리 장비 구축
  - 국내에서는 처음으로 국제 공인된 GEOTRACES 표준 프로토콜을 도입, 기존의 여과지 자체를 용해시키는 방법 대신, 용해액을 지속적으로 상대적으로 저온에서 Reflux시키며 입자물질만을 leaching 시키어 바탕농도 및 교차 오염을 최소화시키는 청정 전처리 방법 정립 및 구축
- GEOTRACES 상호검정 정점 방문, 미량원소 시료 청정도 신빙성 확보
  - 본 미량원소 채수 장비와 방법 청정도 검증은 기존의 GEOTRACES 연구진 (2009년, 일본)에서 같은 정점(5°16'S, KIOS18\_19번 정점)에서 지난 2013년 발표한 농도 자료와의 비교 상호 검정을 통하여 수행함

##### IV. 3 방사성 추적자를 이용한 인도양 입자성 미량원소의 침강 순환 연구

- $^{234}\text{Th}$  추적자 통해 인도양 상층의 입자침강속도 및 체류시간 산정
  - 정상상태 (steady state)를 가정하고 계산된  $^{234}\text{Th}$ 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
- 특히 SCTR 지역에서 육상기원 공급으로 인하여 매우 높은 것으로 나타남
  - 또한 작년 67E section과 비교하면 ( $538 \pm 365 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) 올해 2배 이상 침강 플럭스가 높게 나타났으며 이는 작년 관측이 겨울에 이루어진 점을 감안하면 계절적인 차이에서 기인한 것으로 생각됨
  - 미량원소 자료와의 결합을 통해 입자성 미량원소 수층 내 침강 거동 규명
    - 해양에서 미세 영양염으로 역할을 하는 것으로 잘 알려진 주요 미량원소의 입자상 농도는 Al, Fe, Mn, Co, Cu, Zn, Cd, Ni, V, Pb가 인도양 상층 500 m에서 각각 평균  $4.02 \pm 2.81 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $1.74 \pm 5.33 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $30.4 \pm 26.1 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $2.16 \pm 6.11 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $25.4 \pm 11.4 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $1.44 \pm 2.43 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $1.26 \pm 1.03 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $22.9 \pm 69.35 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $9.95 \pm 7.07 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $22.0 \pm 21.0 \text{ pmol L}^{-1}$  로 측정 되었다.
    - 이 농도에 (concentration of Particulate Trace Element,  $CP_{TE}$ )와  $^{234}\text{Th}$ 의  $CP_{TE}/^{234}\text{Th}$  비 값을 계산하여 적용하면, 서인도양 60E와 67E 종단 (남위 3도~25도) 가을철 입자성 미량원소의 일차생산이 일어나는 PPZ지역에서의 (Local source가 강하게 나타난 SCTR region은 제외) 침강 속도, 심층으로의 export flux는 약 Al:  $20.4(\pm 24.0) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Fe:  $8.8(\pm 10.4) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Mn:  $154(\pm 181) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Co:  $11.0(\pm 12.9) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Cu:  $129(\pm 152) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Zn:  $7.30(\pm 8.60) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Cd:  $6.39(\pm 7.53) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Ni:  $116(\pm 137) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , V:  $50.5(\pm 59.5) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Pb:  $113(\pm 133) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  로 산정됨

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 대양 수층 내 미량원소 분포특성/물질순환 이해는 전지구적인 생태계 및 기후 변화에 있어 전략적 대응을 위한 기초자료로 활용 가능
- 1차/3차 생지화학 모델과 기후 진단 모델의 주요 기초자료로 활용
- 전 지구적 기후변화 및 인간활동에 따른 대양의 물질순환 이해에 기여
- 극미량원소 분석 국제 경쟁력 확보와 GEOTRACES 프로그램에 대양연구 선도 기관으로 국제 인식 개선
- GEOTRACES 프로그램의 SCOR미팅에서 발간하는 annual activity 연차보고서에 국내 활동 연구성과로 보고

# S U M M A R Y 및 KEYWORDS

## (영 문 요약 문)

### I. Title

Study on the cycles of particulate trace elements in the Indian Ocean ocean water column using radioactive tracer

### II. Necessities and objectives of the study

#### II. 1 Objectives of the study

- To investigate the particulate sinking fluxes in the upper Indian Ocean water column using in-situ measurements of radioactive tracer
  - Linkage with other Indian Ocean section cruise projects
  - Onboard measurements of radioactive nuclide tracer,  $^{234}\text{Th}$
- To accumulate the experience and up-to-date skills of trace element analysis at the level of developed countries
  - Construction of ultra clean particulate trace element analysis method
  - To obtain the reliability and analytical technology through international inter-comparison work at cross-over station
- Study on vertical fluxes of particulate trace elements using  $^{234}\text{Th}$  tracer
  - Calculation of particle settling time and residence time through data analysis of  $^{234}\text{Th}$
  - Identification of vertical export fluxes particulate trace element behavior coupled with  $^{234}\text{Th}$  tracer

#### II. 2 Necessities of the study

##### 1. Importance of this study

- Trace Elements (e.g., Fe, Zn, Cu, Mn, Al, Ni, Co, Pb) act as an essential micro-nutrient of marine primary production and is closely related to global marine carbon cycle, climate change, marine ecosystem change and environmental pollution.



- A recent study by international joint research program of trace element and isotope (TEI), called GEOTRACES, emphasizes the role of particulate trace elements and their role in the oceans.

- Although the particulate trace element is a key factor controlling sinking particulate matter and organic carbon behavior (biological carbon pump) in the water column, there has been no previous research on marine trace element in the ocean due to absence of clean sea water sampling infrastructure in South Korea.

- Previous trace element studies have focused on only dissolved trace elements, and the only a few trace element trace data has been published in large numbers worldwide

- Although it is necessary to combine with radioisotope tracers to identify the behavior of particulate matter (and trace elements), such attempts are rarely has been conducted in worldwide.

- The Indian Ocean is the region where the least trace of trace element work has been performed internationally (only 0.5% of the trace element data is reported worldwide).

- Together with the launch of new 5,000 t grade large research ship with a state-of-the-art clean seawater sampling system and the moving of KIOST to the Busan campus equipped with a clean test environment and facilities, Korea's maritime research on ultra-trace elements has begun and the need to actively utilize the recent up-to-date infrastructure.

## 2. Linkage to higher goals (institutional- and national agenda)

- In this study, the research and development of marine science and technology, the basic research, application and practical application of marine science and technology, and the education and training of experts in marine field, It meets the purpose of establishing the articles of association and meets the specific mission of "research, application and practical research necessary for development of marine science and industry"

- This study is expected to contribute to the achievement of the purpose of marine era "systematic study of the ocean" and "development of national marine science technology and securing of international competitiveness".

- Linking to the KIOST management goal of 'forecasting and responding to climate change through marine research'

- Among the 140 national governments 8 tasks are included in the

national maritime affairs. In addition, the "Climate change adaptation such as extreme weather," ocean impacts of climate change and interlocked ecosystem response. Thus, it is necessary to strengthen understanding and forecasting ability of world wide climate change

### III. Contents and scopes of the study

#### III. 1 Research period

- 2018.04.01. - 2018.12.31. (9 months)

#### III. 2 Contents and scopes of the study

- Study of particulate sinking rate in the ocean using radioactive tracer
  - Analysis of the sediment tracer of particulate matter,  $^{234}\text{Th}$ , radioisotope in Indian Ocean (shipboard) in 2018
- For the first time in Korea, to investigate the distribution of trace elements in the oceans (Indian Ocean, etc.)
  - Participate in the joint cruise of Indian Ocean and collect trace element-clean sea water samples
  - Acquired technology for analyzing the level of advanced countries by constructing clean sampling and pretreatment method
  - Gained confidence and reliability in clean traceability of trace elemental samples by visiting the GEOTRACES mutual test peak (Good inter-comparison test through preliminary results in 2017)
- Particulate sinking rate and cycling of particulate trace elements in upper Indian Ocean using radioactivity tracer
  - Estimation of particulate sinking rate and residence time in the upper Indian Ocean using  $^{234}\text{Th}$ tracer analysis
  - Identification of the vertical export fluxes of particulate trace elements in by combining with particulate trace element data

### IV. Results

- R/V Isabu-based trace element clean sea water sampling

- Successful operation of Ultra Clean CTD in the Indian Ocean, the first clean water sampler in Korea
- To obtain advanced level analysis technology by constructing clean sample pre-treatment method of trace elements
  - Establishment of clean experimental environment and pretreatment equipment for the purpose of trace element / metal research at 1 research building 1 floor of this research building until July 2018
  - In Korea, for the first time, the internationally recognized GEOTRACES standard protocol has been introduced, and instead of dissolving the existing filter paper itself, the solution is refluxed continuously at a relatively low temperature, leaching only the particulate matter.
- Visiting GEOTRACES inter-comparison crossover station to get a reliability and credibility of clean trace element sampling
  - The present trace element collection equipment and method cleanliness verification were carried out through a inter-comparison test with the previous data published in 2013 at the same peak (5 ° 16 'S, KIOS 18\_19) in the Japan GEOTRACES research team (2009)
- Estimation of particulate sinking rate and residence time of Indian Ocean upper layer through  $^{234}\text{Th}$  tracer
  - The vertical flux of  $^{234}\text{Th}$  calculated with assuming a steady state is approximately  $4170 \pm 3010 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in the 60E SCTR section and  $1350 \pm 947 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in the 68E section.
  - especially in the SCTR area, due to supply of land origin
  - In comparison with last year's 67E section ( $538 \pm 365 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), vertical export flux was more than twice this year, which is attributed to the inter-seasonal variability.
- Identification of vertical export fluxes of a particulate trace element in the upper water column coupled with particulate trace element data
  - The average concentrations of particulate trace elements, Al, Fe, Mn, Co, Cu, Zn, Cd, Ni, V, and Pb, in the uppermost 500 m of the Indian Ocean, were  $4.02 \pm 2.81 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $1.74 \pm 5.33 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $30.4 \pm 26.1 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $2.16 \pm 6.11 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $25.4 \pm 11.4 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $1.44 \pm 2.43 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $1.26 \pm 1.03 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $22.9 \pm 69.35 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $9.95 \pm 7.07 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $22.0 \pm 21.0 \text{ pmol L}^{-1}$ .

- When using these concentrations of particulate trace element ( $C_{PTE}$ ) were applied to the  $C_{PTE}/^{234}\text{Th}$  ratio of  $^{234}\text{Th}$  are calculated, it can be seen that PPZ (Except for the SCTR region where the local source is strong). The settling velocity and the export flux to the deep layer are about  $20.4 (\pm 24.0) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and Fe:  $8.8 (\pm 10.4) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Mn:  $154 (\pm 181) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Co:  $11.0 (\pm 12.9) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Cu:  $129 : 7.30 (\pm 8.60) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Cd:  $6.39 (\pm 7.53) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Ni:  $116 (\pm 137) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,  $50.5(\pm 59.5) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Pb:  $113 (\pm 133) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

## V. Application plans of the results of the study

- The results of this study is applied to the understanding of trace element distribution/material cycling in the ocean water columns as a basic data for strategic responses to global ecosystems and climate change
- This result also can be used a base data for biogeochemistry models and climate diagnosis models
- This results can contributes to the understanding of ocean circulation through global climate change and human activities
- Analysis of trace element elements International competitiveness and improvement of international recognition as a leading agency of ocean research in GEOTRACES program
- Report on the annual activity annual report published by the SCOR meeting of the GEOTRACES program as a regional (domestic) activity research of South Korea, for the first time.

(KEYWORDS : 미량원소, 입자성 미량원소, 침강, 추적자, 방사성 동위원소, 인도양, Trace element, Particulate, Scavenging, Radioactive nuclide, tracer, Indian Ocean)

# C O N T E N T S

## (영 문 목 차)

Summary (Korean) .....	1
Summary and Keywords (English) .....	5
Contents (English) .....	10
Contents (Korean) .....	12
List of Table .....	14
List of Figures .....	15
Chapter 1 Introduction .....	16
Section 1 Objectives of the study .....	16
Section 2 Necessity of the study .....	16
1. Technical aspects .....	16
2. Economic and Industrial Aspects .....	17
3. Social aspect .....	17
Section 3 Scope of the study .....	18
Chapter 2 Status of domestic and overseas technology development ·	19
Section 1 Status of the domestic research and development .....	19
Section 2 Status of overseas research and development .....	19
Chapter 3 Contents and results .....	21
Section 1 Estimation of particulate sinking rate of Indian Ocean upper layer through <sup>234</sup> Th tracer .....	21
1. Estimation of particulate sinking rate of Indian upper Ocean using <sup>34</sup> Th tracer	21
가. Sampling and analysis .....	21

4. Results and discussion .....	24
2. Compared with preliminary results of the Indian Ocean in 2017 .....	24
Section 2 Development and advancement of analytical method for particulate trace element .....	25
1. Method for collecting and analyzing particulate trace element clean sea water	25
2. Obtain advanced level analysis technology by constructing clean sample pretreatment method of trace elements .....	28
3. Gained confidence in clean traceability of trace elemental samples by visiting GEOTRACES inter-comparison work peak .....	29
Section 3 Identification of vertical export fluxes of a particulate trace element in the upper water column coupled with particulate trace element data .....	30
1. Calculation of particle settling velocity and residence time in upper Indian Ocean through $^{234}\text{Th}$ tracer .....	30
2. Identification of vertical export fluxes of a particulate trace element in the upper water column coupled with particulate trace element data .....	31
Chapter 4 Achievement and to external contribution .....	33
Section 1 Achievement versus research & development goals .....	33
Section 2 External contribution of research & development goals .....	34
Chapter 5 Plan to utilize research and development results .....	35
Section 1 Usability of Research Results .....	35
Section 2 Plan to use research results .....	35
1. Technological ramifications and utilization plans .....	35
2. Economic ramifications and utilization plans .....	35
3. Social impact and utilization plan .....	35
Chapter 6 References .....	36

# 목 차

요 약 문 .....	1
Summary 및 Keywords (영문요약문) .....	5
Contents .....	10
목 차 .....	12
표 목차 .....	14
그림 목차 .....	15
제 1 장 서 론 .....	16
제 1 절 연구개발의 목적 .....	16
제 2 절 연구개발의 필요성 .....	16
1. 기술적 측면 .....	16
2. 경제·산업적 측면 .....	17
3. 사회적 측면 .....	17
제 3 절 연구 개발의 범위 .....	18
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	19
제 1 절 국내 기술 개발 현황 .....	19
제 2 절 해외 기술 개발 현황 .....	19
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	21
제 1 절 인도양에서 방사성동위원소 추적자 이용, 인도양 수층 내 입자 침강 속도 연구 .....	21
1. <sup>234</sup> Th 추적자를 이용한 입자성 물질 침강량 추적 연구 .....	21
가. 시료 채취 및 분석 방법 .....	21

나. 결과 및 토의 .....	24
2. 2017년 인도양 예비결과 및 최근 결과와 비교 평가를 통한 자료 신뢰도 확보 .....	24
제 2 절 입자성 미량원소 분석법 개발 및 고도화 .....	25
1. 입자상 미량원소청정 해수 시료채취 및 분석방법. ....	25
2. 미량원소의 청정시료 전처리 방법 구축 통한 선진국 수준 분석기술 확보 .....	28
3. GEOTRACES 상호검정 정점 방문하여 미량원소 시료의 청정도 신빙성 확보 .....	29
제 3 절 방사성 추적자를 이용한 인도양 입자성 미량원소의 침강 및 해양 물질 순환 연구 .....	30
1. $^{234}\text{Th}$ 추적자 해석을 통해 인도양 상층의 입자침강속도 및 체류시간 산정 .....	30
2. 미량원소 자료와의 결합을 통해 입자성 미량원소의 수층 내 침강 거동 규명 .....	31
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	33
제 1 절 연구개발 목표 대비 달성도 .....	33
제 2 절 연구개발의 대외 기여도 .....	34
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	35
제 1 절 연구 결과물의 활용성 .....	35
제 2 절 연구 결과물의 기술적 경제적 사회적 활용 계획 .....	35
1. 기술적 파급 효과 및 활용 계획 .....	35
2. 경제적 파급 효과 및 활용 계획 .....	35
3. 사회적 파급 효과 및 활용 계획 .....	35
제 6 장 참고분헌 .....	36



## 표 목 차

4-2-1 연구개발 목표 대비 달성도 .....	33
----------------------------	----

# 그 림 목 차

3-1-1 본 연구진이 개발한 다채널 해수 시료 여과장치 및 여과된 입자상 시료 .....	21
3-1-2 2017년 7월 (왼쪽)과 2018년 4월 (오른쪽) $^{234}\text{Th}$ 시료 채취 정점 .....	22
3-1-3 Mn 공침전물을 만들기 위해 전처리 중인 시료를 heating시키는 모습(왼쪽)과 침전물 생성 후 여과 직전 침강시키는 모습(오른쪽) .....	23
3-1-4 Mn 공침 시료를 여과(왼쪽)하고 이를 계측 전 plating한 모습(오른쪽) .....	23
3-1-5 선상에 비치한 방사능 계측기인 베타( $\beta$ )-카운터와 실제 계측 화면 .....	23
3-1-6 2018년 4월 60-67E 선을 따라 측정한 입자/용존상 $^{234}\text{Th}$ 의 수직 분포 .....	24
3-1-7 2017년 7월 67E 선을 따라 측정한 입자상과 용존상 $^{234}\text{Th}$ 의 수직 분포와 CTD 로부터 얻어진 엽록소 클로로필a 수직 분포와의 비교 .....	25
3-1-8 2017년 7월과 2018년 4월의 위도에 따른 chl a 수직 분포 비교 그림 .....	25
3-2-1 UCC deployment작업과 청정 실험실 컨테이너 내부 (왼쪽), UCC를 해수면에 deploy 한 후, 수심 50 m에서 채수기가 자동 개방된 모습 (오른쪽) .....	26
3-2-2 UCC를 이용한 용존 (물시료) 청정 해수 시료 여과 및 시료 채취 모습 (왼쪽) UCC 채수기 이용한 입자태 미량금속 시료 여과 및 시료 채취 모습 (오른쪽) .....	27
3-2-3 2017년 7월 (왼쪽)과 2018년 4월 (오른쪽) 미량원소 시료 채취 정점 .....	27
3-2-4 연구청사 1연구동에 구축된 청정 실험 환경과 용존 미량원소 전처리 장비 (왼쪽) 과 본 청정실험실에 구축된 해수 중 용존 미량원소 전처리-질량분석기 (seaFAST)의 운 용 사진 (오른쪽) .....	28
3-2-5 입자상 미량원소의 전처리 농축 실험 모습 .....	29
3-2-6 연구 항해 정점에 포함된 GEOTRACES-Crossover 정점에서 일본 연구진과 2009년 발표된 미량원소 농도 자료와의 상호 검정 그림 .....	29
3-3-1 2017년과 2018년 $^{234}\text{Th}$ 과 어미핵종 U과의 비평형 비 .....	30
3-3-2 2018년 4월 동경 60-67도선에서 상층 (<500미터) 입자상 미량원소 분포도 ·	32
4-2-1 2018년도 GEOTRACES annual report Regional Activity, 한국 측 연구 경과 보 고서의 표지 .....	34

# 제 1 장 서론

## 제 1절 연구 개발의 목적

최종 연구 목표: 이사부호를 이용한 대양 청정 미량원소 시료채취를 통해, 대양(인도양)에서 입자성 미량원소(Particulate Trace Elements)의 수층 내 침강 및 거동을 방사성 동위원소 추적자와 결합하여 추적 연구한다.

## 제 2절 연구 개발의 필요성

### 1. 기술적 측면

- 대양 극미량원소 분석 능력 함양을 통한 대양 미량원소 관련 연구의 국제 경쟁력 확보와 국제해양프로그램인 GEOTRACES에 연구결과물 등재가 이전엔 전무하였다.
- 본 연구 과제를 통해 확보한 미량원소 DB는 미량원소의 물질순환과정 이해, 해양환경 변동과 그 핵심요인을 파악을 위한 기초자료로 사용될 것으로 전지구적인 환경/기후변화에 대한 예측 및 대응방안 마련에 중대한 기여를 할 것으로 기대된다..
- 대양 극미량원소 연구기반 구축으로 국제적인 GEOTRACES 연구 선진국 도약의 기회를 제공할 것으로 기대된다.
- 미량 원소(Trace Elements: Fe, Zn, Cu, Mn, Al, Ni, Co, Pb 등)는 해양 일차 생산의 필수적인 미세 영양염으로 전 지구적인 해양 탄소순환, 기후변화, 해양생태계 변화 및 환경 오염과 밀접하게 연관 되어 있다.
- 과거의 미량원소 연구가 청정 해수시료 채취를 기반으로 한 용존 미량원소의 분석 및 순환에 대한 연구 중심이었던 반면, 국제 미량원소 및 동위원소 관련 국제 공동 연구 프로그램인 GEOTRACES의 최근 연구 결과에 따르면 입자성 미량원소(particulate trace elements)의 해양 생지화학 및 미래 기후변화에의 역할이 강조되고 있다.
- 입자성 미량원소는 대양 수층 내에서 입자 물질의 침강 및 유기 탄소 거동 (생물학적인 탄소 펌프)을 알아내는데 중요한 기초 인자임에도 국내에서는 해양 미량원소 분석용 청정 해수시료 채취 인프라의 부재로 관련 연구가 전혀 이루어지지 않고 있다.
- 입자상 미량원소 자료 획득은 해양-대기-육상 등 경계면에서 미량원소의 유입 및, 해양 내부에서 생물 이용, 비생물학적 침강 등 미량원소의 제거 등 해양에서 미량원소의 거동을 결정하는데 중요함에도 불구하고, 과거 미량원소 연구는 용존 미량원소에 치중하여 전지구적으로도 많은 연구 결과가 발표되지 않고 있다.
- 입자성 물질의 거동 및 침강 속도를 밝혀내기 위해서는 방사성 동위원소 추적자와의

결합이 필수적임에도, 국제적으로도 이와 같은 시도는 거의 이루어지지 않고 있다.

- 인도양은 국제적으로도 미량 원소 관련 연구가 가장 적게 수행된 지역(전세계적으로 미량원소 자료중 0.5%의 자료만이 보고됨)으로 적도 및 남반구의 남인도양에서의 입자성 미량 원소 자료는 현재 전무한 실정이다.
- 최근 구축된 최첨단 연구 인프라의 적극 활용 필요성
  - 최첨단 청정해수채취 시스템을 갖춘 대형 종합 연구선 이사부호 취항과, 청정 실험 환경 및 설비가 갖춰진 부산 신청사 이전으로, 해양 극미량원소 연구시대가 개막
  - seaFAST ICP-MS, MC-ICP-MS 등 KIOST Open Lab을 통해 도입된 최신 연구 장비들의 적극 활용이 가능한 과제임
- 이와 같이, 방사성 동위원소 추적자와 결합하는 미량원소 연구는 관련 연구기반 구축(이사부호, 청정해수채취시스템, seaFAST ICP-MS 등, KIOST Open Lab을 통한 최신 분석장비 도입)으로 KIOST만이 가능한 연구이다.

## 2. 경제·산업적 측면

- 대양의 입자 물질 순환 관련 기초 자료 제공을 통해, 해양 탄소 순환과 전지구적 기후 변화 예측 정밀도 향상이 필요하다.
- 본 연구 개발을 통해 신뢰성있는 해양자료 확보를 통해 해양정보 서비스 시장 발전에 기여 및, 극미량원소 연구수행 및 분석기술 선진화로 인해 관련 해양과학기술 및 산업 발전에 기여가 필요하다.

## 3. 사회적 측면

- 국제 공동연구 프로그램인 GEOTRACES 참여로 국제적인 위상강화가 필요하다.
- 기후변화와 관련된 해양의 변화에 대한 과학적 이해 증진이 필요하다.
- 국가 상위 어젠다 달성에 기여 및 해양과학 분야의 국가 위상 제고가 필요하다.
  - 기후변화 감시/예측능력 확보, 해양과학조사 역량 강화 등
- 급속하게 변화하는 지구환경 대응위한 지속가능한 인류공영 신지식 창출이 필요하다.
- 본 는 ‘해양과학기술의 창의적 원천기초연구, 응용 및 실용화 연구와 해양분야 우수 전문인력의 교육·훈련을 통하여 국내·외적으로 해양과학기술의 연구개발을 선도하고 그 성과를 확산’한다는 해양과기원 정관상 설립 목적에 부합하며, ‘해양과학기술 및 해양산업 발전에 필요한 원천연구, 응용 및 실용화연구’ 등의 고유 임무에 부합한다.
- 본 연구는 해양과기원의 목적 ‘해양의 체계적인 연구’와 ‘국가 해양과학기술의 발전과 국제경쟁력 확보’ 달성에 기여할 것으로 기대된다.

- 해양과학기술원의 경영목표 중 ‘해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응’에 연계된다.
- 본 연구는 해양과학기술원 발전 전략(2012-2020)에 따른 주요 기능의 ‘해양관측, 탐사, 해양환경 및 기후 변화에 관한 연구’ 및 12대 중점연구분야 중 ‘해양환경 및 생태계 보전 기술’과 ‘기후변화 예측 및 대응기술’에 부합한다.
- 본 과제 수행은 문재인정부 국정운영 5개년 계획 중 ‘84. 깨끗한 바다, 풍요로운 어장’ 등에 직접적으로 부합한다.
- 정부 140개 국정과제 중 해양과 관련된 국정과제는 8개가 포함되어 있고 이중 아래 과제들이 본 과제의 목표와 부합하고 있다고 판단된다.
  - 국정과제 99 : “기상 이변등 기후변화적응”을 위해 기후변화의 해양 영향 및 연동되는 생태계 반응에 대한 이해와 예측 능력을 강화가 필요하며 이는 과제의 핵심 연구분야와 부합된다.

### 제 3절 연구 개발의 범위

- 대양(인도양 등)방사능 동위원소 추적자를 이용한 대양의 입자 물질 침강 속도 연구
  - 입자성 물질의 침강 추적자인 방사성동위원소  $^{234}\text{Th}$ 을 2018년도 인도양 현장에서 분석
  - 2017년 인도양 예비결과 및 최근 동해에서의 결과와 비교 평가를 통한 자료 신뢰도 확보
- 국내 최초로 대양 (인도양 등) 입자성 미량원소 분포도 작성 및 특성 규명
  - 타 인도양 주요사업 항해에 공동연구로 참여하여 청정 해수 시료채취
  - 미량원소의 청정시료채취 및 전처리 방법 구축을 통한 선진국 수준 분석기술 확보
  - GEOTRACES 상호 검정 정점 방문하여 미량원소 시료의 청정도 신빙성 확보 (2017년 예비결과를 통해 좋은 상호 검정 평가를 받음)
- 방사능 추적자를 이용한 인도양 등 입자성 미량원소의 침강 및 해양 물질 순환 연구
  - $^{234}\text{Th}$  추적자 관측 자료 해석을 통해 인도양 상층의 입자침강속도 및 체류시간 산정
  - 미량원소 자료와의 결합을 통해 입자성 미량원소의 수층내 침강 거동 규명
- 타 연구원 주요사업 (인도양 쌍극진동 및 물질순환 변동 이해, 책임자 노태근)과 연계하여 인도양 탐사, 위 사업에서 수행하는 청정 해수 시료 채취 과정에서 추가적인 해수 여과장치를 이용하여 입자상 미량원소 시료를 분리 채취 예정
- 위 주요사업에서 유기탄소의 침강량을 계산하는 과정에서 필요한 방사성 동위원소 Th 자료를 획득하여 본 연구에서 수행하는 입자성 미량원소 자료와의 결합 예정

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1절 국내 기술 개발 현황

#### ○ 기존 해양 미량원소 연구의 부재

- 국내 보유 기존 연구선들은 청정 해수 채취장비 및 기술의 부재로 국내 연구진으로부터 해양 미량원소 분포 연구 결과 발표가 전무하다.

- 국내 연구진의 미량원소 및 동위원소 (Trace Elements and isotopes/TEIs) 관련 국제 공동연구프로그램(\*GEOTRACES 연구)에 기여 역시 전무하다.

\*2000년대 중반부터 30여개국 참여하는 국제 대양 미량원소/동위원소 공동연구프로그램

○ 최근 청정 해수채취 장비를 갖춘 종합연구조사선인 이사부호의 취역 및 청정실험 환경을 갖춘 부산신청사 이전으로 국제 수준의 미량원소 연구 수행이 가능하게 되었으며 현재 오염 없는 청정 시료채취와 분석을 통해 미량원소 분포 파악 노력 중에 있다.

○ 이사부호 기반 대양의 극미량원소 연구를 위한 청정 해수시료채취를 주요사업의 일부 분으로 최근 (2017년) 인도양에서 시작하였으나 기존 인도양 주요사업에서는 용존 미량원소의 연구만 수행하였으며 용존 입자성 미량원소 관련 연구는 전무함

○ 최근(2017년), 인도양의 GEOTRACES 국제 상호 검정 정점에서 채취한 해수 중 용존 미량원소 분포의 예비결과, 과거 일본 연구진 (2009-2010)의 자료와 거의 일치하는 결과를 얻어내었음

- 이 자료는 작년 인도양 관련 국제 공동연구 워크샵에서 GEOTRACES 관계자에게 좋은 평가를 받음으로써, 이사부호의 청정 해수채취 시스템의 성능과 우리 연구원 연구진들의 미량원소 관련 연구 가능성 및 역량을 인정받은 성과임

○ 최근(2017년), 선상에서 입자성 물질(예, 유기탄소)의 해양 침강(scavenging, POC export) 추적자인 방사성 동위원소  $^{234}\text{Th}$ 의 선상 분석을 대형 종합 연구선 이사부호를 기반한 인도양 현장에서 시도하였으며, 국내 최초로 예비결과를 획득하는데 성공하였음

○ 방사성 동위원소 추적자와 결합하여 미량원소의 거동을 추적하는 연구는 최초로 시도 되는 연구임

### 제 2절 국외 기술 개발 현황

○ 해양 내 탄소순환, 기후변화, 해양생태계 및 환경 오염의 변화를 이해하는데 중요한 역할을 하는 미량원소와 그 동위원소(Traces Elementss and Isotopes, TEIs)의 생지화학적 순환을 이해하기 위한 국제적인 공동 연구 프로그램 (GEOTRACES)이 십년

- 이상 활발히 수행 중에 있다.
- 초기 GEOTRACES의 연구는 청정 해수시료 채취를 통한 전지구적 용존 미량원소 분포와 그 순환 과정 규명에 중점을 두었으나, GEOTRACES의 최근 연구 결과에 따르면 대양에서 매우 짧은 (days to months) 체류시간을 가지는 입자형 미량원소들이 입자 물질해양 거동 (예, 유기 탄소 거동, 생물학적인 탄소 펌프) 에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려지고 있다.
  - 일본은 2009년부터 해양에서 생지화학적 작용의 추적자로 활용되는 미량원소와 이들의 동위원소 분포를 조절하는 과정 및 플럭스 등을 밝히는 GEOTRACES 프로그램의 일환인 J-GEOTRACES (Japan)를 통해 인도양에서 미량원소 분포에 대한 연구를 수행하였으나, 아직 입자형 미량원소에 대한 연구 결과는 발표되지 않았다.
  - 최근 (2014-2015) 인도양 일부 해역 (아라비아 해 연안 혹은 북반구 일부해역)에서 방사성 동위원소인  $^{234}\text{Th}$ 를 측정하는 연구가 인도 연구진에 의해 수행되었으나 인도양 종단 따라 북반구에서 남반구를 아우르는 공간범위에서의  $^{234}\text{Th}$  자료는 발표되지 않았 (Owens et al. 2015; Subha Anand, et al. 2018)
  - 지난 십여년간 약 100여차례에 이르는 국제 공동 연구 항해를 통해 전지구적인 미량원소 자료가 생산되고 약 880건 이상의 관련 국제 학술지 연구 성과가 발표 되었음에도, 대서양, 태평양 및 극지방에서 연구가 집중된 반면, 인도양에서는 연구가 활발히 진행되지 않고 있다 (전 대양 미량원소 연구의 5% 이내만이 인도양에서의 연구 성과).
  - 방사성동위원소 추적자와 결합한 미량원소 거동 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.
  - 최근(2017), 이사부호의 취향과 함께 GEOTRACES 연구진을 비롯, 국제 사회에서 한국의 인도양 미량원소 연구 참여를 독려하는 국제적인 여론이 조성되고 있다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1절 인도양에서 방사성동위원소 추적자 이용, 인도양 수층 내 입자 침강 속도 연구

#### 1. $^{234}\text{Th}$ 추적자를 이용한 입자성 물질 침강량 추적 연구

##### 가. 시료 채취 및 분석 방법

용존태의  $^{234}\text{Th}$ 의 경우, 앞서 미량금속 시료를 얻은 정점의 8개 깊이에서 (500, 300, 200, 150, 100, 50, 20, 0 m) 일반 CTD의 Niskin bottle로부터 PE bottle에 4 L의 해수를 채수한 후, blank가 가장 낮은 것으로 알려진 25 mm silver membrane filter (1.2  $\mu\text{m}$ )에 본 연구팀이 직접 제작한 여과 장치에서 8개의 시료를 4 L의 PC bottle에 동시 여과하였다 (아래 그림). 이렇게 여과된 시료는 Conc.  $\text{HNO}_3$ 을 6 ml 가해 pH를  $\sim 2$ 로 맞춘 후 전처리 회수율의 추적자인  $^{234}\text{Th}$ 을 약 10 dpm 가한 후 6시간 이상을 대기하였다. 입자태의  $^{234}\text{Th}$ 은 추가적으로 2 L의 해수를 더 여과한 후 (총 6 L) 여과된 silver filter지를 측정 때까지 클린후드에서 측정 전까지 건조시켰다.



그림3-1-1 본 연구진이 개발한 다채널 해수 시료 여과장치 및 여과된 입자상 시료

2017년 7월에는 7개 정점, 2018년 4월에는 총 8개의 정점에서 수층 상부 500 미터에서부터 표층까지 8개 깊이에서 해수시료 (12L를 채취하였다).



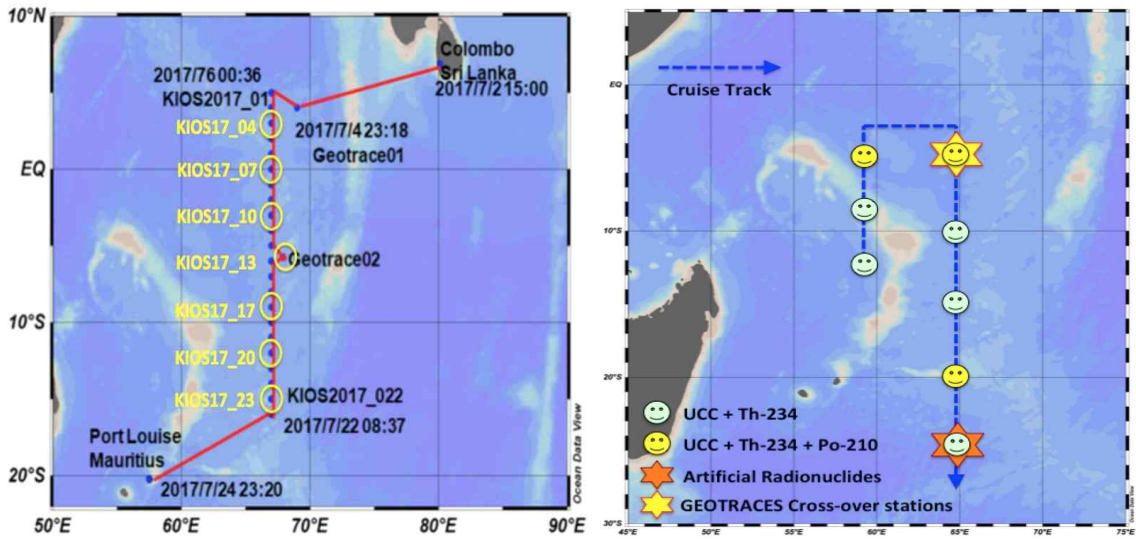


그림3-1-2 2017년 7월 (왼쪽)과 2018년 4월 (오른쪽)  $^{234}\text{Th}$  시료 채취 정점

용존태의  $^{234}\text{Th}$ 은 전처리 과정의 회수율 추적자인  $^{230}\text{Th}$ 을 spike 가하고 최소 6시간 후, Mn 공침전 (Mn co-precipitation) 을 만들어 농축하였다. 먼저 1/2로 희석된  $\text{NH}_4\text{OH}$  용액을 약 12 ml 정도 가하여 pH를  $8.0 \pm 0.1$ 로 맞춘 후, 실험실에서 미리 만들어온  $\text{KMnO}_4$  와  $\text{MnCl}_2$  시약을 순차적으로 0.5 ml씩 가하여 침전 반응을 일으켰다.. 침전반응이 빠르게 일어나게 하기 위하여 immersion circulator를 이용해 Heating 온도를 약  $85^\circ\text{C}$ 로 일정하게 맞추어 12시간 이상 heating하였다. 이후 침전물이 충분히 가라앉았다고 판단되면 역시  $1.2 \mu\text{m}$ , 25 mm silver membrane filter에 각 8개의 시료를 여과한 후, 여과지를 클린 후드 내에서 측정 전까지 건조시켰다. 여과지는 사용 전에 계측 background를 낮추기 위하여 불순물 제거 겸 세척을 위해 아세톤과 에탄올 용액에 번갈아 세척하였다. 건조가 다 된 여과지는 입자태를 여과한 여과지와 함께, Milar 랩으로 1회, 그리고 Al foil ( $16 \mu\text{m}$ )로 2회 싸서  $\beta$ -counter (RISO: Low background multi beta counter)를 이용하여 5개씩 측정하였다. 측정시간은 총 count 수의 측정 표준편차가 용존태와 입자태에 대하여 각각 3과 5% 이내를 유지할 수 있도록 시료 당 최소 4 cycles(cycle/4시간) 이상 측정하여 분당 count수( cpm)을 측정한 후, 결과 데이터를 저장 및 백업하였다. 방사 붕괴에 따른 계산을 위하여 모든 단계의 시간을 기록하였다.



그림3-1-3 Mn 공침전물을 만들기 위해 전처리 중인 시료를 heating시키는 모습(왼쪽)과 침전물 생성 후 여과 직전 침강 시키는 모습(오른쪽)



그림3-1-4 Mn 공침 시료를 여과(왼쪽)하고 이를 계측 전 plating 한 모습(오른쪽)



그림3-1-5 선상에 비치한 방사능 계측기인 베타( $\beta$ )-카운터와 실제 계측 화면

나. 결과 및 토의

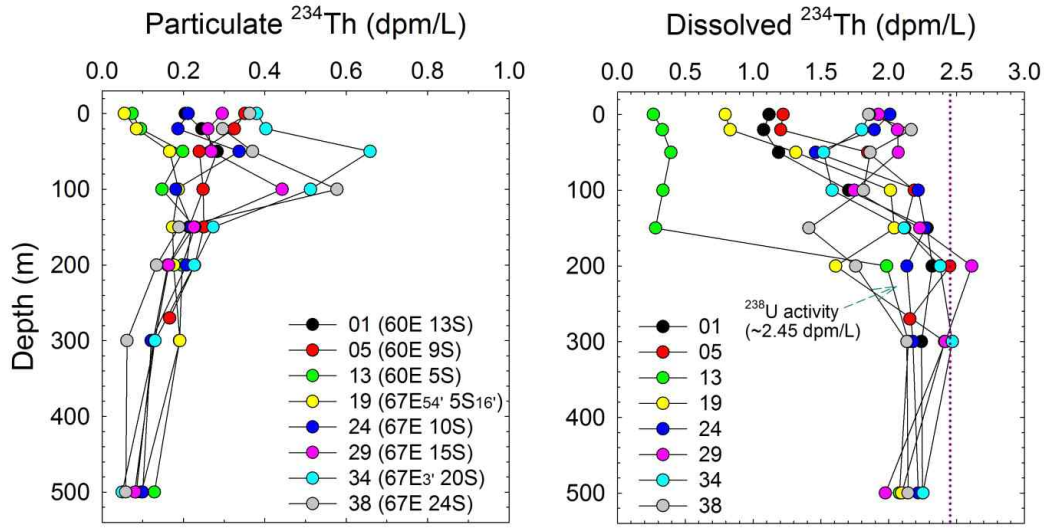


그림3-1-6 2018년 4월 60-67E 선을 따라 측정된 입자/용존상  $^{234}\text{Th}$ 의 수직 분포

2018년 4월 8개 정점에서  $^{234}\text{Th}$  측정 결과 용존상  $^{234}\text{Th}$  deficiency가 최대로 나타나는 깊이는 정점에 따라 다르게 나타나며 68E선의 남위 5도에서는 약 40미터에서 나타난 반면, 위도에 따라 그 깊이 ( $^{34}\text{Th}$  최대 결핍)가 점점 깊어지다가 남의 20도에서는 약 100미터 아래에서 나타나는 것으로 나타났다. 이는 남쪽으로 갈수록 SCM의 깊이가 67E선을 따라 남쪽으로 갈수록 40미터에서 약 120미터 까지 점점 깊어지는 양상과 일치하였다. 또한 60E 5S에서는 매우 이례적으로 낮은 용존  $^{234}\text{Th}$  농도가 관측되었으며 이 정점에서는 입자상  $^{234}\text{Th}$  역시 가장 낮은 분포를 보였다. 이는 Seychelles-Chagos Thermocline Ridge (SCTR) 지역에서부터 기인한 상당한 양의 lithogenic particle의 유입으로 인한  $^{234}\text{Th}$  제거에 의한 것으로 생각된다.

2. 2017년 인도양 예비결과 및 최근 결과와 비교 평가를 통한 자료 신뢰도 확보

2017년 7월 7개 정점에서  $^{234}\text{Th}$  측정 결과 용존상  $^{234}\text{Th}$ 은 표층 60-70미터 깊이에서 강한 결핍(deficiency)를 보이고 다시 재결정화(re-mineralization)에 의해 약 100미터 이하 깊이에서는 어미핵종인 U과 거의 평형에 이르는 농도를 보인다. 입자상  $^{234}\text{Th}$ 의 경우 용존 상보다 10배 이상 낮은 농도로 나타나며 깊이에 따라 특별한 분포 특성이 나타나지 않았다.  $^{234}\text{Th}$ 의 결핍이 가장 크게 일어나는 깊이는 60-70미터 깊이로 남북을 따라 7개 정점에서 거의 일치하며 이는 subsurface chlorophyll maximum(SCM)의 깊이와 일치하는 것으로 나타났다 (아래 그림)



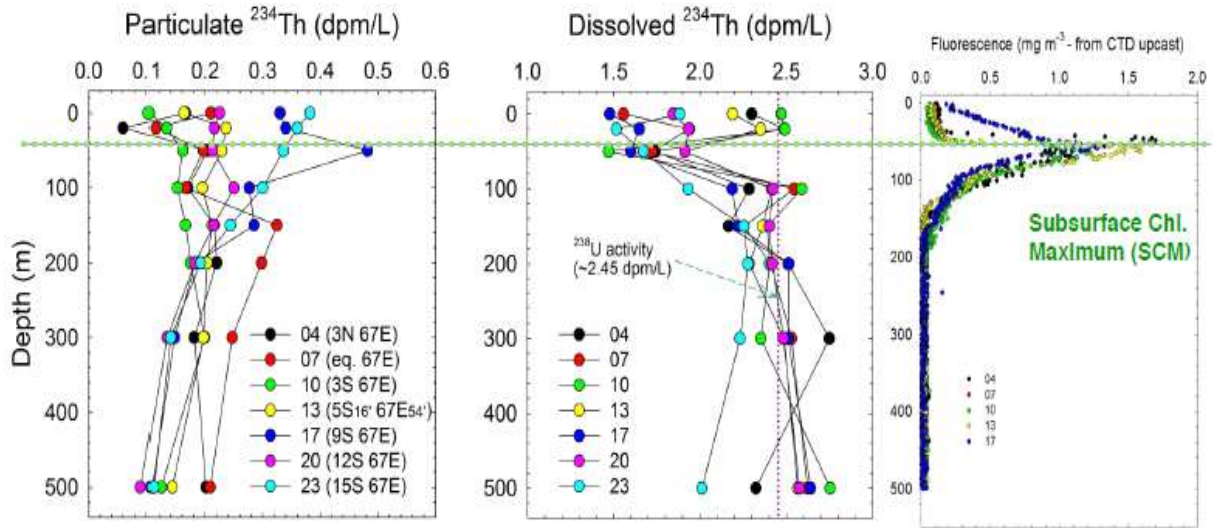


그림3-1-7 2017년 7월 67E 선을 따라 측정된 입자상과 용존상  $^{234}\text{Th}$ 의 수직 분포와 CTD로부터 얻어진 엽록소 클로로필a 수직 분포와의 비교

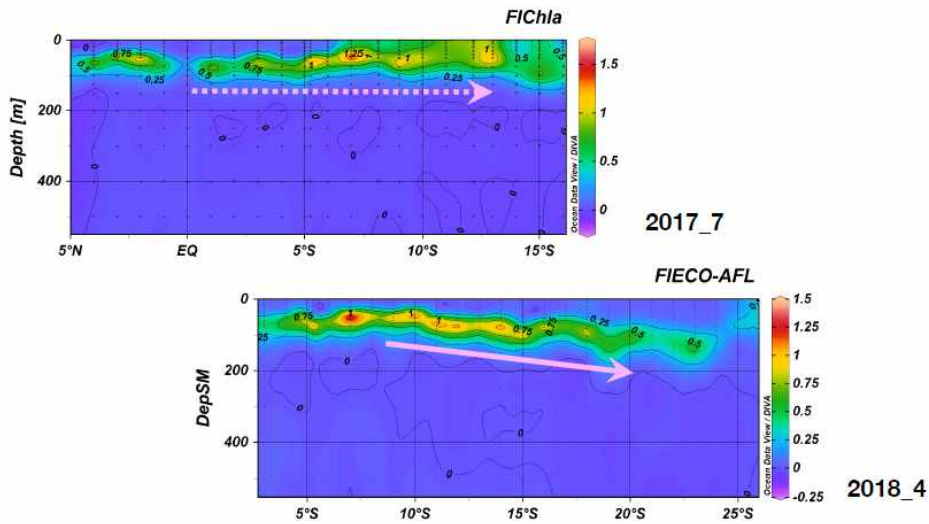


그림3-1-8 2017년 7월과 2018년 4월의 위도에 따른 chl a 수직 분포 비교 그림

## 제 2 절 입자성 미량원소 분석법 개발 및 고도화

### 1. 입자상 미량원소청정 해수 시료채취 및 분석방법

국내에서는 처음으로 미량원소 청정 해수장비(Clean water sampler)인 Ultra Clean CTD(UCC, NIOZ)를 도입하여 연구선 상에서 직접 운용하였다. 본 UCC 장비는 선상에서 운용 가능한 컨테이너가 개조되어 제작된 클린룸에서 Subsampling 및 CTD 유지 보관이 가능하게 설계, 선상에서 외부 노출 없이 곧바로 샘플링 및 시료 여과 등 전처리를 수행할 수 있게 제작되었다. 관측에 앞서, 채수기에 강제로 물을 주입해 채수기의 개폐 작동 여부를 확인하고, 이 과정을 3번 반복하여 미사용 기간 동안 멀티밸브와 accumulator에 축적된 잔류공기를 제거하는 작업을 수행하였다.

UCC는 처음 수면에 deploy 시킨 후에 분당 15m의 속도로 채수기가 충분히 열릴 수 있는 수압 만큼인 50m까지 천천히 하강시킨 후, 약 2분간 대기하였다. 이후 UCC를 표층까지 끌어올려 채수기가 제대로 뚜껑이 닫혀있는지 확인 후에 해지면 수심까지 하강시킨 후, 다시 올라오는 과정에서 필요 수심에서 채수를 하였다. 총 24개의 채수기 중, 표준 깊이라고 알려진 16개 깊이에서 시료를 채취하였으며, 500m 상부 8개의 수심에서는 입자태의 미량금속 시료를 얻기 위하여 같은 깊이에서 별도로 채수를 하였다. UCC가 deck에 오른 후, 청정실험실 컨테이너에 넣은 후, clean-air 환경이 충분히 준되었다고 판단된 20분 후에 청정 실험실 내에서 subsampling을 수행하였다.



그림3-2-1 UCC deployment작업과 청정 실험실 컨테이너 내부 (왼쪽), UCC를 해수면에 deploy 한 후, 수심 50 m에서 채수기가 자동 개방된 모습 (오른쪽).

입자태의 미량원소 측정을 위해 500미터 깊이 이하의 상층부에서는 각 정점당 8개의 (10, 20, 50, 100, 150, 200, 300, 500 미터 깊이) 채수기에서 12 L의 물을 한꺼번에 여과하였으며, 미리 산세척된 filter-holder (PE, Nuclepore)에 47mm pall-supor, 0.2  $\mu\text{m}$  여과지

를 장착하여 테프론과 PVC튜브에 연결하여 같은 방법으로 여과하였다. 이시료는 미리 산세척 된 petri dish에 담아, 역시 이중 지퍼백에 냉동 보관하였다.



그림3-2-2 UCC를 이용한 용존 (물시료) 청정 해수 시료 여과 및 시료 채취 모습 (왼쪽) UCC 채수기 이용한 입자태 미량금속 시료 여과 및 시료 채취 모습 (오른쪽)

미량원소 시료는 018년 4월에 위도 4-5도 간격으로 총 8개의 정점 (60E 3 정점, 67E 5 정점) 에서 UCC를 운용하여 시료채취를 하였다. 두 해 모두 GEOTRACES 상호 검증을 위하여, 2009-2010년 일본 연구진이 다녀간 Crossover정점 (5°16'S, KIOS17\_13=KIOS18\_19번)을 포함하였으며, 이 정점에서는 타 기관과의 상호 검증 실험을 위한 추가적인 시료채취도 이루어졌다. 이어지는 자연방사능( $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ), POC/PON 및 인공 방사능 시료 역시 이 정점에서 샘플링을 수행하였다.

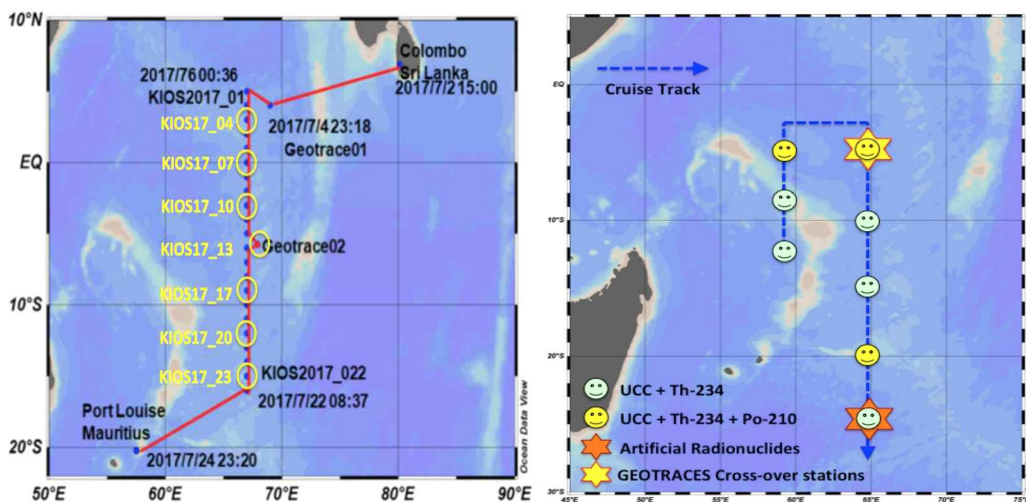


그림3-2-3 2017년 7월 (왼쪽)과 2018년 4월 (오른쪽) 미량원소 시료 채취 정점

이렇게 얻어진 미량원소 용존 시료는 본 연구원 1연구동 1층에 설비된 청정 실험실로 옮겨 전처리 및 측정을 수행하였다. 시료 측정에는 질량분석기 (seaFAST ICP-MS)로 시료를 측정하였다. 시료 측정 전에 In115를 내부 표준물질로 가하여 기기상의 drift로 인한 오차를 보정하였으며, 매 정점마다 표준물질 측정결과 본 실험방법의 회수율은 약 94-120%로 매우 신뢰도 있는 것으로 판단된다 (V-102%, Cr-120%, Mn-114%, Fe-111%, Co-109%, Ni-87%, Cu-104%, Zn-95%, Cd-100%, Pb-99%). 도입된 seaFAST ICP-MS를 이용하여 현재 2018년 시료는 모두 측정 완료하였으며, 2017년 7월 시료는 현재 측정 중에 있다.



그림3-2-4 연구청사 1연구동에 구축된 청정 실험 환경과 용존 미량원소 전처리 장비 (왼쪽)과 본 청정실험실에 구축된 해수 중 용존 미량원소 전처리-질량분석기 (seaFAST)의 운용 사진 (오른쪽)

## 2. 미량원소의 청정시료 전처리 방법 구축 통한 선진국 수준 분석기술 확보

- 국내에서는 처음으로 국제 공인된 GEOTRACES 표준 프로토콜 도입, 기존의 여과지 자체를 용해시키는 방법 대신, 용해액을 상대적으로 저온에서 지속적 Reflux시키며 입자물질만을 leaching 시키어 바탕농도 및 교차 오염을 최소화시키는 청정 전처리 방법을 구축하였다.





그림3-2-5 입자상 미량원소의 전처리 농축 실험 모습

### 3. GEOTRACES 상호검정 정점 방문하여 미량원소 시료의 청정도 신빙성 확보

본 연구에서 수행한 미량원소 시료 채취 장비의 청정도 성능 및 본 연구진의 미량원소 측정 기술 검증은 기존의 GEOTRACES 연구진 (2009년, 일본)에서 같은 정점에서 지난 2010년 발표한 농도 자료와의 비교 상호 검정을 통하여 수행하였으며, Fe을 제외한 다른 원소들의 경우 2017년과 2018년 두 해 모두 발표된 일본 연구진의 값과 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다 (Vu and Sohrin, 2013). Fe 농도가 다소 높게 나타나는 것은 시료 채취 및 측정 상의 오류에 의한 것으로 생각되며 현재 이 부분을 개선하기 위해 추가 실험 중에 있다.

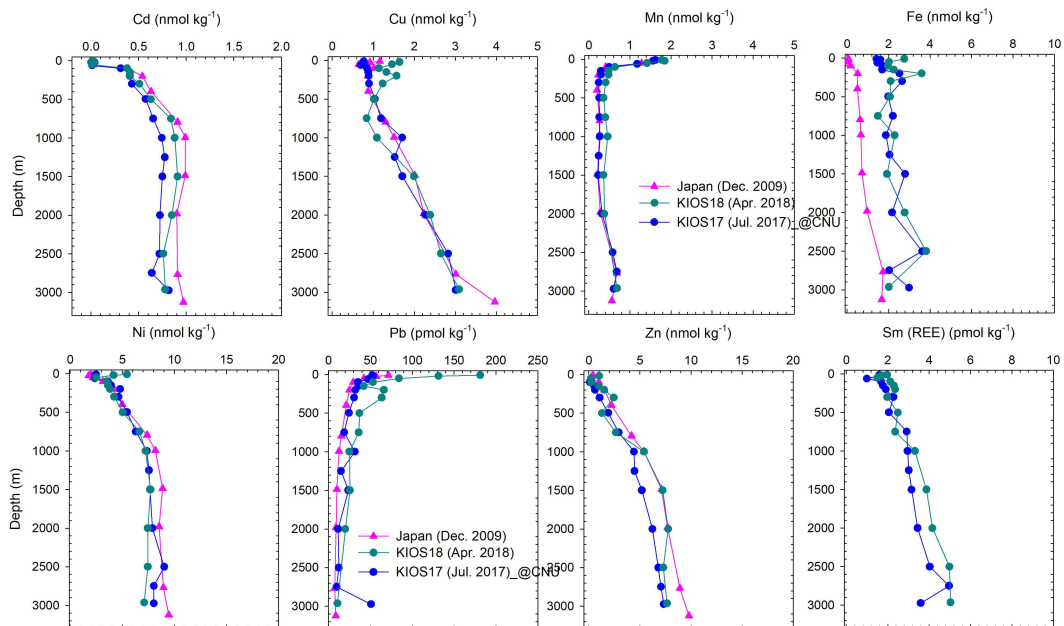


그림3-2-6 본 연구 향해 정점에 포함된 GEOTRACES-Crossover 정점에서 일본 연구진과 2009년 발표된 미량원소 농도 자료와의 상호 검정 그림



### 제 3절 방사성 추적자를 이용한 인도양 입자성 미량원소의 침강 및 해양 물질 순환 연구

#### 1. $^{234}\text{Th}$ 추적자 관측 자료 해석을 통해 인도양 상층의 입자침강속도 및 체류시간 산정

2017년과 2018년 관측에서 어미핵종인  $^{238}\text{U}$ 과  $^{234}\text{Th}$ 의 비평형 표준  $^{234}\text{Th}$  결핍은 아래와 같다.  $^{238}\text{U}$ 과  $^{234}\text{Th}$ 의 비평형을 이용한  $^{234}\text{Th}$ 의 입자상 침강 flux를 산정하기 위하여, 아래 물질수지 계산식을 적용, ( $^{238}\text{U}$ 과  $^{234}\text{Th}$ 는 total  $^{238}\text{U}$ 과  $^{234}\text{Th}$  activity,  $\lambda$ 는  $^{234}\text{Th}$ 의 붕괴상수 (0.0288 day<sup>-1</sup>), P는  $^{234}\text{Th}$ 의 침강 입자에 의한 export flux, V는 수평 이류에 의한  $^{234}\text{Th}$ 의 수평 공급),  $^{234}\text{Th}$ 의 침강 플럭스를 계산해 보았다.

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

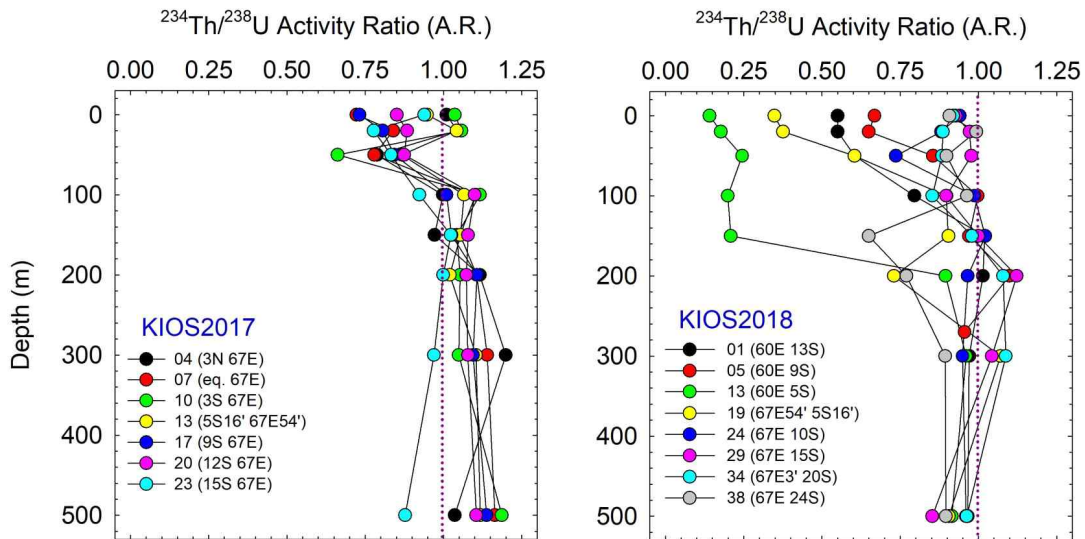


그림3-3-1 2017년과 2018년  $^{234}\text{Th}$ 과 어미핵종 U과의 비평형 비

그 결과 정상상태 (steady state)를 가정하고 계산된  $^{234}\text{Th}$ 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 나타났으며, 특히 SCTR 지역에서 육상기원 물질의 공급으로 인하여 매우 높은 것으로 나타났다.

## 2. 미량원소 자료와의 결합을 통해 입자성 미량원소의 수층 내 침강 거동 규명

2018년 4월 8개 정점에서 측정한 용존 미량원소의 농도는 아래 그림과 같다. 용존 미량원소의 농도는 심층에서 60E도 종단 상층에서 67E도 transect보다 더 높은 농도 보이며, 이는 60E 인근의 Seychelles-Chagos Thermocline Ridge (SCTR) 지역에서부터 기인한 상당한 양의 lithogenic particle의 유입에 의한 것으로 생각된다. 남위 20도 지역에서 Al, V, Mn, REE 등이 수심 300미터까지 다소 높게 나타나며, 이는 대기를 통한 Al 등 대기 입자 물질의 유입과 100미터가 넘는 두꺼운 혼합층에 의해 심층으로 빠르게 전달되고 있는 것에 의한 것으로 생각된다.

- 해양에서 미세 영양염으로 역할을 하는 것으로 잘 알려진 주요 미량원소인 Al, Fe, Mn, Co, Cu, Zn, Cd, Ni, V, Pb의 미량원소 농도는 상층부 인도양 상층 500 m에서 각 평균  $4.02 \pm 2.81 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $1.74 \pm 5.33 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $30.4 \pm 26.1 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $2.16 \pm 6.11 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $25.4 \pm 11.4 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $1.44 \pm 2.43 \text{ nmol L}^{-1}$ ,  $1.26 \pm 1.03 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $22.9 \pm 69.35 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $9.95 \pm 7.07 \text{ pmol L}^{-1}$ ,  $22.0 \pm 21.0 \text{ pmol L}^{-1}$  로 측정 되었다.

- 이 농도에 (concentration of Particulate Trace Element,  $CP_{TE}$ )와  $^{234}\text{Th}$ 의  $CP_{TE}/^{234}\text{Th}$  비 값을 계산하여 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:  $20.4(\pm 24.0) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Fe:  $8.8(\pm 10.4) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Mn:  $154(\pm 181) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Co:  $11.0(\pm 12.9) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Cu:  $129(\pm 152) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Zn:  $7.30(\pm 8.60) \text{ umol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Cd:  $6.39(\pm 7.53) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Ni:  $116(\pm 137) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , V:  $50.5(\pm 59.5) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , Pb:  $113(\pm 133) \text{ nmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  로 산정되었다. 본 연구 결과는 향후 인도양 입자 물질 순환 거동 해석에 기초 자료 해석에 쓰일 것으로 기대된다.

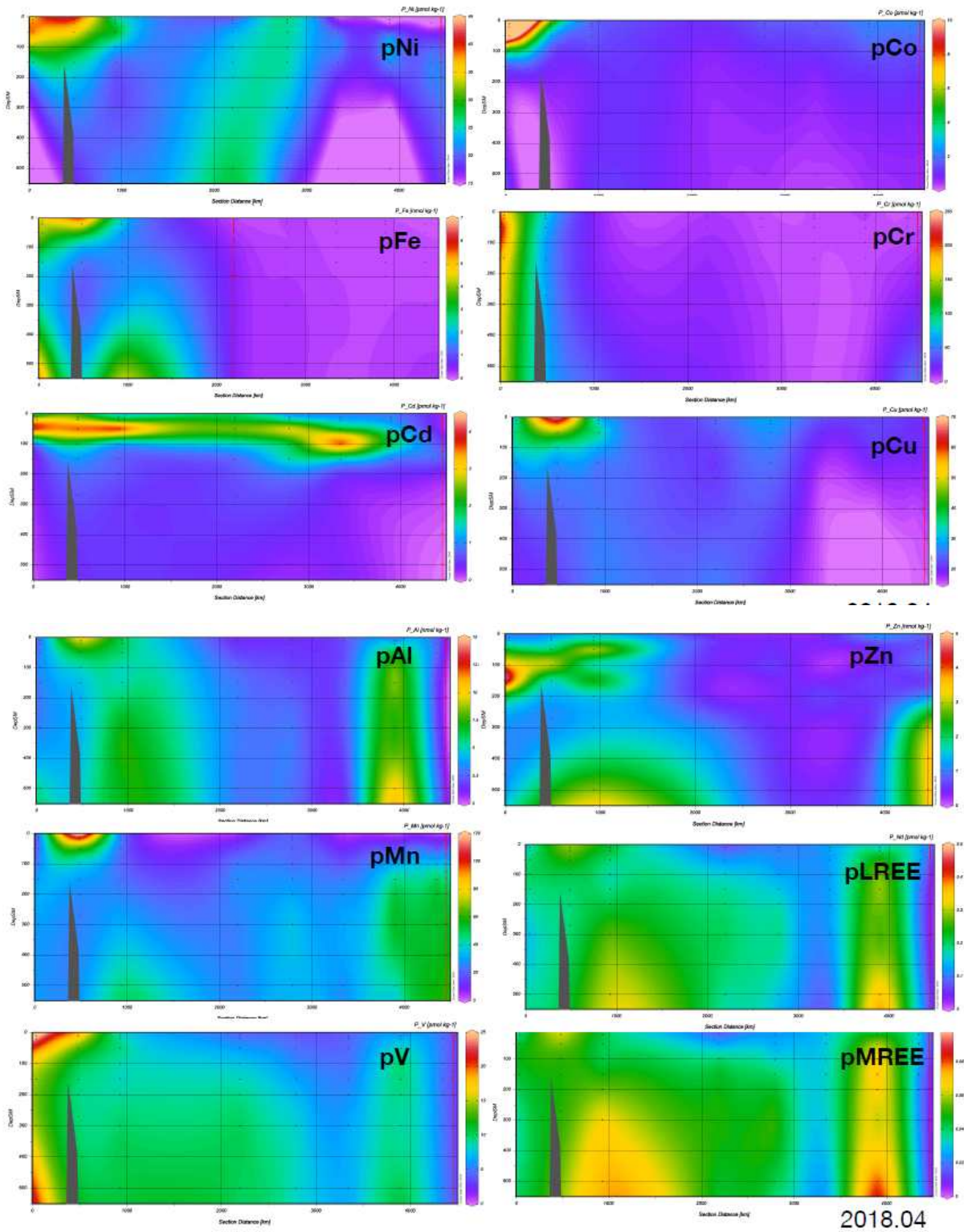


그림3-3-2 2018년 4월 동경 60-67도선에서 상층 (<500미터) 입자상 미량원소 분포도

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

### 제 1절 연구개발 목표 대비 달성도

본 연구 개발을 통해 기간내 제시한 성과 목표를 빠짐없이 모두 100% 가까이 (98%) 달성하였으며, 그 세부 목표에 달성율은 아래 표와 같다.

표4-1-1 연구개발 목표 대비 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용			연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)	
	성과목표	연구내용	가중치 (A)		달성실적
1년차 (2018)	1. 인도양에서 방사능 동위원소 추적자 현장 관측을 통한 인도양 수층 내 입자 침강 속도 연구	1-1. 입자성 물질의 침강 추적자인 방사성동위원소 $^{234}\text{Th}$ 을 2018년도 인도양 현장에서 분석	0.1	현장관측을 성공적으로 수행하고 $^{234}\text{Th}$ 을 2018년도 인도양 현장에서 분석 완료	100
		1-2. 2017년 인도양 예비결과 및 최근 동해에서의 결과와 비교 평가를 통한 자료 신뢰도 확보	0.1	금년도 관측 결과를 지난 예비결과와 비교 통해 자료 신뢰도 얻음	95
	2. 입자성 미량원소 분석법 개발 및 고도화	2-1. 타 인도양 주요사업 향해에 공동연구로 참여하여 청정해수 시료채취	0.1	목표한 개수의 이사부호 청정해수 채취 기반 미량원소 청정해수 시료 채취 완료	95
		2-2. 미량원소의 청정시료채취 및 전처리 방법 구축을 통한 선진국 수준 분석기술 확보	0.1	국제 공인된 GEOTRACES 표준 protocol을 국내에선 처음으로 도입하여 시료 전처리 장비 구축 및 실험 완료	95
		2-3. GEOTRACES 상호 검정 정점 방문하여 미량원소 시료의 청정도 신빙성 확보	0.1	GEOTRACES 상호 검정 정점 방문하여 과거 발표된 국외 결과와의 상호 비교 통해 이사부호의 청정 해수 채취 장비의 청정도 신빙성 확보	95
	3. 방사성 동위원소 추적자를 이용한 인도양 입자성 미량원소의 침강 및 해양 물질 순환 연구	3-1. $^{234}\text{Th}$ 추적자 관측 자료 해석을 통해 인도양 상층의 입자침강속도 및 체류시간 산정	0.2	$^{234}\text{Th}$ 추적자 자료 해석 및 수층에서 물질수지 모델을 이용하여 상층부에서 입자 침강 속도 예비 결과 산정 완료	100
		3-2. 미량원소 자료와의 결합을 통해 입자성 미량원소의 수층내 침강 거동 규명	0.3	$^{234}\text{Th}$ 추적자를 통해 계산된 입자 침강 속도에 대양의 미량원소 측정값 적용하여 인도양에서 입자상 미량원소의 해양 침강 속도 및 그 물질 순환 거동 예비결과 확보	100
	계			1.0	98

## 제 2절 연구개발의 대외 기여도

○ 본 연구 사업의 지원을 통해 본 사업연구 책임자가 본 과제와 연관된 대외 국제 연구 활동으로 GEOTRACES 국제 미량/동위원소 연구 프로그램의 한국 측 contact-point로서 GEOTRACES에 관련 활동 시작 (annual report 작성 및 공동연구 협의)

- 위 활동의 성과로, SCOR(국제해양과학협의회)에서 매년 발간하는 GEOTRACES-연차 보고서에 한국, KIOST의 이사부호 기반 대양/인도양 연구사업을 소개, 보고 함으로써, 국내 연구진으로부터는 처음으로 미량원소 관련 국내 연구 활동을 국제 사회에 보고 (2018.5)

- 금년도 관측을 포함한 2018년 연구성과는 차년도 보고서 (2019.5 예정)에 포함될 예정

### ANNUAL REPORT ON GEOTRACES ACTIVITIES IN ...

May 1st, 2017 to March 30th, 2018

#### South Korea

#### Cruises

- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) have conducted 1<sup>st</sup> yr Indian Ocean section cruise covering 5N to 16S (1 degree int.) in 67E (July 2 – 24). Scientists in KIOST successfully collected the clean seawater samples for trace metal analyzes at 7 stations (3 degree interval, 112 for dissolved- and 56 for particulate samples) in this cruise, including 1 GEOTRACES crossover station (5° 16', 67° 54' in GI02 cruise). Together with the trace Elements, on-board measurements of radioactive Th-234 tracer also was done in this cruise (at the same station with TE clean sampling)

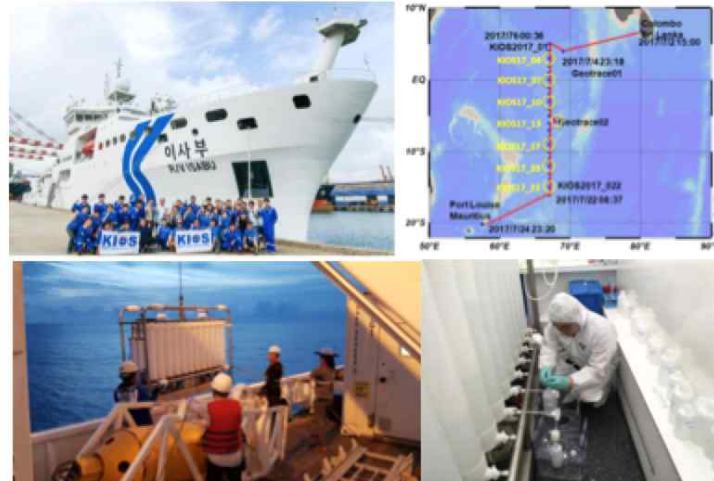


그림 4-2-1 2018년도 GEOTRACES annual report Regional Activity, 한국 측 연구 경과 보고서의 표지

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1절 연구 결과물의 활용성

- 대양 수층 내 미량원소 분포특성/물질순환 이해는 전지구적인 생태계 및 기후 변화에 있어 전략적 대응을 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.
- 1차/3차 생지화학 모델과 기후 진단 모델의 주요 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.
- 전 지구적 기후변화 및 인간활동에 따른 대양의 물질순환 이해에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- 극미량원소 분석 국제 경쟁력 확보와 GEOTRACES 프로그램에 대양연구 선도 기관으로 국제 인식 개선에 기여할 것으로 기대된다.
- GEOTRACES 프로그램의 SCOR미팅에서 발간하는 annual activity 연차보고서에 국내 활동 연구성과로 보고할 예정이다 (국내 최초 성과).

### 제 2절 연구 결과물의 활용 계획

#### 1. 기술적 파급 효과 및 활용 계획

- 대양 극미량원소 분석 능력 함양을 통한 대양 미량원소 관련 연구의 국제 경쟁력 확보와 국제해양프로그램인 GEOTRACES에 연구결과물 등재예정이다.
- 과제를 통해 확보한 미량원소 DB는 미량원소의 물질순환과정 이해, 해양환경 변동과 그 핵심요인을 파악함으로써 환경/기후변화에 대한 예측 및 대응방안 마련에 활용될 것으로 기대된다.
- 대양 극미량원소 연구기반 구축으로 국제적인 GEOTRACES 연구 선진국 도약의 기회를 제공할 것으로 기대된다.

#### 2. 경제적 파급 효과 및 활용 계획

- 대양의 입자 물질 순환 관련 기초 자료 제공을 통해, 해양 탄소 순환과 전지구적 기후 변화 예측 정밀도 향상에 기여할 것으로 기대된다.
- 신뢰성있는 해양자료 확보를 통해 해양정보 서비스 시장 발전에 기여 및, 극미량원소 연구수행 및 분석기술 선진화로 인해 관련 해양과학기술 및 산업발전에 기여할 것으로 기대된다.

#### 3. 사회적 파급 효과 및 활용 계획

- 국제 공동연구 프로그램인 GEOTRACES 관련 연구참여로 국제적인 위상강화에 기여할 것으로 기대된다.
- 기후변화와 관련된 해양의 변화에 대한 과학적 이해 증진 및 해양과학 분야의 국가 위상 제고에 기여할 것으로 기대된다.
- 기후변화 감시/예측능력 확보, 해양과학조사 역량 강화 등 급속하게 변화하는 지구 환경에 대응하는 지속가능한 인류공영의 신지식 창출에 기여할 것으로 기대된다.

## 제 6 장 참고 문헌

1. Owens, S. A., Pike, S., & Buesseler, K. O. (2015). Thorium-234 as a tracer of particle dynamics and upper ocean export in the Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 116, 42-59.
2. Subha Anand, S., Rengarajan, R., & Sarma, V. V. S. S. (2018). <sup>234</sup>Th Based Carbon Export Flux Along the Indian GEOTRACES GI02 Section in the Arabian Sea and the Indian Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(3), 417-436.
3. Vu, H. T. D., & Sohrin, Y. (2013). Diverse stoichiometry of dissolved trace metals in the Indian Ocean. *Scientific reports*, 3, 1745.

## 뒷 면

### 주 의

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