

BSPE99775-12224-1

저위도 인도-태평양 기후변화 변동성 연구

Study on Climatic Variability of
Low Latitude Indo-Pacific Ocean

2020. 02. 28.



한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “저위도 인도-태평양 기후변화 변동성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 02. 28.

총괄연구책임자 : 현상민

참 여 연 구 원 : 강정원, 문지은
박찬미, 송바름
조진형, 조호연

보고서 요약

보고서번호	BSPE99775-12224-1		연구기간	2017. 03. 01 ~ 2019. 12. 31	
연구사업명	주요사업				
연구과제명	저위도 인도-태평양 기후변화 변동성 연구				
연구책임자	현상민	참여 연구원수	총 : 7명 내부 : 2명 외부 : 5명	해당단계 연구비	정부: 114000천원 기업: 천원 계: 114000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 관할해역지질연구단		참여기업명		
위탁연구					
요 약			보고서면수		
<ul style="list-style-type: none"> • 저위도 인도양, 태평양, 중위도 동해지역에서 주상시료 코아 퇴적물 채취, 장-단주기 기후변화 변동성 연구 시료 확보 • 중위도(동해 울릉분지) 지역에서 주상시료 코아 퇴적물을 채취하고, 알케논 및 기타 지화학 프록시 분석을 통해 과거 50만년간의 고수온(paleotemperature)을 복원했음, 육상기원 유기물 프록시인 알케인 자료와의 비교연구를 통해 빙기-간빙기의 주기적 변화를 복원했음. • 동해 울릉분지 코아 퇴적물로부터 회토류 성분의 지화학적 프록시 연구를 통해 지난 50만년의 dust flux 변동성을 복원했음. • 저위도 태평양 지역에서 얻어진 코아 퇴적물을 분석한 결과 과거 약 100만년간의 퇴적기록을 알 수 있었으며, 유기물의 탄소동위원소 기록으로부터 과거 80만년 경에 극적 변화가 나타나고 있음을 알 수 있었음. 즉, 생물생산력의 차이나 기후변화와 해양환경변화가 동조하는 현상으로 해석되었음. • 태평양 지역의 MPT(mid-Pleistocene transition, 1.25~0.7 Myr) 시기에서 기존 PV090102과 GPC-4 코아간 Ba/Ti 비 피크가 일치하는 경향이 있으며, GPC-4 코아에서 MPT 이후 Ba/Ti 비의 증가는 dust flux 증가-고해양 생산성 간 피드백과 관계하는 것으로 보임. • 저위도 인도양 지역에서도 주상시료를 채취(PC18-3)하고, 시료분석이 진행 중. 간극수(water content)에 의한 예비적 고찰에 의하면 이 코아는 산소동위원소단계 13 정도로, 과거 약 50만년의 기록을 보유하고 있는 것으로 판단됨. 					
색인어	한글	기후변화, 저위도 인도-태평양, 자연기후 변동성, 기후변화 영향, 퇴적물, 동위원소			
	영어	Climate changes, Low latitude Indo-Pacific, Climatic variability, Climatic effects, Sediment, Isotope			

요 약 문

I. 제 목

저위도 인도-태평양 기후변화 변동성 연구

II. 연구개발의 목표 및 필요성

1. 연구개발의 목표

○ 인도양-태평양 기후변화 관련성 파악

- 중위도-저위도, 태평양-인도양, 아시안 및 인디안 몬순-저위도 기후 등

○ 저위도 인도양-태평양 자연 기후변화 장주기 변동성 파악

2. 연구개발의 필요성

- 최근 지구규모의 환경변화는 기후변화에 초점을 맞추고 있으며, 특히 대기-해양간의 상호작용에서 기후변화의 원인을 찾고 있음. 따라서 광범위에 걸친 지구규모의 연구가 절대적으로 필요함. 특히 저위도 지역은 잠재열량의 많아 대기 순환, 강수량 변화에 큰 영향을 미치고 있으며 그 중에서 저위도 인도-태평양 지역은 태평양과 인도양을 연결하는 열 교환 장소로 기후변화 연구에 최적의 장소로 간주되고 있음. 이들 기록은 중위도의 다른 지역과 비교연구를 통해서도 기후변화 변동성과 관련성 연구에 적합하다고 할 수 있음.
- 기후변화의 복잡성을 감안한다면, 변동에 대한 지역 간 관련성과 자연변동성을 우선적으로 파악 하는 것이 중요함. 또한 과거부터의 자연변동과 더불어 최근 인류세 (anthropocene)기간까지 기후변화 영향(생물생산 등)을 파악하고 그 결과를 복원하는 것은 기후변화 자체 및 궁극적 기후변화 예측을 위해 꼭 필요한 연구부분임
- 대기 dust는 복사강제력, 대기 화학성분 구성 등에 영향을 주며, 특히 해양생산성에 중요한 Fe 성분을 공급함으로써 해양 일차생산력과 기후변화 피드백에 중요한 역할을 함. 또한, 해양 코어퇴적물의 dust 변동성은 기후변화의 프록시로 과거 기후변화를 복원 하는데 중요한 정보를 제공 할 수 있음(그림 1).
- 이와 같이 기후학적, 해양학적으로 저위도 인도-태평양 지역은 중요한 연구대상지역으로 간주되고 있으며, 많은 연구사례가 있음. 따라서 위와 같은 연구를 통해 새로운 proxy에 대한 연구는 기초학문 수행능력을 제고하며 이 분야의 연구능력을 크게 향상시킬 수 있음.

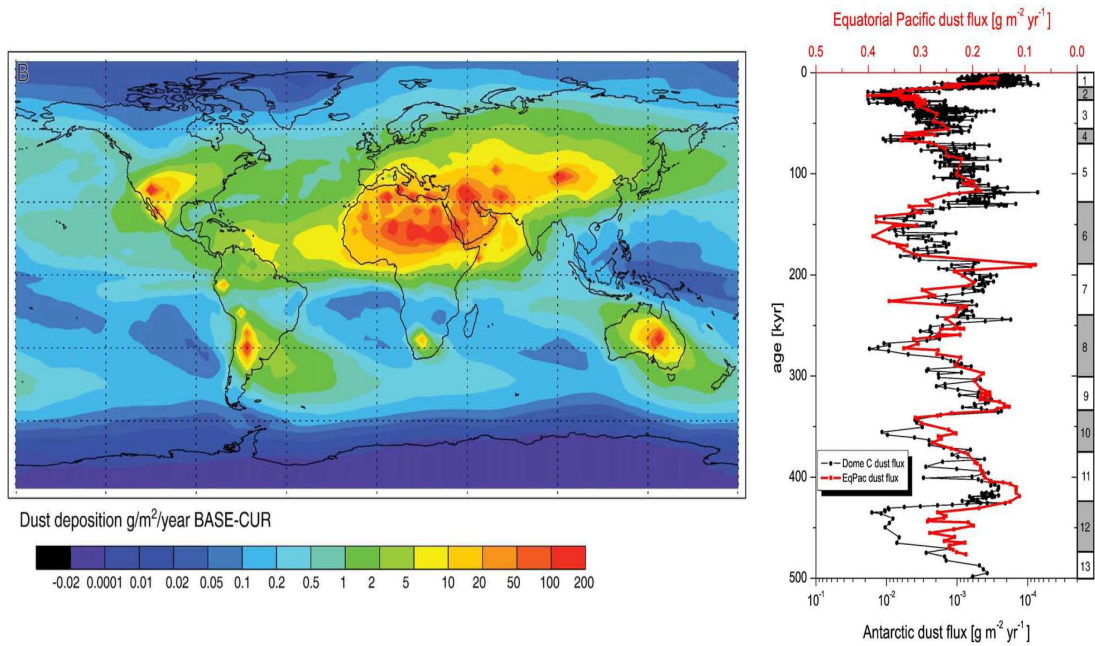


그림 1. 저위도 지역 dust flux(왼쪽)와 과거 적도태평양 지역 dust flux, 남극의 dust flux(오른쪽)(Maher et al., 2010)

- 최근의 모델결과를 참조한 기후변화 변동연구는 3차원적인 기후변화 예측 연구를 위해서는 상기 기술한 다양한 프록시 자료가 필요하며, 이 연구는 이와 같은 기본적인 자료를 제공하게 될 것임. 또한 이 연구를 통해 한반도의 기후변동성과 밀접한 상관성이 있는 서태평양, 저위도 지역의 해양환경, 자연기후 변동 양상을 파악함으로써 기후 예측 모델개발에 기초자료를 제공할 뿐만 아니라 기후변화 복원기술을 고양할 수 있음.

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 연구개발 내용

- 저위도 태평양(WPWP-Western Pacific Warm Pool(서태평양 워풀 지역), 동해포함) 및 인도양에 대한 퇴적물 시료 확보 및 기후변화 기록 중 장주기 자연변동성 파악, 위도간 기후변화 연동성 및 기후변화 영향 파악
- 퇴적물중 유기물의 탄소 및 질소 동위원소, n-alkane 및 알칸의 탄소동위원소, alkenones, 입도분석 및 각종 무기원소 분석, 기타 퇴적물 특성에 관한 다양한 분석 수행(대자율 및 퇴적층서 등).
- 위 분석들을 통하여 과거 표층 SST 복원 및 빙기-간빙기 변화(주기성) 복원, 육상기원 유기물 유입 및 식생변화 복원, 기후변화에 따른 육지dust 유입, 육상기원 유기화합물 유입 등 파악.

- 기존 확보된 아시안 몬순변화, 서태평양 기록과 비교연구를 통한 위도, 지역 간 기후변화 관련성 규명하고 도출된 자료를 이용한 기후변화 영향 파악(저위도 지역 퇴적물에 대한 고분해 연구)
- 상기와 같은 내용을 연구하기 위한 퇴적물 특성(퇴적학적) 연구, 퇴적물의 연대측정, 유공충의 산소 동위원소, 퇴적물의 유기물 동위원소, 무기원소 농도 변화, 각종 동위원소 기록 연구 등이 포함됨

2. 연구개발 범위

- 기존 동해 울릉분지 GPC 코아 분석
- 태평양과 인도양 GPC 코아 분석
- 저위도 인도네시아(Mahakam Delta) 지역 코아(인도네시아 MGI제공) 분석

IV. 연구개발 결과

1. 중-저위도간, 지역간 기후변화 관련성 규명

- 중위도 지역(동해)에서 과거 60만년에 걸친 SST 기록 복원
- 전형적인 빙기-간빙기 패턴과는 약간 다른 양상을 보임, 지역적인 영향으로 판단됨

2. 남서태평양 WPWP의 변동성과 기후변화 요인 관련성 규명

- 서태평양 코아에 대해 과거 약 100만년의 기록이 복원됨
- B/A경계를 중심으로 탄소 및 질소 동위원소의 점이적 변화가 관찰됨
- 특히, 무기원소기록과 비교에서, dust-flux와 고해양 생산성 증가의 관계가 보이며, 장기적인 관점에서 기후변화 요인과 관련있는 것으로 판단됨

3. 장주기 자연 기후 변동성 복원 및 기후 변동영향 파악

- 개괄적으로 장주기 변동은 중-저위도 공히 나타나고 있음
- 그러나 지역적 여건을 고려하여 miner 변동도 보임. 추가되는 자료를 이용하여 장주기 기후변동성 파악에 노력을 할애할 필요가 있음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 국가의 기후변화 대책에 기본 자료 제공
- 광범위에 걸친 기후변화 및 영향 파악, 정책자료로 활용
- 범지구적 기후변화 대책에 유용한 장기적인 R&D 개발에 활용

목 차

요 약 문	i
목 차	v
그림목차	vi
표 목 차	viii
제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구의 목적 및 필요성	1
제 2 절 연구의 내용 및 범위	4
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	5
제 1 절 국내 연구 동향	5
제 2 절 국외 연구 동향	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
제 1 절 중위도(동해) 코아 퇴적물(GPC-2B)에 대한 연구	10
제 2 절 저위도(ITF지역, 필리핀 해) 코아 퇴적물에 대한 연구	16
제 3 절 코아 퇴적물의 dust flux 연구	23
제 4 절 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803) 분석	35
제 5 절 결론	38
제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도	39
제 1 절 연구개발 목표달성도	39
제 2 절 대외기여도	39
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	41
제 6 장 참고문헌	42

그림 목 차

그림 1. 저위도 지역 dust flux와 과거 적도태평양 지역 dust flux, 남극의 dust flux	ii
그림 2. 위도 지역. WPWP 및 동인도양 지역에 걸쳐있는 온난수괴(WPWP)의 분포	2
그림 3. ITF 지역과 이사부-GPC에 의한 코아 퇴적물 연구지역	2
그림 4. 수온과 염분 분포	3
그림 5. 동해에서 이사부호를 이용한 GPC 코아의 분석	5
그림 6. 저위도 태평양에서 과거 160만년간의 SST 변화(10만년, 4만년 주기)	7
그림 7. 북서 및 북동 태평양 가장자리 해역에서 복원된 알케논 수온과 저서유공충 산소동위원소비의 비교	8
그림 8. 지난 20만년 동안의 동해 쇄설성 퇴적물 내 황사 유입의 변화	9
그림 9. 육상기원 유기물(leaf wax) 추출과 기후변화의 관련성	9
그림 10. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 주상도	10
그림 11. 동해 코아(MD01-2407)의 연대 모델	11
그림 12. L* 값의 대비와 두 코아간의 L* 대비	12
그림 13. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 TOC(%), d ¹³ C, d ¹⁵ N 및 alkenones-based SST	13
그림 14. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 alkenones-based SST와 n-alkanes 및 ACL(average chain length)	13
그림 15. 중위도(동해) 울릉분지에서 얻어진 GPC-2B 코아에 대한 산소동위원소 단계와 각종 프록시 데이터	14
그림 16. GPC-2B 코아에서 SST와 대비시킨 n-alkanes 프록시 데이터	15
그림 17. ITF 지역에서 얻어진 코아에 대한 기록	16
그림 18. 저위도 ITF 지역에서 얻어진 코아 위치도(1번: LP-1915 코아, 3번: Aru-02, 07 코아)	17
그림 19. 인도네시아 Aru-02 지역에서 얻어진 코아에 대한 프록시 데이터	17
그림 20. TOC(%), 탄소동위원소 및 n-alkanes 총 농도(Aru-07)	18
그림 21. 인도네시아 Aru-07 코아의 프록시 데이터	18
그림 22. 인도네시아 Mahakam delta에서 얻어진 코아에 대한 최근 600년 아래의 프록시 데이터	19

그림 23. 저위도 남서태평양에서 얻어진 코아(GPC-4) 위치도	19
그림 24. 남서태평양 코아 GPC-4에 대한 대자율 측정값	20
그림 25. GPC-4 코아 유기물의 질소 및 탄소동위원소	21
그림 26. 태평양 코아 퇴적물(GPC-4)의 SST 및 alkanes 분포	22
그림 27. 동해 울릉분지의 코아 퇴적물(GPC-2B) 위치도	23
그림 28. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 조성 및 조직변수 분포	24
그림 29. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 원소성분 분포도	26
그림 30. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 Ce*와 Eu* 변화	27
그림 31. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 XRF core scanner와 습식분석 비교	28
그림 32. 25만년 동안의 ODP 7907과 GPC-2B 간 dust flux 변동성 비교	30
그림 33. 동해 IODP U1427과 GPC-2B 간 지화학 proxy 비교	31
그림 34. 태평양 코아 퇴적물(GPC-4)의 조성 및 조직변수 분포	32
그림 35. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 원소성분 분포도	33
그림 36. Parece Vela 분지의 PV090102와 GPC-4 간 Ba/Ti 변화 비교	34
그림 37. 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803) 위치도	35
그림 38. IODP Site 758 지점 위치도	36
그림 39. IODP Site 758 지점의 산소 동위원소비	36
그림 40. 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803)의 함수율과 4 Φ 이상 분포도	37
그림 41. GPC-1803 코아에서 진행중인 유공층 군집분석(assembly)	37

표 목 차

표 1. XRF-core scanner를 이용한 다양한 해양환경 해석용 parameters	29
----------------------------------------------------------	----

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 최종목표

- 저위도 인도-태평양 기후변화 관련성 파악
 - 중위도-저위도, 태평양-인도양, 아시안 및 인디안 몬순-저위도 기후 등
- 저위도 인도-태평양 자연 기후변화 장주기 변동성 파악

2. 연구사업의 필요성

- 저위도 인도-태평양 지역 자연 기후변화 장주기 변동성 파악
 - 저위도 지역인 서태평양 워풀 지역(Western Pacific Warm Pool; WPWP)과 인도네시아 통과류(Indonesian Through Flow; ITF) 지역, ITF지역과 인접한 동인도양을 포함하는 저위도 지역은 지구적 규모의 열 공급역임과 동시에 범지구적 기후변화의 조절지역으로 평가받고 있다. 따라서 이들 지역에 대한 과거의 해양환경 변동은 과거의 기후변동과 밀접한 관계가 있으며, 길게는 수 만년, 짧게는 년 단위 간격을 두고 상관 변동을 보이고 있다.
 - 저위도 남태평양 수괴가 ITF를 통과하면서 아시안 몬순의 기후변화 기록을 남기고, ITF지역 강우의 영향을 받아 통과류의 지화학적 특성이 달라진다. ITF를 통과한 해수는 인도몬순에도 영향을 주는 것으로 알려지고 있기 때문에 저위도 남태평양, 동인도양 지역은 장주기에 걸친 기후변화 변동성, 단주기의 기후변화 영향과악에 매우 중요하다.
- 인도양-태평양 기후변화 관련성 파악
 - 해양 및 기후변화는 지역적 현상으로 국한되지 않고 광범위한 지역의 현상을 반영하는 특성이 있으며, 범 지구적 규모에서 연동되어 있으므로 태평양-ITF-인도양에 이르는 광범위 지역에 대해 다양한 프록시를 이용해 연구할 필요성이 있다.

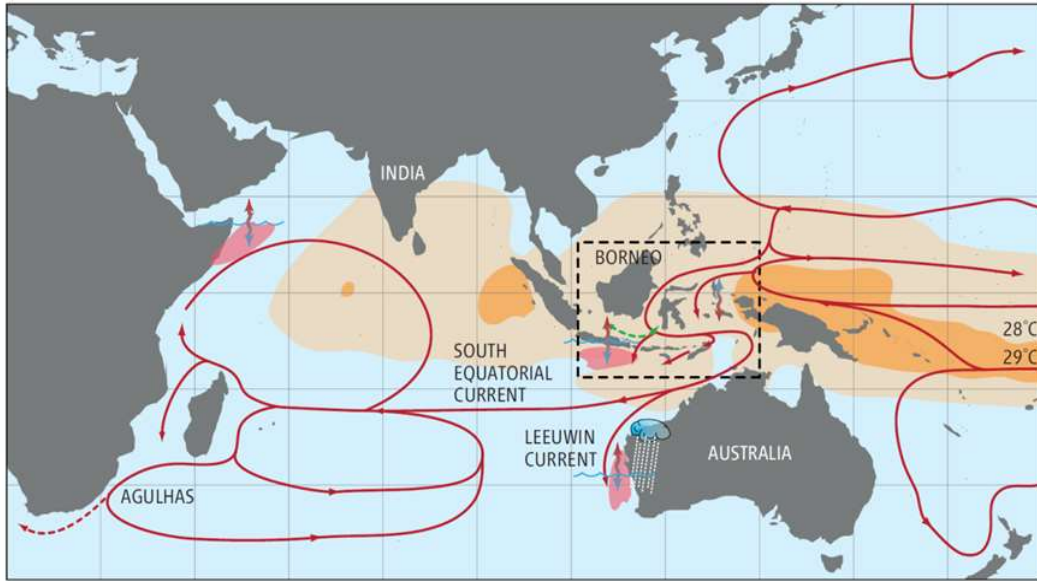


그림 2. 위도 지역, WPWP 및 동인도양 지역에 걸쳐있는 온난수괴 (WPWP)의 분포.

○ 저위도 지역 기후변화 영향 파악(e.g., 생물생산 등)

- 태평양 해수가 ITF 해수의 공급역할을 하며, 이 중 약 25% 정도의 북태평양 수온 약층 및 중층수가 필리핀 남부의 Mindano 해류가 ITF에 영향을 준 후 그 지역에서 이루어진다. 인도네시아 지역에서 지역적 강수의 영향을 받아 수괴특성이 변질되게 된다. 그러므로 북태평양의 순환수, ITF로 유입되는 해수, ITF를 통과하는 해수의 특성이 각각 다르며, 이들 해수특성의 각 지역의 기후변화 영향을 반영하는 것으로 보고되고 있다.

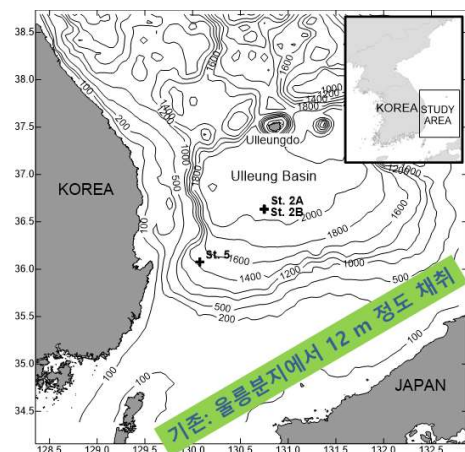
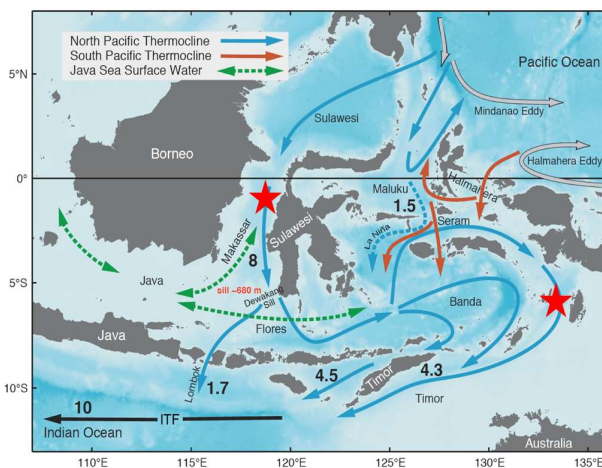


그림 3. ITF 지역과 이사부-GPC에 의한 코아 퇴적물 연구지역

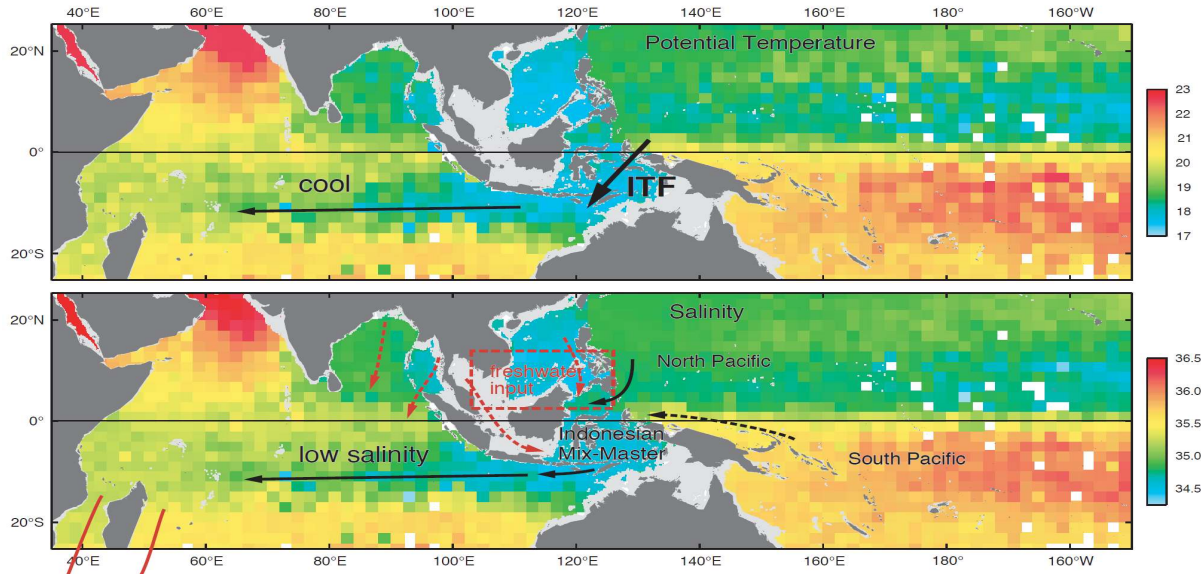


그림 4. 수온(상)과 염분(하) 분포(Gordon, 2005). 수온-염분 분포는 태평양-인도양을 연결하는 형태이며, ITF 지역에서 강수에 의해 저온, 저염수가 인도양쪽으로 전달된다.

- 모델연구 결과 ITF는 인도양, 태평양의 열류량이나 담수수지에 영향을 주고, 지구 기후시스템에 영향을 주는 것으로 보고되었다. 해양 열류량, 담수가 인도양으로 유입되면서 대기-해양간의 상호작용에 영향을 주고, ENSO나 몬순현상에 영향을 준다고 보고되고 있다(Webster et al., 1998). 그러나 ITF의 on/off에 따라 이러한 기후시스템의 변화와 불명확하다는 견해도 있다.
- 따라서 지역적인 기후변화 현상을 이해하거나 지역간, 위도간 기후변화의 연관성, 해양현상 등 제 기후학적 현상을 이해하기 위해서는 태평양-인도양을 연결하는 저위도 WPWP지역, ITF지역, 중위도(동해)에 대한 연구가 필수적이다. 퇴적물을 이용하여 과거의 특정시기의 SST를 복원하고, 기후변화와 관련하여 육상기원 유기물의 유입, 무기물의 시간대비 유입(flux)를 파악할 필요가 있다. 최종적으로 이렇게 도출된 제 정보를 이용하며, 장주기에 걸친 기후변화의 자연변동성을 파악하고, 장-단주기에 걸친 기후변화 영향을 파악할 필요가 있다.

제 2 절 연구의 내용 및 범위

년 차	연구/사업의 수행내용	구체적인 수행방법 (이론적·실험적 접근방법명 등)
2017	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이사부호에 의한 태평양 지역 퇴적물시료 확보 (기타 관련지역 시료확보) ○ 저위도 태평양 지역 고기후/고해양 변화 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 연구지역에 대한 퇴적물 시료 확보, 선상 및 실험실에서 기초분석 - 퇴적물 시료에 대한 퇴적학적 기초실험, 일부시료에 대한 alkenones, n-alkanes 분석
2018	<ul style="list-style-type: none"> ○ 태평양지역 시료에 대한 SST복원, 관련성 파악 ○ 태평양, 인도양 지역 육상기원 물질별 파악 ○ 저위도-중위도간 기후변화 자연변동성 파악 ○ 인도양 코아 채취 	<ul style="list-style-type: none"> - 퇴적물에 대한 alkenones 분석을 통한 SST 변화 복원 및 기존연구와의 비교를 통한 관련성 파악 - n-alkanes 분석을 통한 육상기원 유기물 파악 - 무기 원소분석을 통한 dust 유입량 파악 (태평양) - 저위도-중위도간 후기 플라이스토세 이후 고환경 변화 비교 분석 - 기초 퇴적학, 지화학 분석
2019	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저위도 인도-태평양 시료에 대한 SST, SSS 변화 복원 ○ 퇴적물 시료에 대한 dust flux, 육상기원 유기화합물 flux 파악 ○ 도출된 proxy를 이용한 장주기 자연 기후 변동성 파악 ○ 인도양 코아에 대한 유공층의 산소동위원소 분석, 층서확인(진행 중) 	<ul style="list-style-type: none"> - 태평양 GPC 코아에 대한 추가 분석 - 인도양 GPC 코아에 대한 분석(n-alkanes, alkenones 등) - 태평양과 인도양 GPC 코아에 대한 SST, SSS를 복원하여 고환경 변화 복원 - 태평양, 인도양 코아에 대한 무기물 분석. 지화학적 파라메타를 이용하여 dust flux 파악, 기후변화 파악 - n-alkanes에 의한 유기화합물의 유입 flux 파악하고 무기원소 유입과 비교연구 - 도출된 각종 proxies(유, 무기물 flux, SST 변화 등)를 이용하여 저위도 인도-태평양 지역의 자연 기후 변동성 파악

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구 동향

○ 저위도 워플 및 인도네시아 통과류 지역에 대한 연구의 태동단계

- 기후학적으로 연구대상인 저위도 태평양-인도양에 걸쳐있는 WPWP 지역, ITF 지역은 그 중요성이 충분히 인정되고 있으나 지리적 여건으로 인해 이 지역에 대한 고환경 및 고기후학적 연구는 매우 빈약한 형편이다. 그러나 최근 국제공동연구의 하나인 IODP가 이들 지역에 대해 시추계획을 승인함에 따라 국외 학자가 중심이 되어 IODP에 의한 심해시추가 수행되었고 2017년 분석이 진행되었다.
- 이에 따라 국내 타 기관에서 이 연구(EXP 363)에 승선하여 승선연구가 이루어졌으며, 적절한 절차를 거쳐 고기후/고해양에 대한 연구가 이루어 질 것으로 예상된다. 동해에서는 이사부호를 활용한 코아가 시험항해 동안 취득되었고 현재 연구가 진행중에 있으며, 좀 더 세밀한 연구를 필요로 한다.
- KIODP의 협동연구(해양과기원 현상민)에서는 이사부호에 의해 취득된 동해 GPC 코아 퇴적물과 마하캄델타 시료를 획득(인도네시아 MGI)하여 공동연구 형태로 연구를 수행하고 있으며(그림 3), 그 외 ITF 지역에 대해서도 코아 퇴적물을 습득하여 분석을 진행하고 있다.

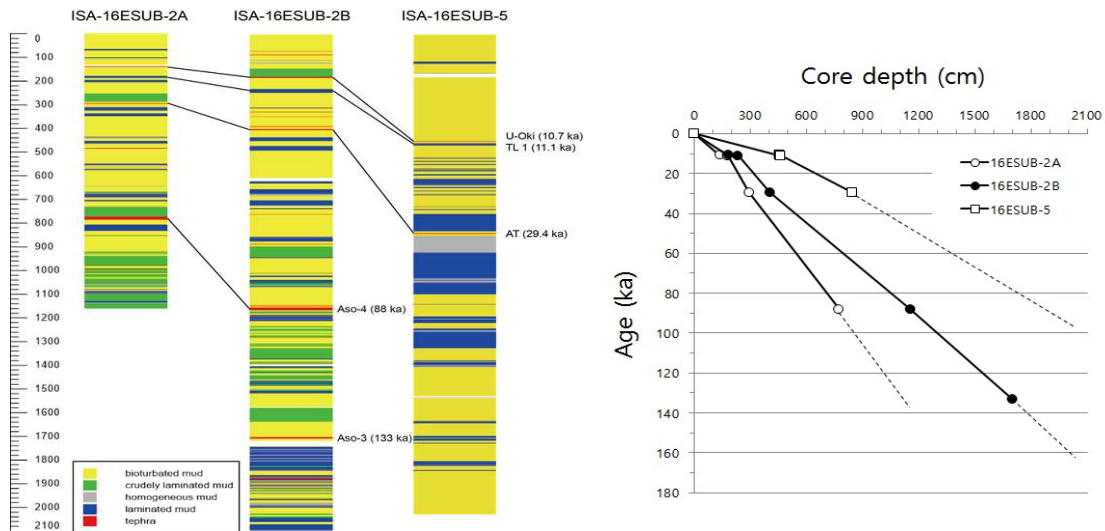


그림 5. 동해에서 이사부호를 이용한 GPC 코아의 분석. 계분석을 통해 연대 및 층서설정이 다소 다르게 이루어졌다.

○ 범지구적 기후변화 연구를 위한 국내외 과제 진행 중

- KIOST에서는 이사부호의 건조 등과 맞추어 대양연구에 중심을 두고 있다. 특히 2017년부터는 이사부호를 활용한 연구과제가 발굴될 것으로 기대되는바 이에 상응하는 과제를 제안하게 되었다.
- 또한 원활한 연구진행(피스톤 코아 채취 등 공동연구)을 위해 저위도 지역, WPWP나 ITF 지역에 대한 연구를 용이하게 수행하기 위해 편리한 인도네시아 MGI(해양지질 연구소)와 협력관계(MoU)를 구축하고 있으며, 이 지역 연구에 많은 성과가 있는 Woods Hole 해양연구소의 연구원과의 자료공유를 진행했다.

제 2 절 국외 연구 동향

○ 중, 저위도 고해양/고기후 연구

- 이미 수 년 전에 유럽연구팀이 주도된 국제공동연구(IODP, IMAGE)에 의해 중저위도 태평양, ITF지역에 대한 시추가 이루어졌고 그 연구결과가 일부 도출되었다. 대표적인 연구결과 중의 하나는 이미 3-4백만년 전에 Indonesian seaway가 닫히면서 기후변화가 일어나고 아프리카의 건조화가 시작되었다는 연구결과가 있다(Cane and Molnar, 2000). 또한 적도태평양 양단의 SST변화가 과거 수백만년 동안 크기를 달리 하면서 변화하고 있음이 밝혀졌으며(Garidel-Thoron et al., 2005), ITF지역에서 Zuraida 등(2009)은 북대서양의 대표적 기후변화 기록인 Heinrich events 3-5사이에는 ITF의 속도가 느려지고 있다는 보고했다.
- 또한 Oppo와 Rosenthal(2010)은 “The Great Indo-Pacific Communicator”라는 논문에서 ITF가 궁극적으로 인도네시아 다도해 지역을 통과하면서 주변에 뚜렷한 기후변화를 야기시켰다고 주장하고 있다. Oppo 등(2009)은 과거 2000년 동안 이 지역의 수온변화를 복원하여 과거 소빙하기인 Little Ice Age(약 AD 1550-1850) 동안에는 현재보다 0.5~1°C 정도 SST(Sea Surface Temperature)가 내려갔음을 발표하였고, 산소동위원소와의 비교연구를 통해 동아시아의 몬순시스템과 매우 유사한 거동을 보이고 있음을 보고하였다.
- 대표적인 국제공동연구인 IODP(International Ocean Discovery Program)에서는 Western Pacific Warm Pool(WPWP)를 주제로 2016년 9월 30일부터 11월 30일 사이에 ITF 지역 주변에 대한 시추제안서를 승인했고, 2016년 12월 8일 시추가 완료되는 등 지금까지 연구가 미진했던 지역에 대한 국제적인 연구가 활발하게 진행되고 있다.

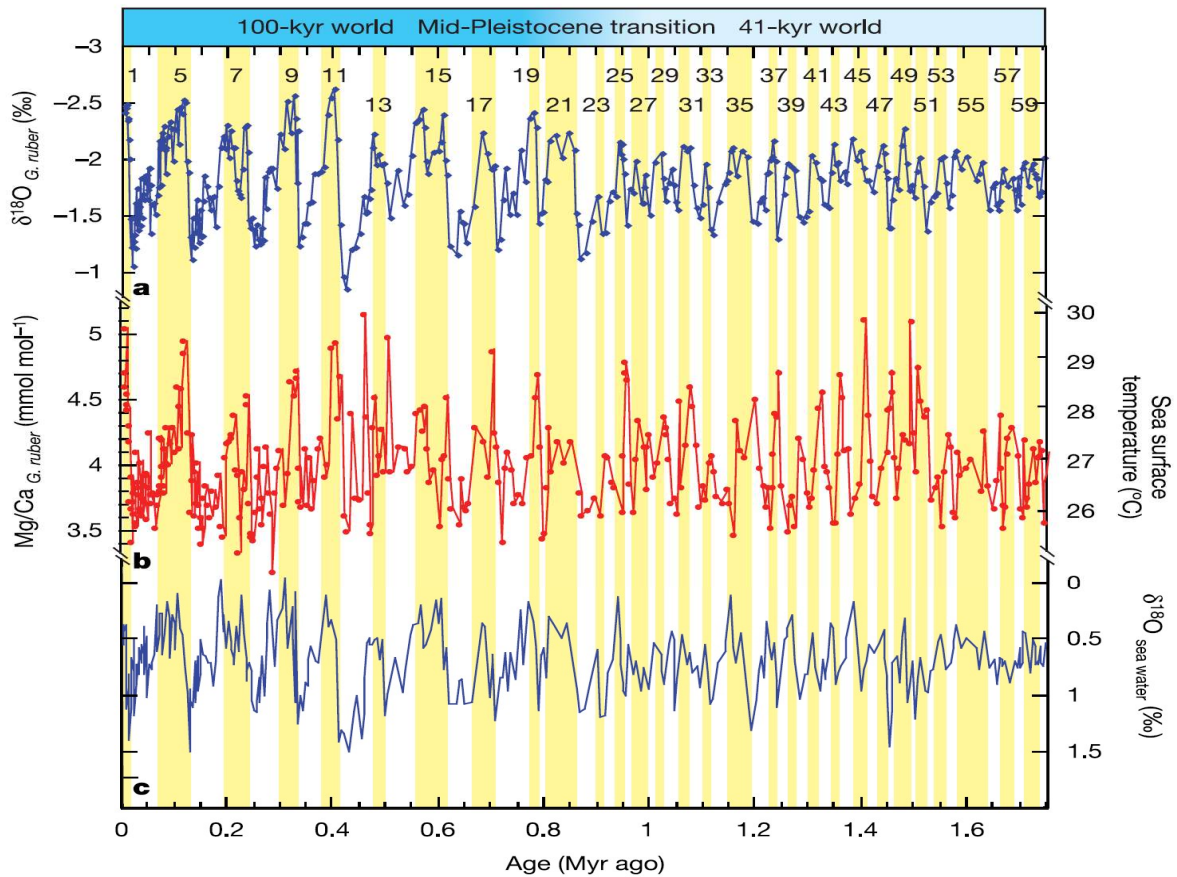


그림 6. 저위도 태평양에서 과거 160만년간의 SST 변화(10만년, 4만년 주기)

○ SST 복원을 위한 proxy 연구: Alkenones

- Prymnesiophyte(*Emiliana huxleyi*)를 10°C와 25°C의 수온 조건에서 각각 배양하여 얻어진 *Emiliana huxleyi*의 세포들로부터 추출한 알케논(C₃₇)중 이중결합이 2개인 C_{37:2}와 3개의 이중결합을 갖는 C_{37:3}의 농도비가 성장온도에 따라 크게 바뀌었다는 것을 보여준다.
- 상대적으로 낮은 수온에서 성장한 *Emiliana huxleyi*의 세포에서는 C_{37:2}보다 C_{37:3}의 농도가 높게 나오는데, 이것은 수온 변화로 인한 환경 스트레스로부터 세포막의 유동성을 유지하기 위해 세포막을 구성하는 지질의 분자 조성(불포화도)을 변화시키는 것으로 해석된다.
- 같은 Prymnesiophyte의 수온에 관한 적응성과 그로 인한 유기분자화합물 조성변화를 이용하여 기후변동을 평가하기 위한 새로운 방법으로서 알케논이라고 하는 독특한 중성지질의 분자화합물을 이용한 다양한 연구들이 전 세계의 여러 해양에서 진행되고 있다(Ternois et al., 1997; Sikes et al., 1997; Sawada et al., 1998; Bentaleb et al., 1999; Harada et al., 2001).
- 알케논을 활용한 고수온 복원과 함께 북태평양의 고기후 변동을 본격적으로 고찰하기 시작한 연구가 일본 홋카이도대학의 Yamamoto 교수 등에 의해 수행되어 지난 14만

5천년동안 중위도 북태평양의 일본과 캘리포니아 해역에서 복원된 후 4기 동안의 알케논 표층수온기록이 orbital-scale anti-phase(east-west seesaw-like) 변화를 나타내었는데, 이는 장주기 El Nino-Southern Oscillation(ENSO)과 잘 일치한다. 이와 같은 결과는 중위도 북태평양에 열대 기후 역학의 영향이 빙기와 간빙기 주기에 대한 변화라고도 설명된다(Yamamoto et al., 2004).

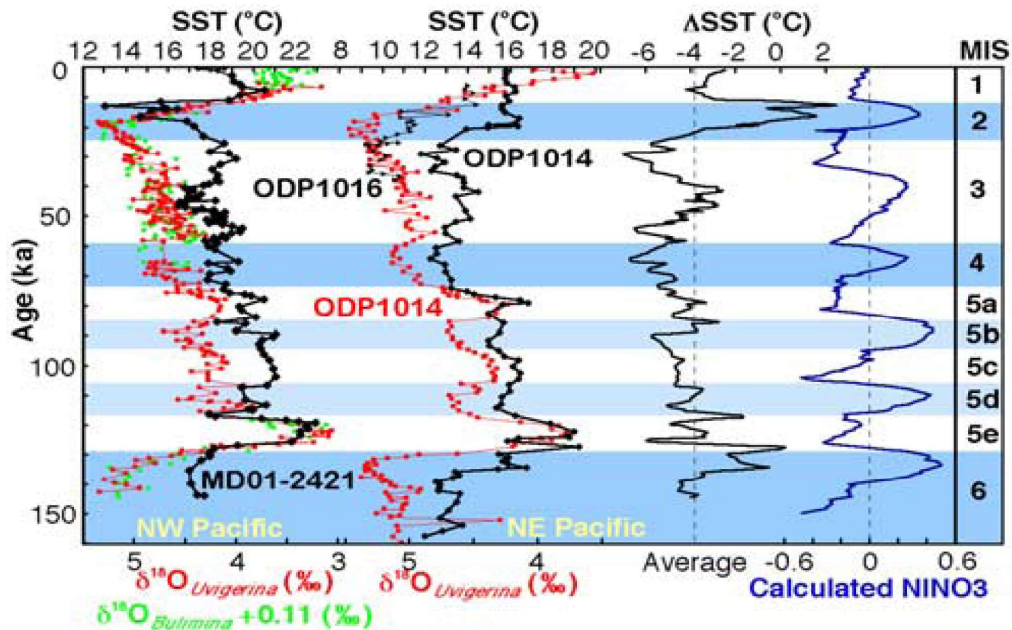


그림 7. 북서 및 북동 태평양 가장자리 해역에서 복원된 알케논 수온과 저서유공충 산소동위원소비의 비교(Yamamoto et al., 2004)

○ 해저퇴적물의 dust flux 연구

- 과거 30만년 기간 동안의 오스트레일리아 대륙으로부터 유입된 dust는 해양 코어 퇴적물의 50~80%정도 차지를 하였으며, 지난 180,000년부터 현재로 오면서 오스트레일리아 기후가 건조되어 왔음이 밝혀졌다(Liu et al., 2015).
- 빙상 코어의 기록에서도 dust 기록은 기후변동과 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 밝혀졌으며, 철성분과 같은 영양염을 바다로 운송하며 기후변화 및 해양환경, dust 등의 공급지 등 다양한 분야의 연구에 활용되고 있다(Lambert et al., 2008).
- 지난 20만년 동안의 동해 퇴적물에서 황사 유입의 변화(Irino and Tada, 2000), 쇄설성 퇴적물의 30~58% 정도 차지하며 백만년 규모의 변화뿐만 아니라 빙기-간빙기 변화를 잘 반영하였다.

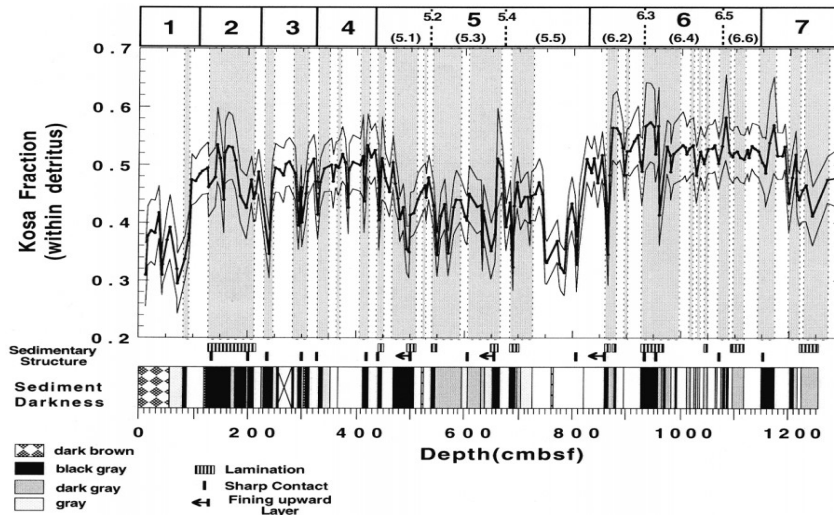


그림 8. 지난 20만년 동안의 동해 쇄설성 퇴적물 내 황사 유입의 변화

○ land-ocean linkage 연구를 위한 proxy 연구: n-alkanes

- 유기화합물의 일종인 n-alkanes은 육상에서 기인한 leaf wax의 공급지시자로 해양 퇴적물에서 이를 검출하고 동정하는 과정을 거쳐, 과거 육상기원 유기물의 기원, 공급 등에 대한 많은 정보를 제공하기 때문에 기후변화 연구와 관련하여 자주 이용되고 있다(Ahad et al., 2011; Ohokouchi et al., 1997).
- 특히 탄소화합물은 생성과정에서 특정한 환경을 지시하기 때문에 n-alkanes의 탄소 동위원소(compound-specific carbon isotope)를 측정함으로써 그 기원과 공급경로 등을 파악할 수 있어, 공급지의 건조되는 정도(온난 정도)를 파악하는데 중요한 정보를 제공한다(Yamamoto et al., 2010).
- 따라서 육지기원 유기화합물의 다양한 종류를 분석함으로써, 육지-해양간 육지기원 유기화합물의 기원 등을 정량적으로 파악할 수 있으며, 무기물(예를 들어 dust)과 비교 연구를 통해 고기후 변화 등에 대한 정보를 획득 할 수 있다.

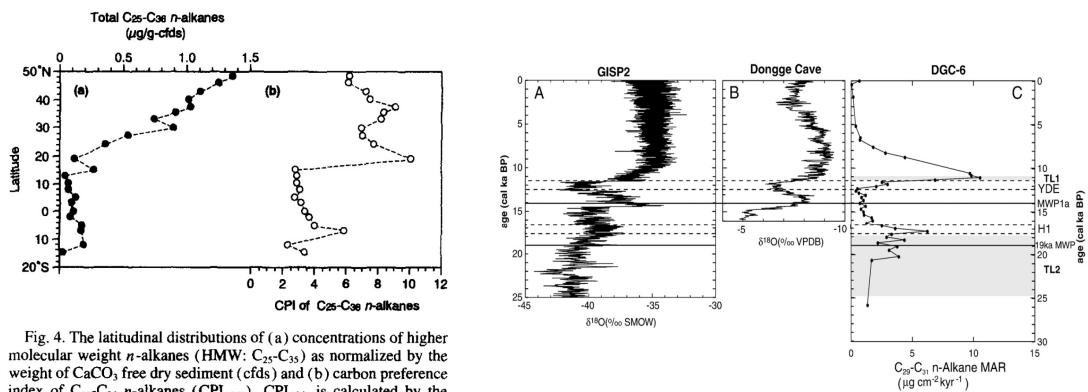


Fig. 4. The latitudinal distributions of (a) concentrations of higher molecular weight n-alkanes (HMW: C₂₅-C₃₅) as normalized by the weight of CaCO₃ free dry sediment (cfds) and (b) carbon preference index of C₂₅-C₃₆ n-alkanes (CPI_{ALK}). CPI_{ALK} is calculated by the above equation.

그림 9. 육상기원 유기물(leaf wax) 추출과 기후변화의 관련성(Yokoyama et al., 2010)

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 중위도(동해) 코아 퇴적물(GPC-2B)에 대한 연구

(1) GPC-2B 코아 해석 및 연대설정을 위한 퇴적상 해석

- GPC-2B 코아는 입도와 색상, 내부 퇴적구조의 분석에 의하여, 생물교란된 머드(bioturbated mud), 희미한 층리가 발달된 머드(crudly laminated mud), 테프라(tephra) 및 균질니(homogeneous mud)와 층리니(laminated mud) 등의 퇴적상이 관찰되었다.
- 울릉분지에서 생물교란된 머드가 우세하며, 분지에서는 퇴적물이 다소 낮은 안정된 환경에서 산소환경 또는 저산소환경에서 원양성 또는 반원양성 퇴적작용에 의해서 형성되었다(천종화 등, 2006).
- 상기와 같은 퇴적상 변화는 고해양환경변화, 고기후환경변화 등과 관련되어 기록된 것으로 유/무기 지화학 조사를 통해서 환경변화 해석을 하기 위한 기초조사이다.

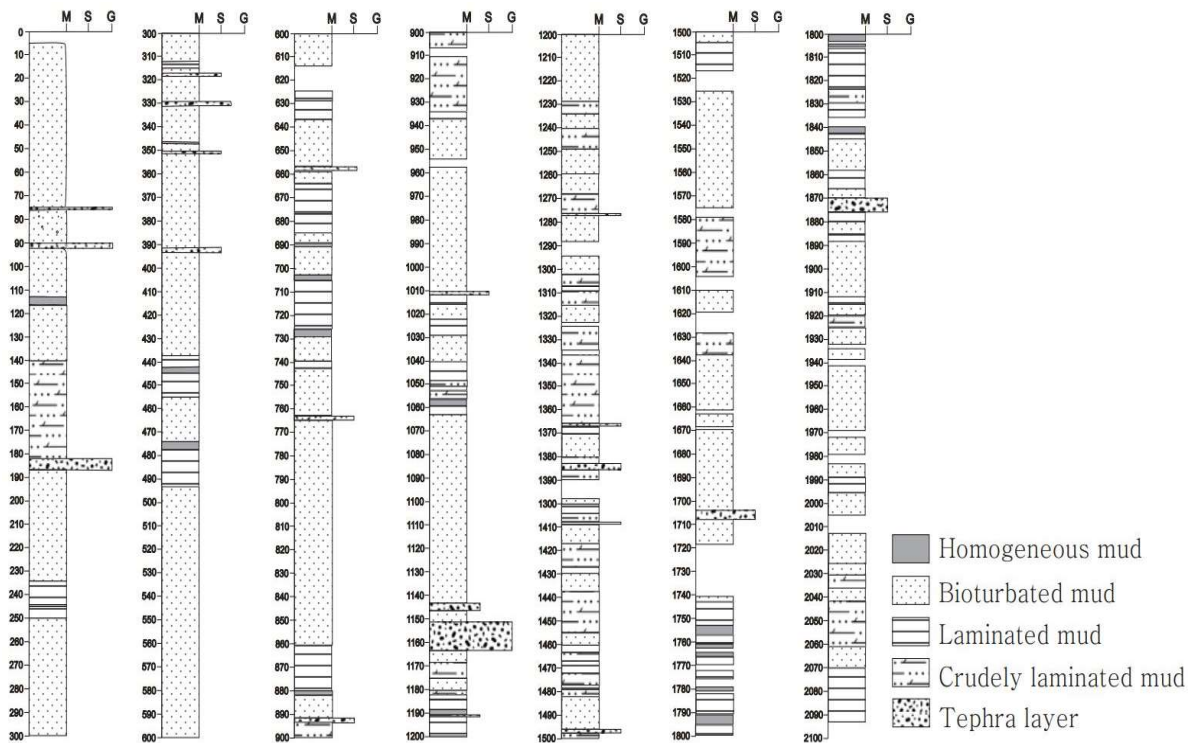


그림 10. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 주상도

(2) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B) 층서 및 연대모델

- GPC-2B 코아의 연대 설정을 위해 퇴적물의 L* 값을 이용하였으며, 기존의 검증자료로 Yamato Rise(Khim et al., 2014)와 Oki Ridge(Kido et al., 2007)에서 분석한 연대와 대비하여 약 60만년 연대를 설정하였다(그림 10). Kido et al., 2007 코아의 연대설정은 L*값과 산소동위원소 값을 기준으로 연대를 결정했고(그림 11), 다시 GPC-2B 코아는 MD01-2407 코아의 L*값을 대비하여 연대를 결정했다. 또한 동 코아에서 얻어진 alkenones에 의해 복원된 SST 변화도 참조로 하여 결정되었다.
- 동해의 탄산염 보상심도(CCD: carbonate compensation depth)는 약 1700 m로 간주되고 있어서 이 코아를 채취한 심도가 2000 m 이상인 점을 고려하면, 탄산염의 용해가 예상되는 지역이다. 실제 탄산염 함량은 변화폭이 매우 커서 연속적인 산소동위원소 측정에 어려움이 따른다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서, 정확한 층서를 결정하기 위해서 alkenones 분석에 의한 SST 복원으로 연대를 결정하게 되었다. 따라서 이 연구에서는 기존 Kido et al., 2007의 결과, L*, 알케논 SST 변화로 층서를 설정했다.

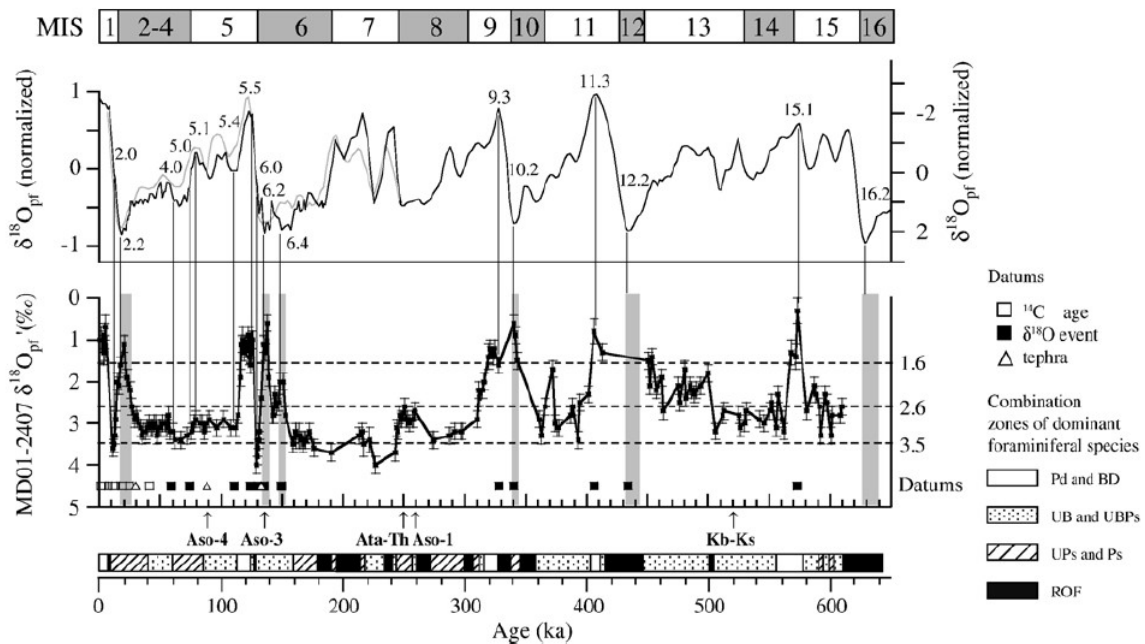


그림 11. 동해 코아(MD01-2407)의 연대 모델. 중위도 동해 2B 코아는 MD01-2407 연대 층서와 대비해서 이루어졌다.

- GPC-2B 코아는 퇴적층 약 3.8 m 깊이에서 해양동위원소 단위(Marine Isotope Stage; MIS) 5에 해당하며(약 12만 5천년), 깊이 약 15 m에서 MIS 15/16의 경계로 판단된다. 따라서 약 60만년 이래의 고해양/고기후 기록복원에 유용하다.

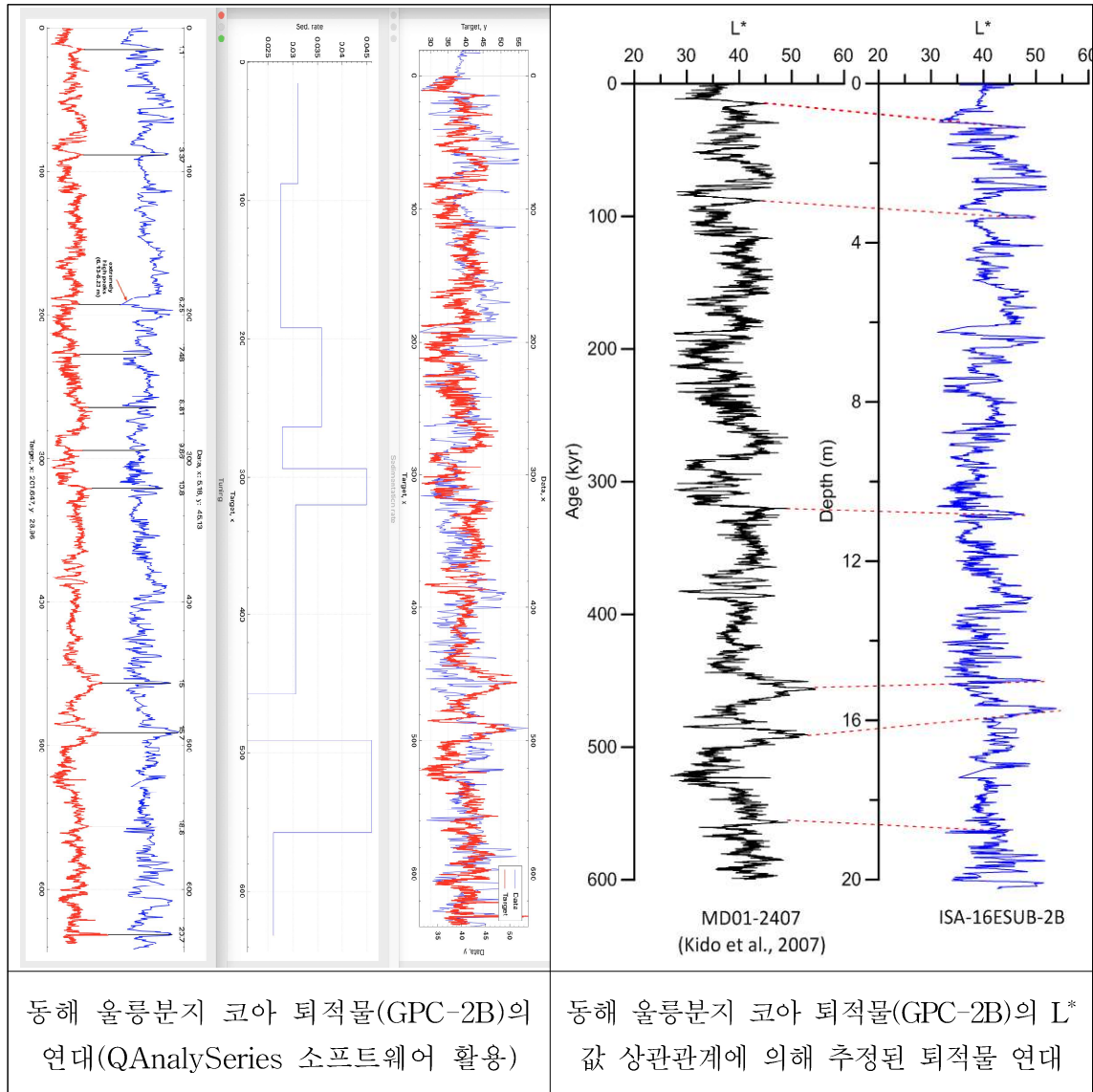


그림 12. L* 값의 대비와 두 코아간의 L* 대비

(3) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 알케논 및 알케인 분석

- Alkenone SST 복원: 퇴적물 중의 생물기원 화합물인 alkenones는 과거의 SST 변화 등을 복원하는데 유용하게 쓰인다. 이 연구에서도 alkenones에 의한 과거의 SST가 복원되었으며, 그 결과에 의하면 과거 60만년에 걸친 빙기-간빙기간 SST변동이 나타나고 있으며, SST의 주기적 변동 파악을 할 수 있었다.
- Alkenones와 더불어 육상기원 물질의 유입을 파악할 수 있는 n-alkanes 파악하여 빙기-간빙기간에 걸친 육상기원 유기물 유입을 파악했다. 빙기-간빙기간 기후 변화에 따른 육상기원 유기화합물(n-alkane compound)의 유입 변화 파악할 수 있었다 (그림 12).

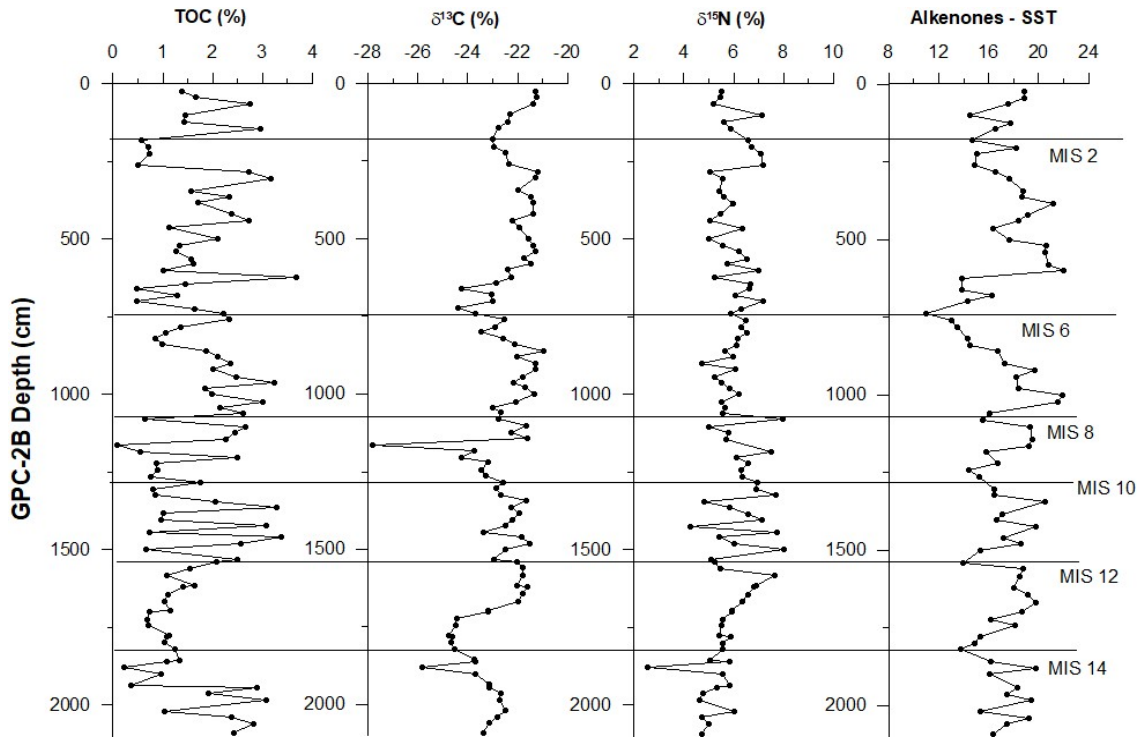


그림 13. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 TOC(%), $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 및 alkenones-based SST

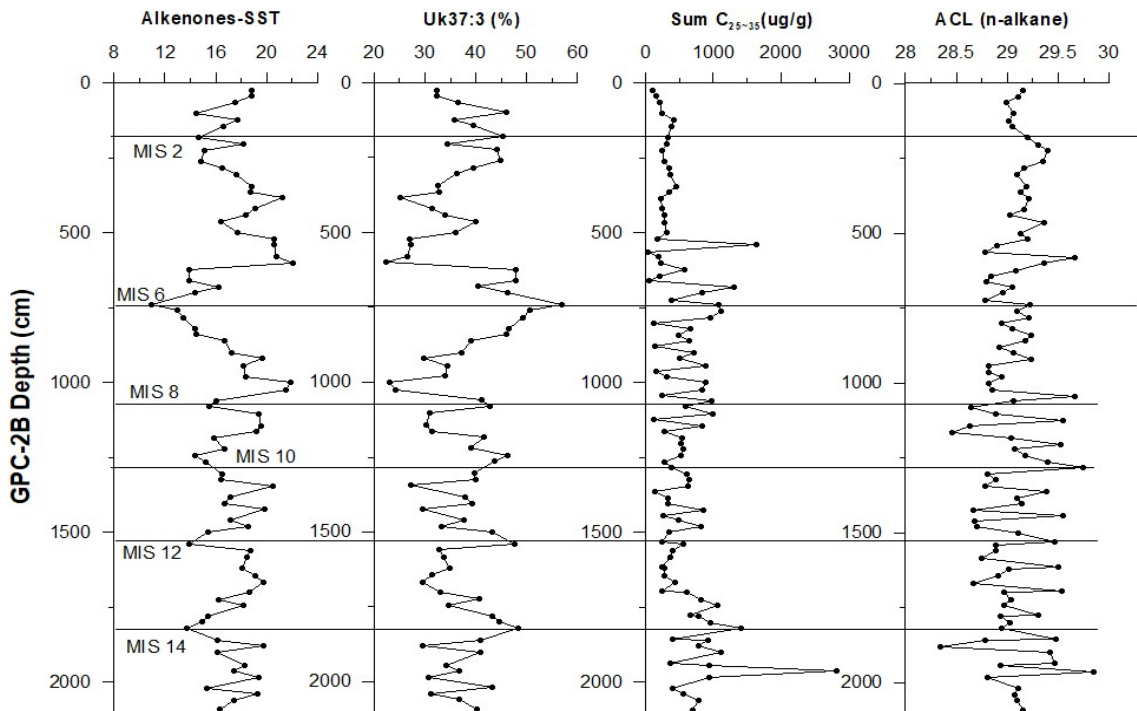


그림 14. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 alkenones-based SST와 n-alkanes 및 ACL(average chain length)

- 알케논의 SST 기록은 유공층에 의한 해양동위원소 단계(MIS)를 대신해서 층서를 구분하는데 사용되기도 한다(ref**). 따라서 탄산염이 연속적으로 나타나지 않은 울릉분지에 대한 코아 퇴적물을 사용한 이 연구에서도 알케논 SST와 두 지점에서 수행된 탄소 절대연령을 기준으로 층서를 결정했으며, 층서에 따라 MIS를 보다 정밀하게 구분하였다(그림 14). 탄소 절대연령은 유공층을 사용하였는데, 109-110 cm에서 $13,440 \pm 40$ yr(16033~15645 BP), 266-271 cm에서 37800 ± 340 yr(42424~41410 BP)로 나타났는데, 여기서는 conventional age를 이용했다. 빙기에는(낮아진 SST)에는 $\delta^{13}\text{C}$ 가 가벼워지는 특징을 보이고 있다. 이것은 빙기동안에 육상기원 유기물질이 많이 공급되었음을 지시하는 것이다.
- 그러나 각 빙기-간빙기 피크에 해당하는 구간에서는 육상의 고등식물에서 기여된 long-chain alkanes은 전체 농도는 모든 빙기에 증가하지 않는다(그림 15). MIS 6과 MIS 8, MIS 14에서는 전체 n-alkanes 농도가 증가하고 있으며, ACL 변화도 MIS 10에서 증가하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 각각의 빙기에서는 유입되는 육상기원 유기물의 종류와 양에 있어 차이를 보이는 것을 지시하고 있다.

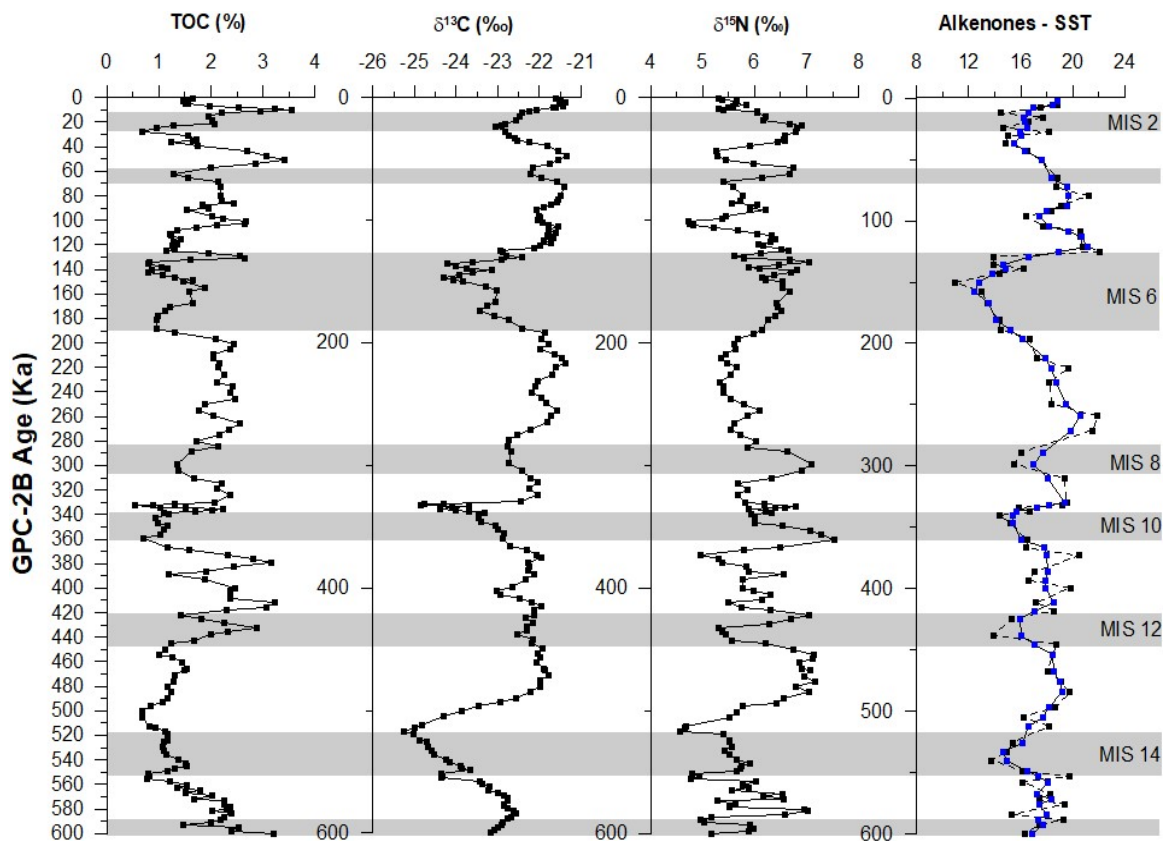


그림 15. 중위도(동해) 울릉분지에서 얻어진 GPC-2B 코아에 대한 산소동위원소 단계와 각종 프록시 데이터. 뚜렷한 빙기-간빙기 사이클을 보이며 MIS 15/16 경계에 달하고 있어 과거 60만년의 기록을 보이고 있다. 모든 데이터는 3 points moving average로 표시(SST는 두 개 모두 표시)되었다.

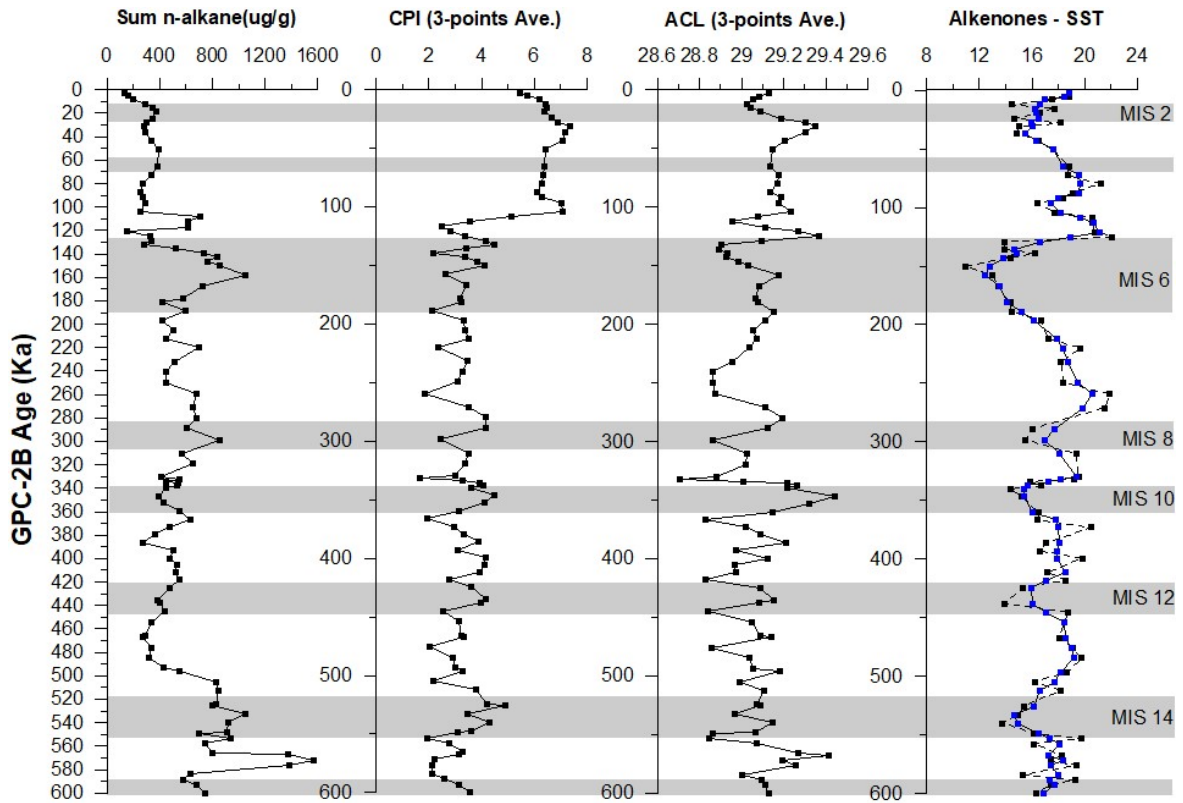


그림 16. GPC-2B 코아에서 SST와 대비시킨 n-alkanes 프록시 데이터. n-alkanes의 전체함량($nC_{25} \sim nC_{35}$) 변화와 CPI(carbon preference index)의 변화는 약 10만년을 경계로 큰 차이가 나고 있다.

제 2 절 저위도(ITF지역, 필리핀 해) 코아 퇴적물에 대한 연구

(1) Indonesian throughflow(ITF) 지역에 대한 퇴적물 연구

- 저위도 인도-태평양 지역의 중심 위치에는 Indonesian throughflow(ITF) 지역이 자리 잡고 있다. 이 지역을 통과하는 통과류는 태평양의 표층수가 인도양으로 흘러들어가며 아시아 기후변화 기록을 남기고, 저위도 지역의 기후변화에 영향을 주고 있다. 또한 통과류는 인디안 몬순의 영향을 주고 있으므로 ITF 지역은 아시아지역, 인도지역의 기후변화 기록을 보유하고 있다고 판단된다. 특히 ITF 지역에 대한 기존 연구결과들은 이 지역을 통과하면서 강수에 의한 다량의 담수가 더해지기 때문에 그 영향으로 극적인 또는 점이적인 해양환경 변화를 보고하고 있다(Stott et al., 2004). 이러한 점을 고려해서 인도네시아 Mahakam delta 지역에서 얻어진 코아 퇴적물과 Arafura 지역에서 얻어진 코아 시료를 이용하여, alkenones과 n-alkanes 기록을 살펴보았다.
- 기존 연구결과 인도네시아 인근에서 얻어진 코아의 기록에서는 인도네시아를 통과하는 통과류의 특성이 주변 강수의 영향으로 바뀌고 있음을 알 수 있다. 또한 산소동위원소 등에 의한 SST를 조사해본 결과 홀로세 약 5천년 이후에는 온도가 다소 감소하는 것으로 나타났다(그림 17). 따라서 이 연구에서는 퇴적물이 빠르다고 예상되는 Mahakam delta 코아와 Aru 지역 코아를 이용해서 홀로세 동안의 수온변화와 육상기원 유기화합물 유입을 살펴보았다.

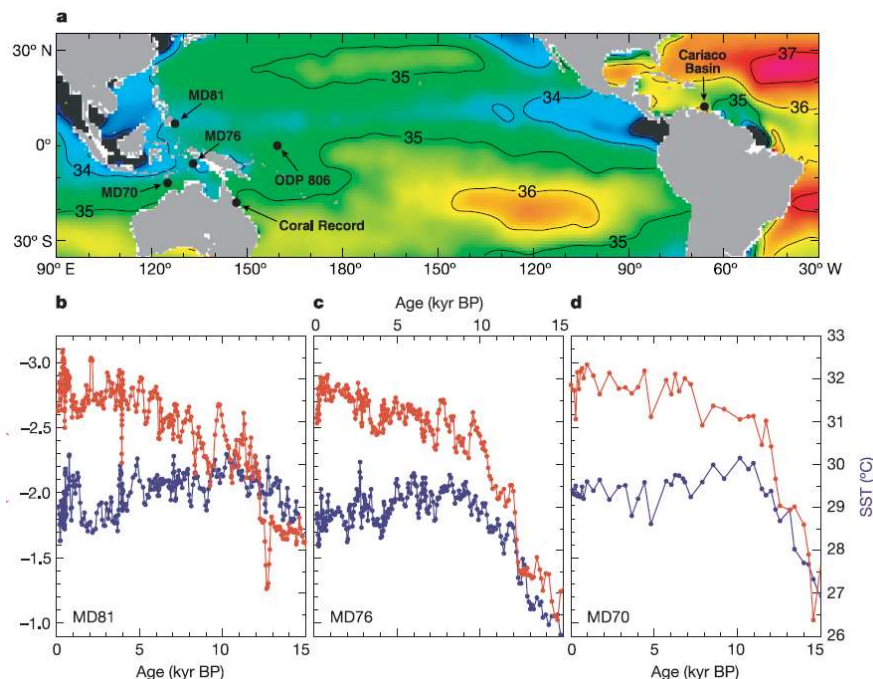


그림 17. ITF 지역에서 얻어진 코아에 대한 기록(Stott et al., 2004). 유공충의 산소동위원소(red) 및 Mg/Ca paleo SST(blue) 기록은 홀로세에 감소하는 경향을 보인다.

- MD01 및 MD76, MD70 코아는 모두 ITF 지역에 위치하고 있으며, 홀로세 기간에 들어와서 표층수온이 약간 떨어지는 경향을 보이고 있다. 이들은 SST의 공간적 분포를 보이는 표층수온과도 일치하고 있는데, 이 지역에서는 강수의 영향으로 표층수의 염분도가 낮아지는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 특히 MD76과 MD70 지역에서는 15 ka에서부터 약 10 ka에 이르는 동안 SST가 약 2도 이상 상승하는 특징을 보이고 있다.

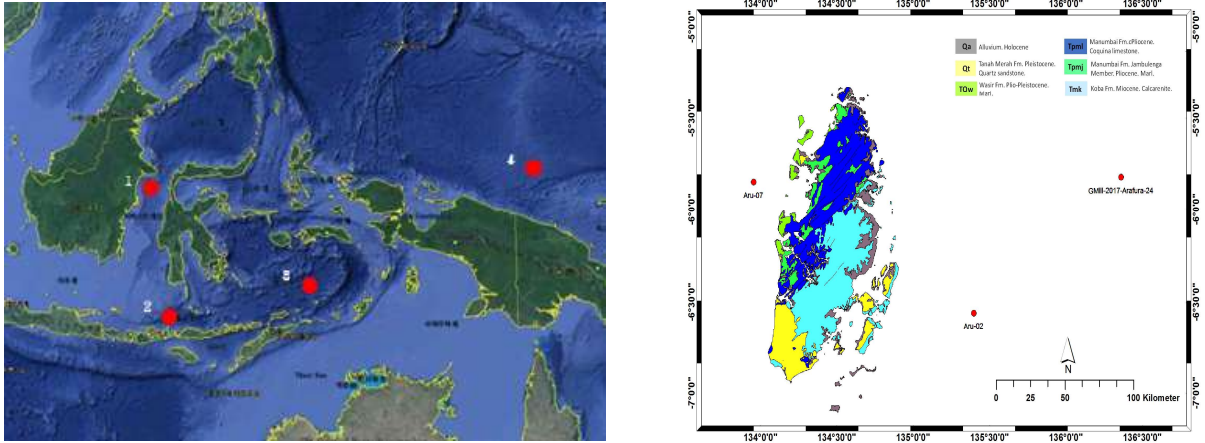


그림 18. 저위도 ITF 지역에서 얻어진 코아 위치도(1번: LP-1915 코아, 3번: Aru-02, 07 코아)

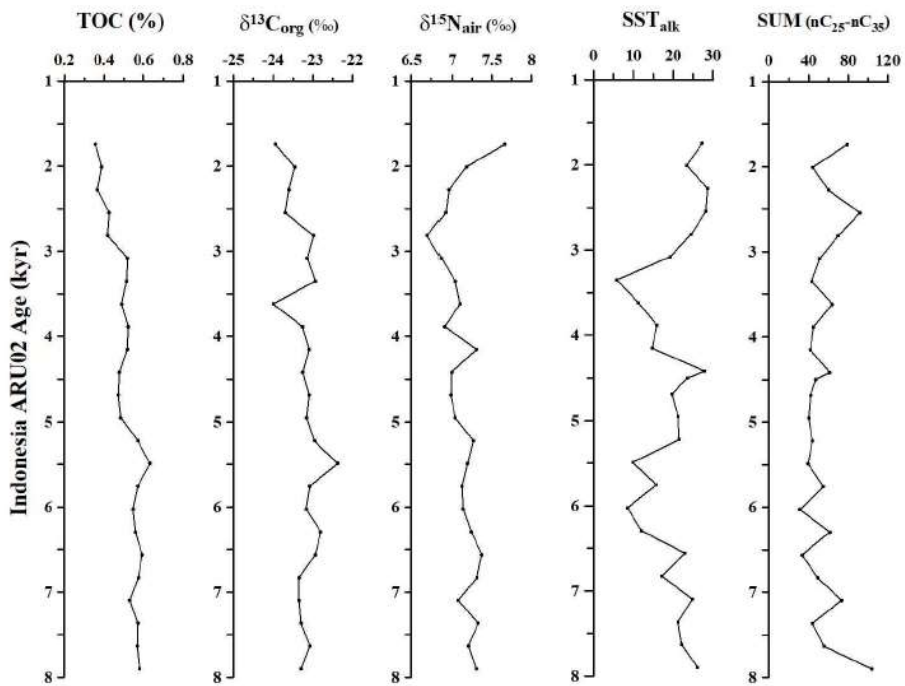


그림 19. 인도네시아 Aru-02 지역에서 얻어진 코아에 대한 프록시 데이터. alkenones-SST는 보정이 필요하다.

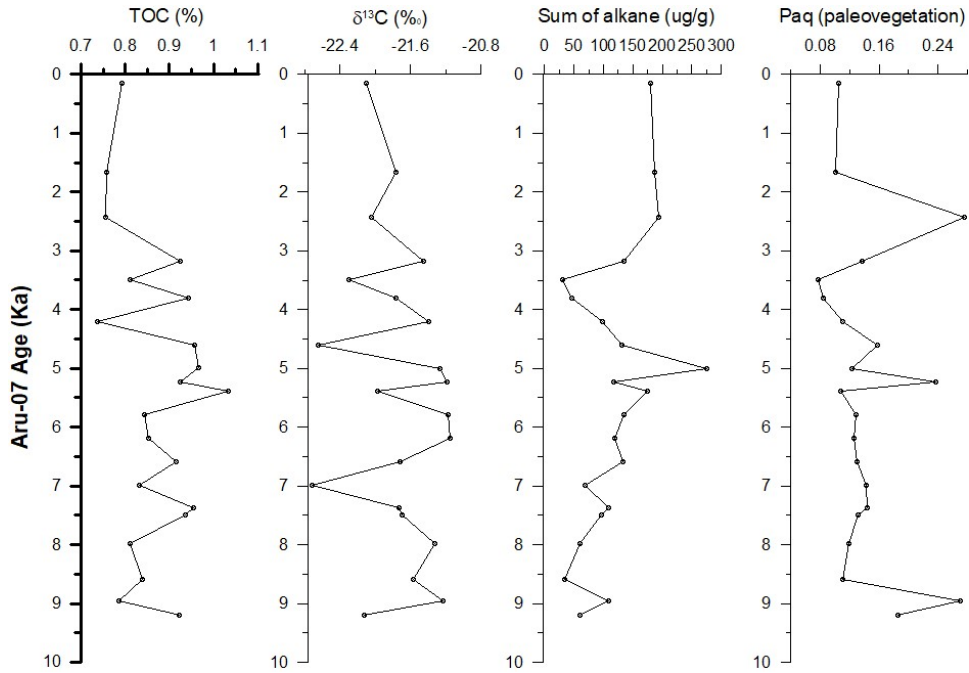


그림 20. TOC(%), 탄소동위원소 및 n-alkanes 총 농도(Aru-07)

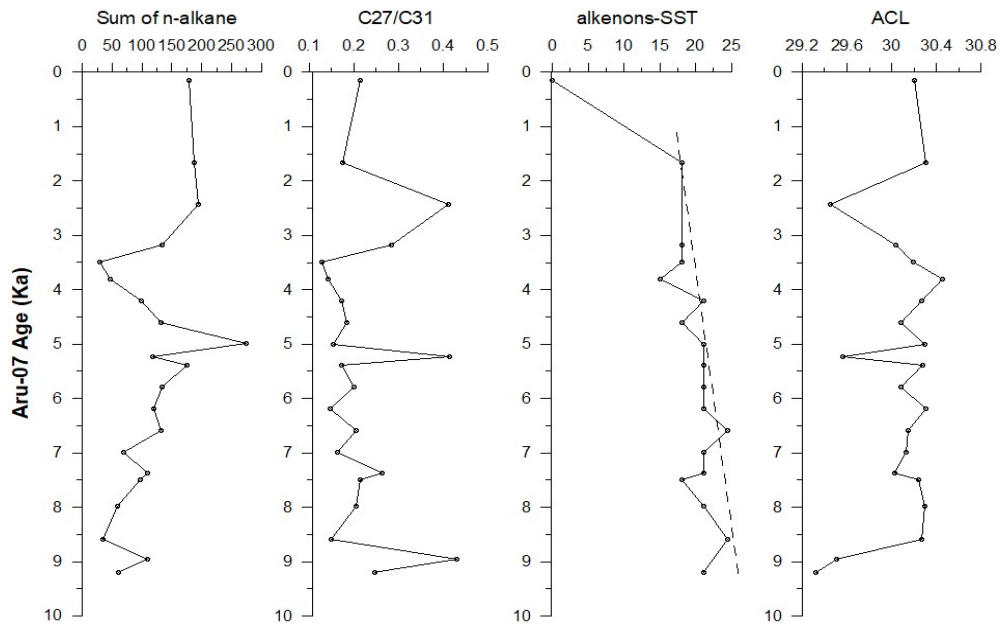


그림 21. 인도네시아 Aru-07 코아의 프록시 데이터. Alkenones-SST의 절대값은 낮지만, 홀로세의 표층을 향해서 온도가 떨어지고 있다. 총 alkane의 농도는 9천년에서 5천년까지 증가하는 경향을 보인다.

- 마하캄(Mahakam delta) 삼각주에서 얻어진 코아에 대해서 육상기원 유기물의 유입과 홀로세 기간 동안의 유기물 수지에 대해 조사했다.

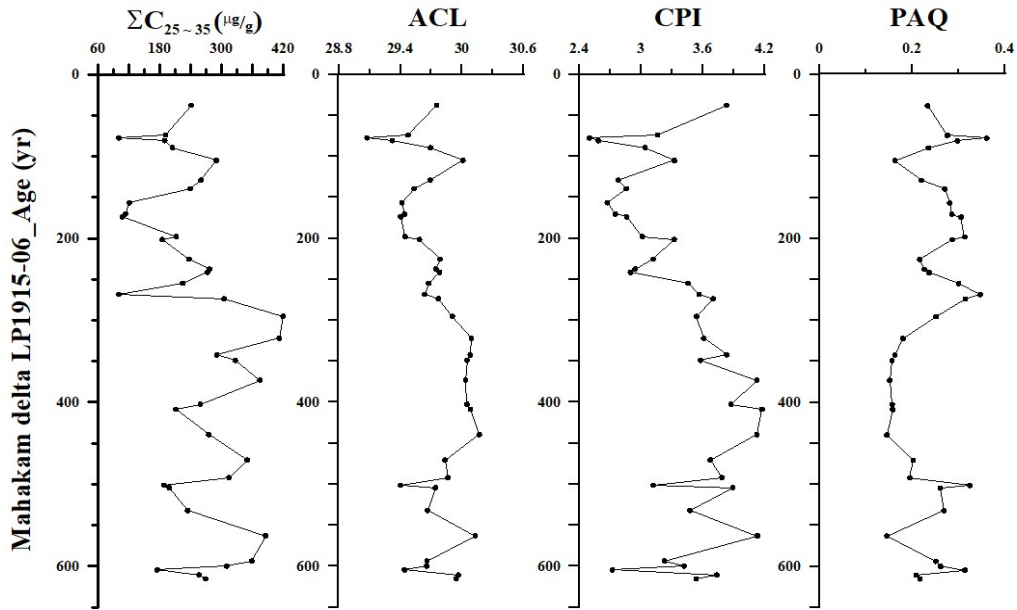


그림 22. 인도네시아 Mahakam delta에서 얻어진 코아에 대한 최근 600년 아래의 프록시 데이터. n-alkanes 총량이 큰 변화를 보이고, CPI에서 경향성이 보인다.

(2) 적도 태평양 코아 퇴적물(GPC-4)의 연대 모델 및 지화학 프록시 분석

- 인도네시아 ITF 지역과 더불어 기본과제에서 저위도 서태평양 코아(GPC-4)에 대한 시료채취가 이루어졌다(그림 25).

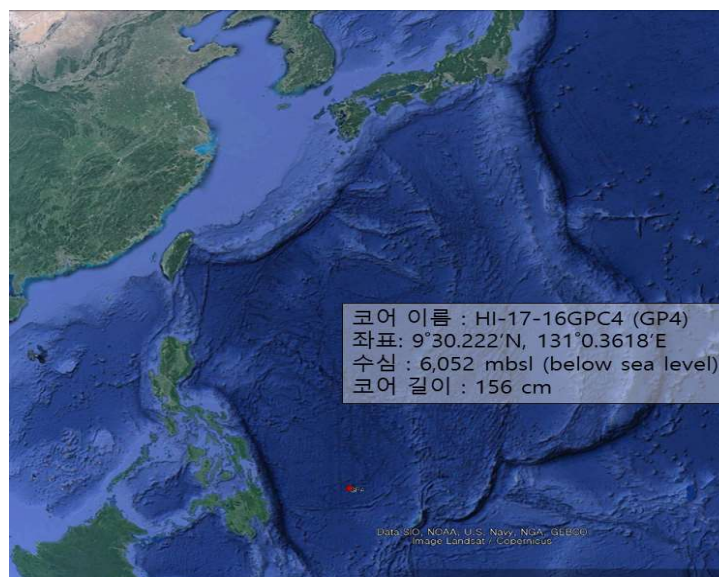


그림 23. 저위도 남서태평양에서 얻어진 코아 (GPC-4) 위치도(빨간점이 코아 위치)

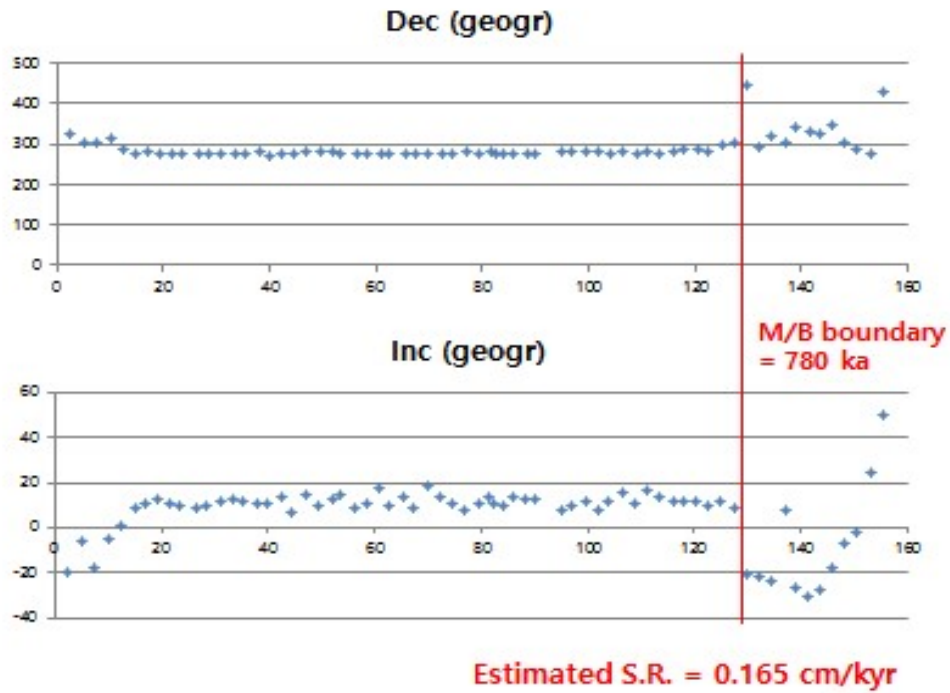


그림 24. 남서태평양 코아 GPC-4에 대한 대자율 측정값. 코아 심도 126 cm에서 부름/마쓰야야 경계가(약 78만년) 나타나고 있어, 전체 코아는 약 100만년에 가까운 연대를 보이는 것으로 추정된다.

- KIOST가 보유하고 있는 R/V 이사부호를 이용하여, 156 cm 코아를 채취하였다(그림 25). 해당 코아에 대한 연대 모델 설정을 위해 대자율을 측정했으며 대자율 측정결과 코아 깊이 약 126 cm에 B/A경계(78만년)가 나타나고 있는 것으로 보아 이 코아는 전체 약 100만년에 가까운 연대를 보유하는 것으로 판단되었다(그림 26). 계산된 퇴적률은 0.165 cm/1000 yr 이다.
- GPC-4 코아에 대한 유기물의 탄소 및 질소 동위원소 측정이 일차적으로 수행되었다(그림 27).

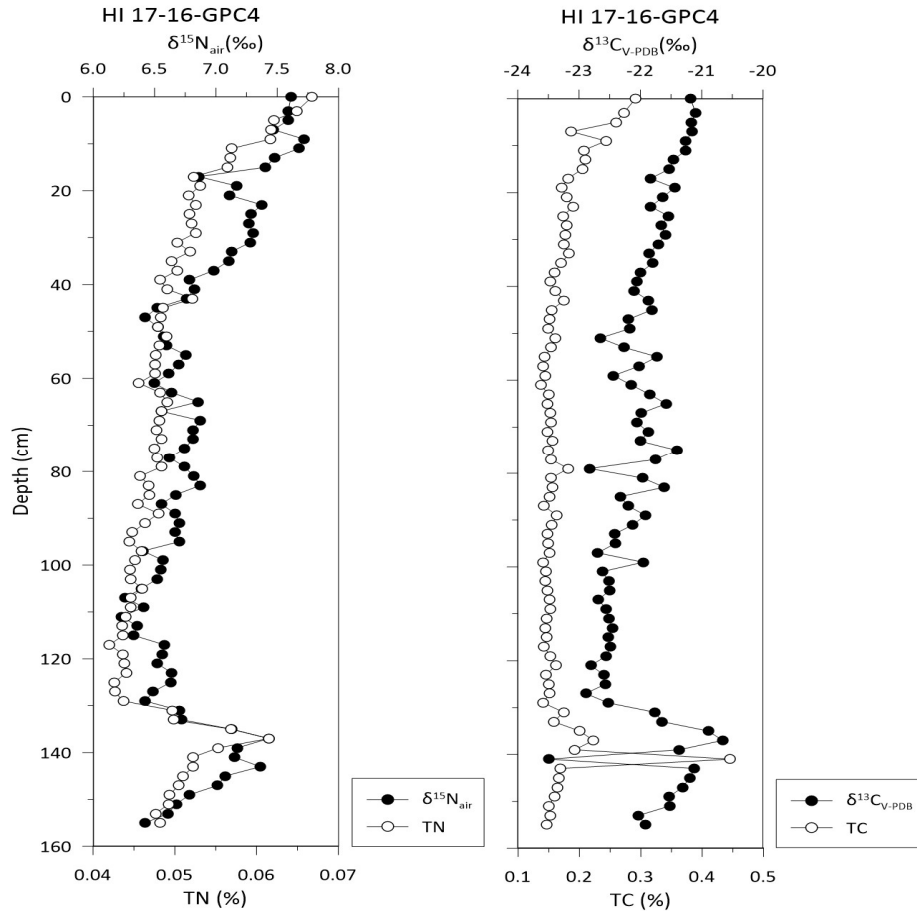


그림 25. GPC-4 코어 유기물의 질소 및 탄소동위원소. B/M 경계를 기준으로 상부쪽으로 점이적인 증가세를 보이고 있다.

- 총 질소(TN)와 질소 안정동위원소비($\delta^{15}N_{AIR}$)는 코어 상부에서 높고 점진적으로 감소하다 130 cm 부근에서 다시 증가 후 감소하는 경향을 보인다.
- 총 질소(TN)는 0.04에서 0.067%(평균 $0.049 \pm 0.005\%$)의 범위를 보인다. 표층에서 최대값(0.067%)을 보였으며, 137 cm 깊이에서 높은 값(0.062%)이 나타난다.
- 질소 안정동위원소 비($\delta^{15}N_{AIR}$)는 6.23에서 7.72‰(평균 $6.84 \pm 0.37\%$)의 범위를 보였으며, 상부 10 cm 구간에서 평균 $7.61 \pm 0.09\%$ 의 일정한 값을 보이다 감소한 뒤 $6.60 \pm 0.16\%$ 의 다소 일정한 $\delta^{15}N_{AIR}$ 값을 보인다. 9 cm 깊이에서 7.72‰로 최대값을 보였으며, 137 cm 깊이에서 7.43‰로 관측된다.
- 총 탄소(TC)와 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C_{V-PDB}$)도 코어 상부에서 높고 점진적으로 감소하다 130 cm 부근에서 다시 증가 후 감소하는 경향을 보인다.
- 총 탄소(TC)는 0.14에서 0.45%(평균 $0.17 \pm 0.04\%$)의 범위를 보인다. 141 cm 깊이에서 최대값(0.45%)을 보였으며, 표층에서 높은 값(0.29%)이 나타난다.

- 탄소 안정동위원소 비($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$)는 -23.5에서 -20.7‰(평균 $-22.0 \pm 0.54\%$)의 범위를 보인다. 코어 상부에서 점진적으로 $\delta^{13}\text{C}$ 가 감소하는 경향을 보였으며, 30 cm 구간에서 $\delta^{13}\text{C}$ 가 증가 후 감소하는 경향을 보인다. 141 cm 깊이에서 $\delta^{13}\text{C}$ 최소값(-23.5‰)이 확인된다.
- 동 GPC-4 코아에 대한 알케논 및 alkenones proxy 분석결과는 아래와 같다(현재 진행중이며 일부 분석결과이다.).

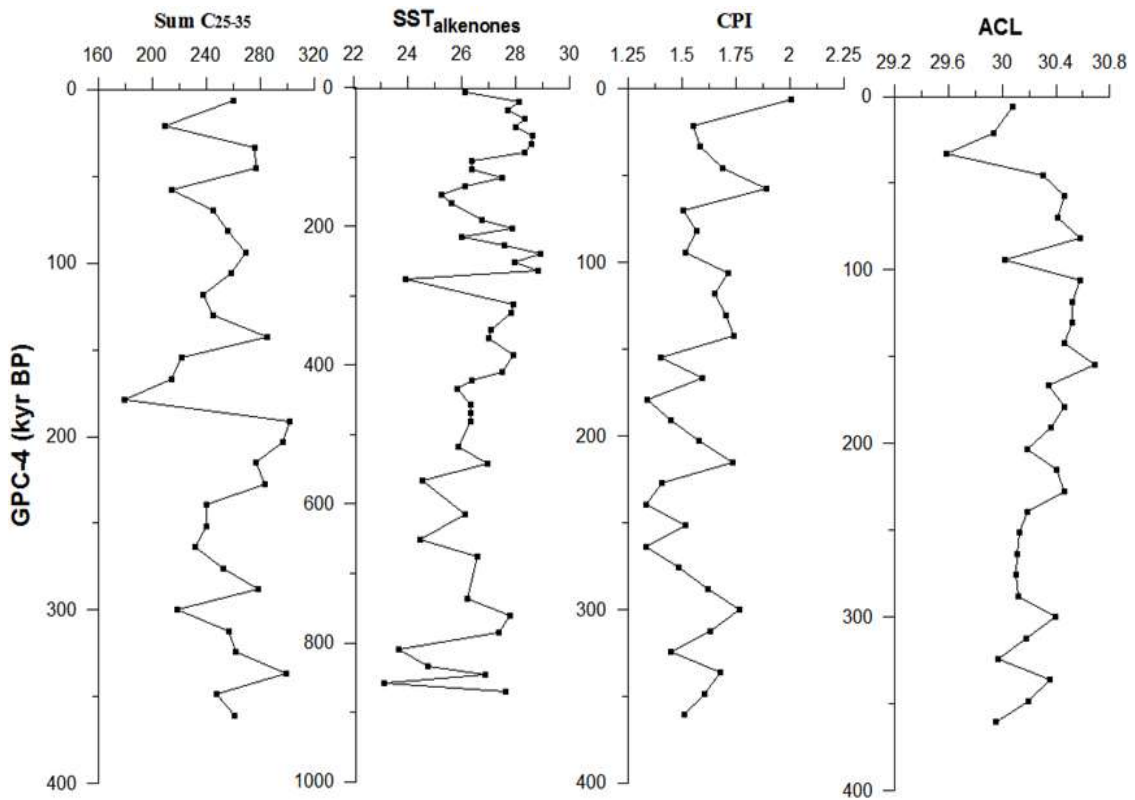


그림 26. 태평양 코아 퇴적물(GPC-4)의 SST 및 alkanes 분포

제 3 절 코아 퇴적물의 dust flux 연구

(1) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 채취

- GPC-2B 코아는 2016년 10월 19일부터 25일까지 진행된 이사부 시험항해를 통해 울릉분지(36.63345°N, 130.750075°E)에서 채취되었다.
- 수심 2,060 m인 지점에서 시료를 얻었으며 코아 총 길이는 2,096 cm로 총 18개 섹션으로 나누어 보관하였으며, 1 cm 두께로 부시료를 채취하였다.
- 입도는 표층부터 8 cm 간격으로 총 250개 시료를 분석하였으며, 원소분석은 100 cm부터 8 cm 간격으로 총 170개 시료를 분석하였다.
- 연대측정 결과 MIS 16까지 연대를 보인다.
- 테프라 구간은 404 cm, 1153 cm, 1700 cm 층에서 확인되었다.

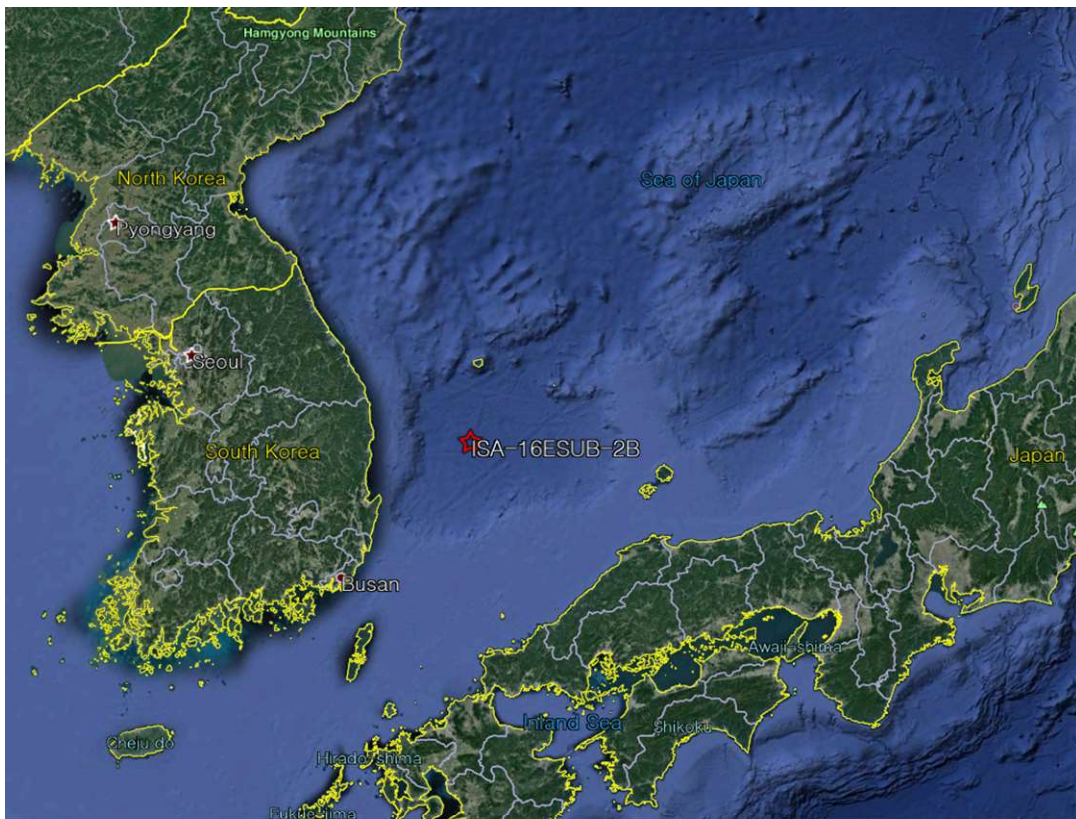


그림 27. 동해 울릉분지의 코아 퇴적물(GPC-2B) 위치도

(2) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 퇴적상 및 연대

- 대체로 점토질과 실트질로 구성되어 있으며, 일부 구간을 제외하고 점토질 함량이 50% 이상이다.

- 점토질 함량이 낮은 깊이에서는 사질과 역질 함량이 높으며 평균 입자 크기도 매우 낮은 값을 보인다. 특히 406 cm, 1162 cm, 1882 cm 구간에서 10% 미만의 점토질 함량을 보인다. 406 cm에서 사질함량은 36.9%, 평균입자크기가 5.30 Φ , 1162cm에서 사질과 역질 함량은 각각 61.2%, 18.1%였으며, 평균입자크기가 1.71 Φ 였고, 1882cm에서 사질과 역질 함량은 각각 32.5%, 49.1%, 평균입자크기가 0.74 Φ 였다. 해당 일부구간을 제외한 코어 전체의 평균입자크기는 8.15~9.17 Φ ($\pm 0.33\Phi$)의 범위를 보였다.
- 코어 전체 분급도는 1.23 Φ ~3.52 Φ (1.64 $\pm 0.27\Phi$)의 범위를 보였으며, 대체로 점토질 함량이 60% 미만인 깊이에서 2.00 Φ 이상의 매우 불량한 분급도를 보인다. 왜도는 -0.78~0.72(-0.34 ± 0.18)의 범위를 보이며, 첨도는 0.58~2.19(0.72 ± 0.12)의 범위를 보인다.

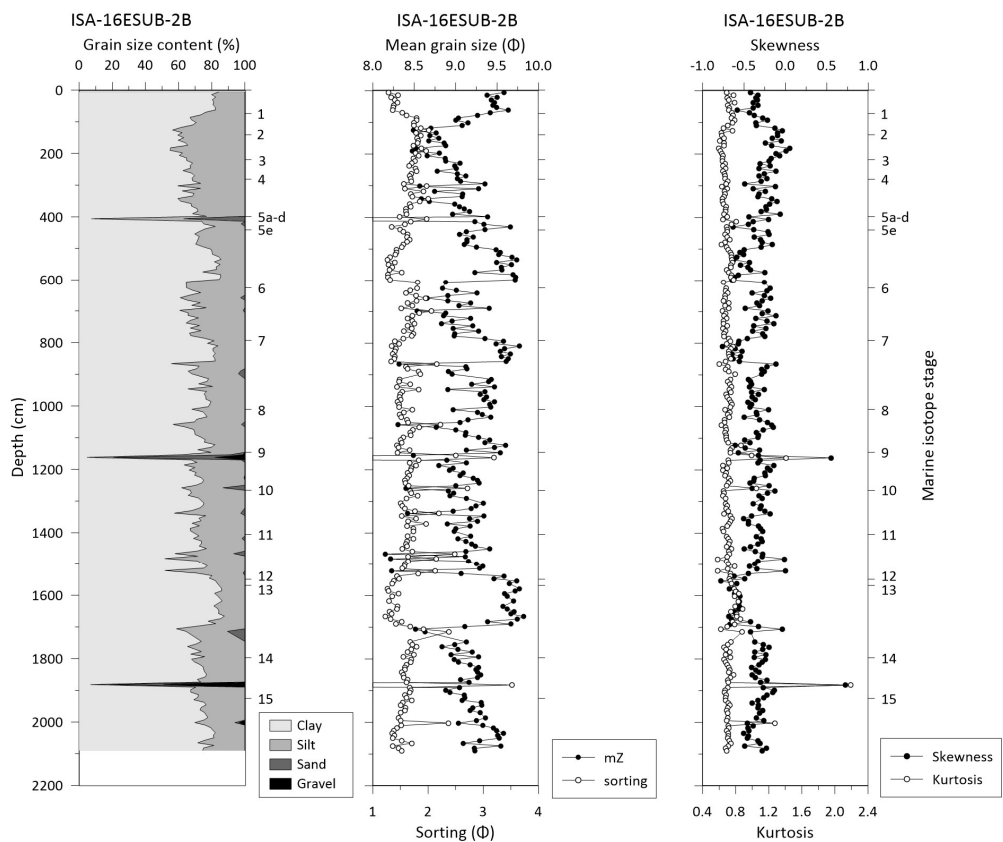


그림 28. 동해 울릉분지 코어 퇴적물(GPC-2B)의 조성 및 조직변수 분포

- GPC-2B 코아는 입도와 색상, 내부 퇴적구조의 분석에 의하여, 생물교란된 머드 (bioturbated mud), 희미한 층리가 발달된 머드(crudly laminated mud), 테프라 (tephra) 및 균질니(homogeneous mud)와 층리니(laminated mud) 등의 퇴적상이 관찰된다.
- 울릉분지에서 생물교란된 머드가 우세하며, 분지에서는 퇴적물이 다소 낮은 안정된 환경에서 산소환경 또는 저산소환경에서 원양성 또는 반원양성 퇴적작용에 의해서 형성된다(천중화 등, 2006).

(4) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 원소성분 분포: 습식 분석

- Al은 4.20~10.5%(평균 6.79±1.35%), Ca은 0.07~9.42%(평균 1.37±1.88%), Fe는 2.69~6.78%(평균 4.09±0.76%), K는 1.87~5.49%(평균 2.78±0.47%), Mg는 0.33~2.53%(평균 1.61±0.31%), Mn은 0.016~0.112%(평균 0.037±0.014%), Na는 1.86~5.90%(평균 2.60±0.67%), Ti은 0.27~0.56%(평균 0.39±0.05%), P는 0.013~0.091%(평균 0.059±0.010%)의 범위를 보인다. 희토류(Σ REEs)는 43~212 mg kg⁻¹(평균 109±46 mg kg⁻¹)의 범위를 보인다.
- Al은 MIS 10에 속하는 약 1200 cm 깊이를 기준으로 코아 상부는 함량이 낮고 변동 폭이 크며(평균 6.42±1.21%), 코아 하부는 함량이 비교적 높고 일정한 분포를 보인다(평균 8.20±0.88%).
- Ca는 대체로 1% 미만의 매우 낮은 함량을 보이거나 일부 깊이에서는 2% 이상이다. 특히 MIS 2(108 cm, 7.71%)와 MIS 4(268 cm, 7.91%), MIS 5(332 cm, 6.45%), MIS 6(492 cm, 8.94%), MIS 7(636 cm, 6.38%), MIS 12(1500 cm, 9.42%), 그리고 MIS 14(1668 cm, 6.96%)에서 6% 이상의 Ca 함량이 확인되었으며, 대체로 해수면이 낮았던 시기에 Ca 함량이 높은 것으로 확인되었다.
- K는 MIS 5에 속하는 약 400 cm를 기준으로 코어 상부에서 함량변화를 보였으나, 코아 하부에서는 함량이 일정한 경향을 보였다. MIS 10에 속하는 1164 cm에서 4.53%로 높은 K 함량을 보였다.
- Mn은 일부 깊이에서 높은 함량을 보였다. MIS 3에 속하는 188 cm에서 0.11%로 가장 높은 값을 보였으며, 400 cm(MIS 5; 0.092%), 644 cm(MIS 7; 0.085%), 1284 cm(MIS 11; 0.072%) 그리고 1164 cm(MIS 10; 0.070%) 순으로 높은 Mn 함량을 보였다.
- Na는 MIS 5에 속하는 400 cm를 기준으로 코아 상부에서 함량변화가 비교적 컸으나(평균 3.36±0.63%), 코아 하부에서는 대체로 원소함량이 일정한 경향을 보였으며(평균 2.35±0.41%) MIS 10에 속하는 1164 cm에서 5.50%로 주변보다 높은 Na 함량을 보였다.
- Ti는 MIS 1에서 MIS 6에 해당하는 코아 상부 약 700 cm 구간에서 함량변화 폭이 비교적 크게 나타났으나(평균 0.40±0.06%), 코아 하부에서는 대체로 일정한 경향을 보였다(평균 0.39±0.04).
- P는 MIS 1에서 MIS 5a-d에 속하는 코아 상부 약 400 cm 구간에서 함량이 일정하게 분포하는 양상을 보였으며, 코아 하부에서는 일부 깊이에서 주변보다 다소 높거나 낮은 함량분포를 보였다. MIS 6에 속하는 524 cm 깊이에서 최소값(0.013%), MIS 7에 속하는 636 cm에서 최대값(0.091%), MIS 12에 속하는 1460 cm에서 높은 함량(0.083%)이 확인되었다.

- 희토류 성분(ΣREEs)의 함량은 $43.0\sim 212.3 \text{ mg kg}^{-1}$ (평균 $108.5\pm 46.4 \text{ mg kg}^{-1}$)의 범위를 보였다. 수직적인 분포는 Al 성분과 비슷하며, MIS 10 이전과 이후에서 함량분포의 차이를 보였다. 또한, MIS 5 이후 해수면이 낮아지면서 희토류 함량이 증가하는 경향을 보였다.

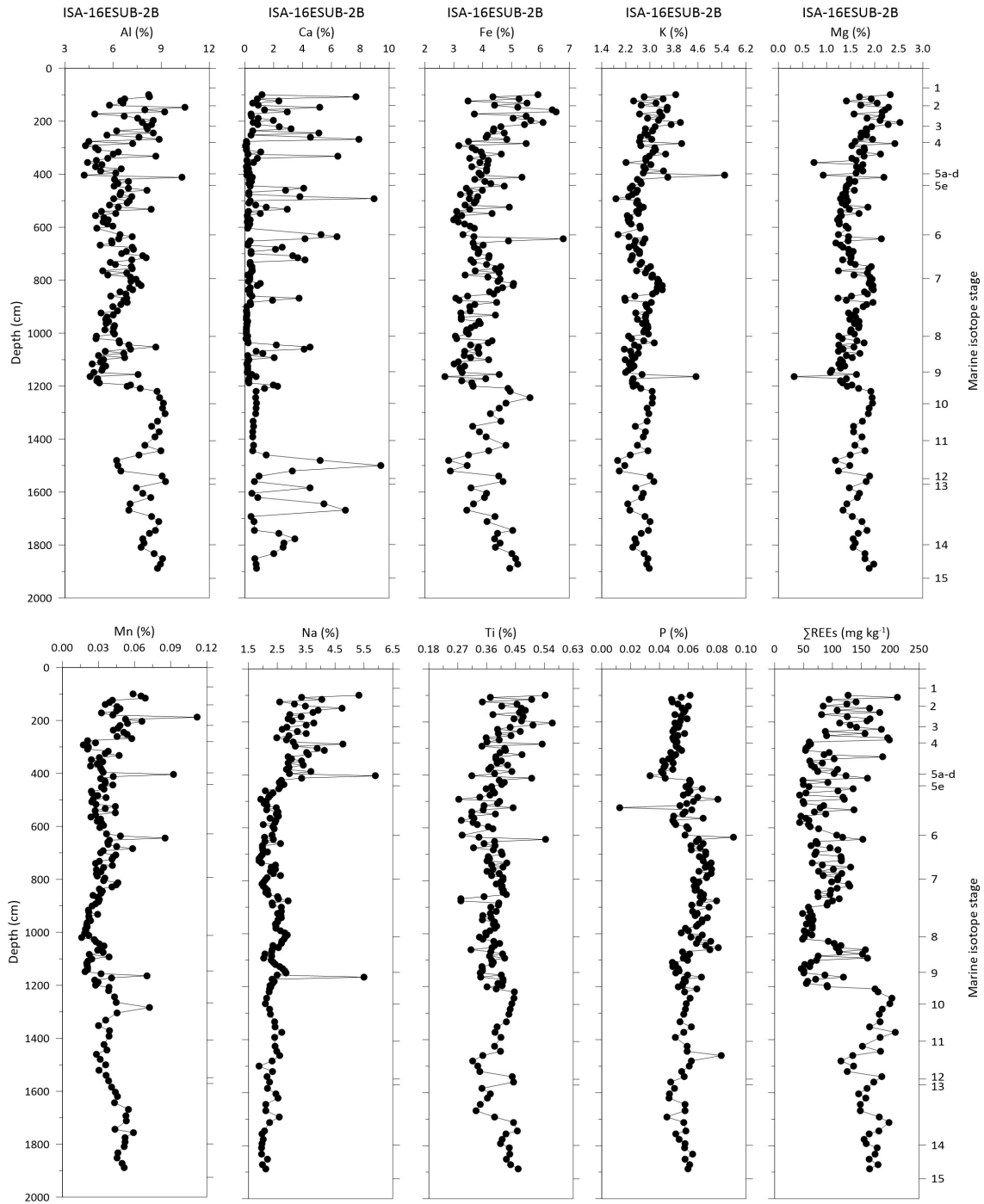


그림 29. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 원소성분 분포도

- 희토류 원소들(REEs)의 함량을 UCC(Upper Continental Crust) 기준 값을 이용하여 표준화 시킨 뒤, Ce^* 와 Eu^* 를 계산하였다.

$$Ce^* = \frac{(Ce_{ucc})}{(La_{ucc} - Pr_{ucc}) \div 2}$$

$$Eu^* = \frac{(Eu_{ucc})}{(Sm_{ucc} - Gd_{ucc}) \div 2}$$

- Ce^* 는 1.20에서 36.4(6.93±6.30)의 범위를 보였으며, 그 분포 경향이 268 cm(MIS 4), 604 cm(MIS 6), 892 cm(MIS 8), 1020 cm(MIS 9), 1200 cm(MIS 10)에서 달라졌다. MIS 2에서 MIS 4에 속하는 첫번째 구간에서는 Ce^* 가 소폭 변동하였으며(1.35~8.48, 평균 3.79±2.17), MIS 5에서 MIS 6에 속하는 두번째 구간에서는 Ce^* 가 매우 큰 폭으로 변동하였다(1.71~36.4, 평균 12.5±8.02). MIS 6에서 MIS 8에 속하는 세 번째 구간에서는 Ce^* 가 점차 감소하는 경향을 보이며(1.96~12.14, 평균 4.92±2.74), MIS 8에서 MIS 9에 속하는 네 번째 구간에서는 Ce^* 가 비교적 큰 폭으로 변동하였다(8.30~22.9, 평균 14.0±3.71). MIS 9에서 MIS 10에 속하는 다섯 번째 구간에서 Ce^* 는 소폭 변동하며(2.00~11.6, 평균 5.9±2.80) MIS 10부터 MIS 15에 속하는 마지막 구간은 매우 낮고 일정한 Ce^* 분포를 보였다(1.20~2.49, 평균 1.68±0.28).
- Eu^* 는 1.01에서 20.1(평균 3.40±3.05)의 범위를 보였으며, 그 분포 경향이 268 cm (MIS 4), 604 cm(MIS 6), 1200 cm(MIS 10)에서 달라졌다. MIS 2에서 MIS 4를 포함 하는 첫 번째 구간에서 Eu^* 는 소폭 변동하였으며(2.40~7.71, 평균 4.53±1.80), MIS 5에서 MIS 6을 포함하는 두 번째 구간에서는 Eu^* 가 큰 폭으로 변동하였다(1.13~20.1, 평균 6.83±3.95). MIS 6에서 MIS 10을 포함하는 세 번째 구간에서는 Eu^* 가 비교적 일정한 경향을 보였으며(1.01~4.50, 평균 2.13±0.81), MIS 10에서 MIS 15까지 포함하는 마지막 구간에서는 매우 낮고 일정한 Eu^* 분포를 보였다(1.01~1.24, 평균 1.11±0.06).

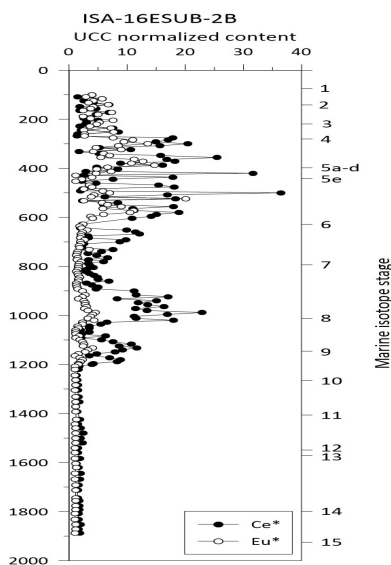


그림 30. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 Ce^* 와 Eu^* 변화

(5) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 원소성분 분포: 비파괴 분석

- XRF-core scanner(ITRAX)를 통해 각 화학원소별 강도(intensity)를 측정하였다. 2-3 mm 간격으로 매우 조밀하게 분석하였다. 장점으로서는 퇴적물을 비파괴 방법으로 매우 신속하게 현장에서 분석이 가능하고, 단점으로는 표준물질에 의한 보정없이 분석하기 때문에 정확도(accuracy)에 의문이 들 수 있다.
- 깊이별로 퇴적물내 성분들을 주성분(Major elements), 미량성분(Minor elements), 극미량원소(Rare earth elements)로 구분하여 분석하였다.
- 습식분석 방식과 비교하여 상관관계가 높게 나타났으며, 특히 Ca, Fe, K, Mn, Ti 등의 경우 상관도가 높게 나타났다.
- ITRAX 분석 결과의 경우, 코아 상부에서 함량이 다소 과소평가 되는 경향이 나타나고 있다. 상부 코아 퇴적물의 다소 높은 함수율에 의한 산란의 영향으로 추정된다.

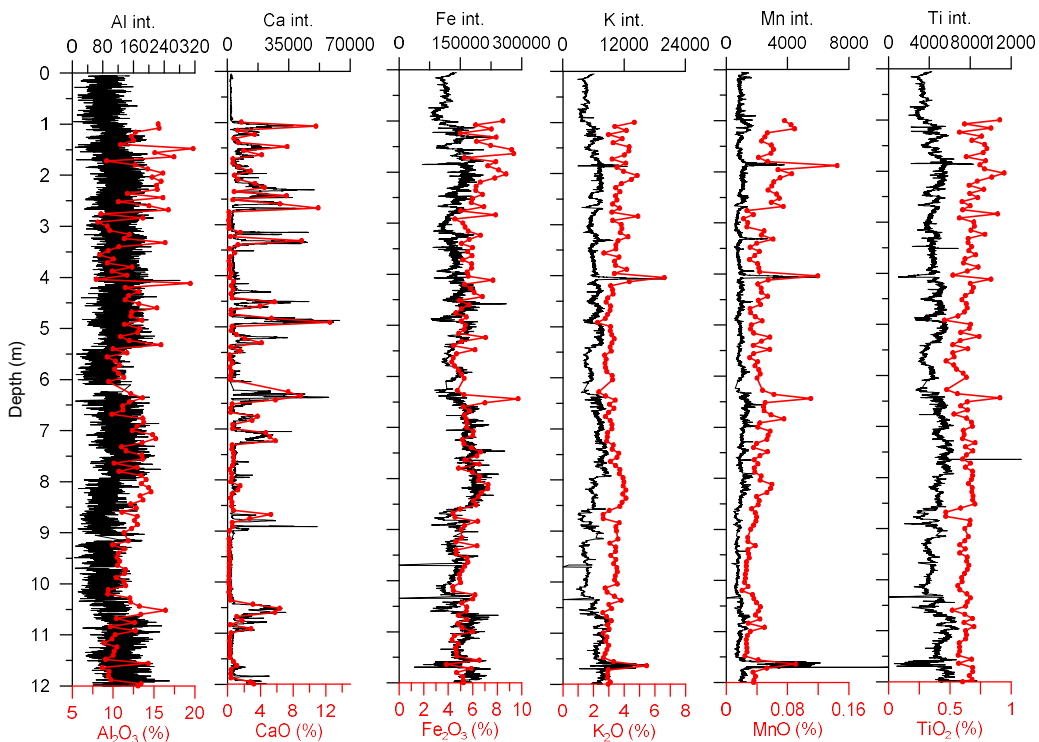


그림 31. 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 XRF core scanner와 습식분석 비교

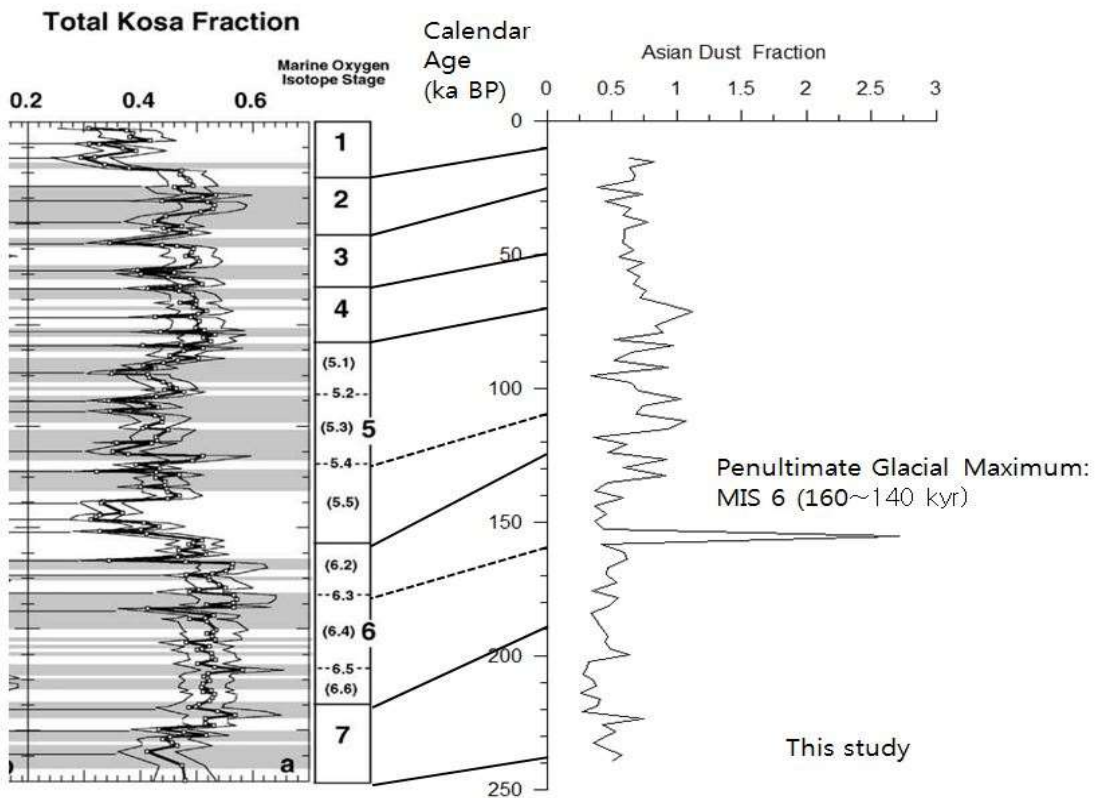
- XRF core scanner의 분석결과는 매우 해상도가 높은 자료로서 각각의 원소는 보정이 필요하나 원소간의 비율(ratio)을 이용한 상대적 비교는 그 자체로 매우 신뢰도가 높기 때문에 활용이 가능하다(Croudace et al., 2006).

표 1. XRF-core scanner를 이용한 다양한 해양환경 해석용 parameters

Property measured	ITRAX detection efficiency	Comment on property
Compton scattering MoK _{inc}	High	<ul style="list-style-type: none"> • Relates inversely to the mean atomic number • Will vary with mineralogical composition, water and organic carbon content • Inflections may occur at bed boundaries • Will vary with sediment packing density
Ca/Fe	High	<ul style="list-style-type: none"> • Indicative of biogenic carbonate: detrital clay ratio • May show strong correlation with sedimentary units • Ca/Fe profile is a good proxy for sediment grading and for assessing source relationships • Can distinguish foraminifer- or shell-rich layers
Sr/Ca	High	<ul style="list-style-type: none"> • Enhanced Sr may indicate the presence of high-Sr aragonite which requires a shallow-water source • Affected by sediment packing/porosity and grain-size/shape variations
K/Rb	Moderate	<ul style="list-style-type: none"> • K is commonly associated with detrital clay and may be enhanced in turbidite muds • Potentially unreliable parameter as sea-water Cl atoms will absorb potassium X-rays, so apparent high K may reflect increased porosity
Zr/Rb Ti/Rb	Moderate	<ul style="list-style-type: none"> • Zr and Ti are high in heavy resistate minerals and may be enhanced in turbidite bases • Useful as sediment-source/provenance indicators
Si	Moderate-low	<ul style="list-style-type: none"> • Important terrigenous or productivity indicator • Normalization using detrital divisor can distinguish terrigenous or productivity origin • May be useful as a sediment-source and provenance indicator
Fe/Rb Fe/Ti	Good	<ul style="list-style-type: none"> • Commonly shows grain-size-related fractionation effects • Fe mobilized during redox-related diagenesis and elevated Fe commonly seen in oxic, or formerly oxic, parts of sediment • Rb is an element commonly associated with detrital clay and may be enhanced in turbidite muds
Cu/Rb Cu/Ti	Moderate	<ul style="list-style-type: none"> • Sharp Cu peaks are largely of diagenetic origin
As	Moderate	<ul style="list-style-type: none"> • Commonly an indicator of pyrite which may be detrital or authigenic in origin
Mn/Ti	Good	<ul style="list-style-type: none"> • Good indicator of redox-related diagenesis
Ba/Ti	Low-moderate	<ul style="list-style-type: none"> • Important productivity indicator
Br/Cl S/Cl	Moderate-low	<ul style="list-style-type: none"> • For marine sediments a constant ratio implies sea-water ratios. High ratios may indicate organic-rich layers as Br and S are high in organic-rich sediments

(6) 동해 울릉분지 코아 퇴적물(GPC-2B)의 dust flux 변동성

- 울릉분지의 seismic chimney가 분포하는 지역에서 채취되었다.
- seismic chimney는 가스하이드레이트 농도가 높은 곳으로 알려져 있다(Yoo et al., 2013).
- 지난 25만년(MIS 7) 동안 두 번의 최대빙하기(LGM: 24,000~18,000년, PGM: 160,000~140,000년)가 있었으며, 기존 야마토 분지의 ODP 797(Irino and Tada, 2002)의 dust flux 변동성과 비교하였다.
- MIS 2에서 7까지 두 코아의 dust flux 변동성은 비슷한 경향을 보이거나, 특징적으로 MIS 6의 PGM 기간 중 GPC-2B 코아에서 피크가 있다.



Irino and Tada, 2002

그림 32. 25만년 동안의 ODP 797(왼쪽)과 GPC-2B(오른쪽) 간 dust flux 변동성 비교

- 지난 56만년 기간 동안의 동해 IODP U1427 코아의 고환경 해석 자료들과 함께 GPC-2B dust flux 변동성을 비교해보았다.
- GPC-2B 코아에서 dust fraction 시그널과 dust proxy로 알려진 Th/U 비 비교에서 PGM 시기에 상기 proxy 결과가 일치할 하며, 특히 대략 350,000년 이전의 dust flux

변동성도 비슷한 경향을 보였다.

- 한편, 동해 IODP U1427 코아의 K 함량 변화와 GPC-2B의 dust fraction 비교에서도 앞서 언급한 Th/U 비의 결과와 비슷한 특징을 나타냈다.
- 다른 특징으로 GPC-2B 코아의 PGM 이전 MIS 9~MIS 6 기간 동안 dust fraction 값들이 다른 MIS의 시기에 비해 낮은데, 동해 IODP U1427 코아에서 MIS 9~MIS 6 기간 동안 *G. quinqueloba* 유공충이 풍부하게 나타났다. 이는 담수의 영향을 나타내며, 상대적으로 dust flux가 약해짐을 말한다(Gallagher et al., 2018).

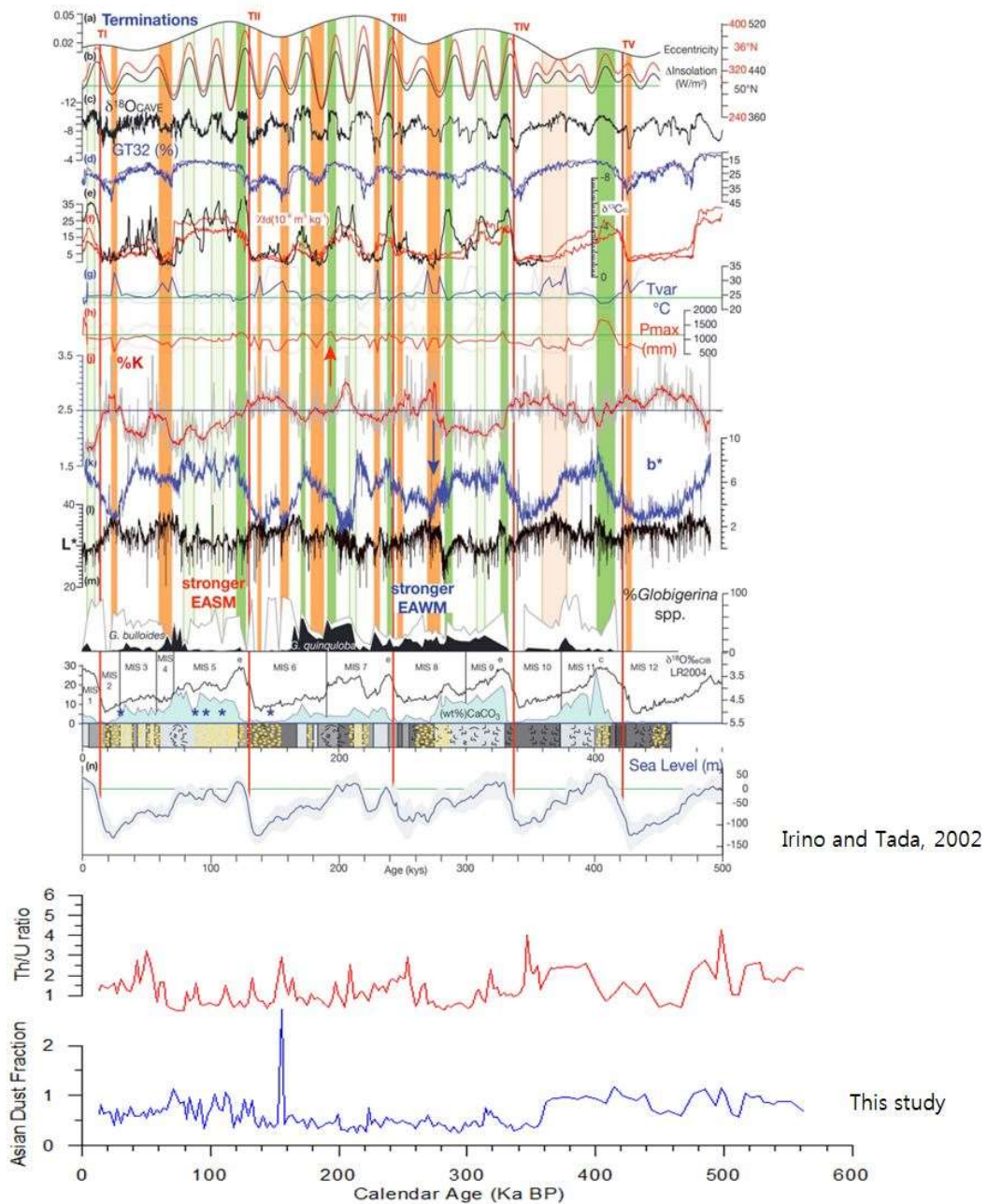


그림 33. 동해 IODP U1427(위)과 GPC-2B(아래) 간 지화학 proxy 비교

(7) 태평양 코아 퇴적물(GPC-4)의 육상기원 물질 기여 파악

- 코아 156 cm까지 점토질 함량은 75% 이상, 사질 함량은 0.6% 미만으로 세립질 함량이 높다.
- 평균입도크기는 9.27~9.79 Φ (평균 9.56 \pm 0.12 Φ)의 범위를 보였으며, 분급도는 1.34~1.67 Φ (평균 1.51 \pm 0.07 Φ)의 범위로 불량하다.
- 왜도는 -0.81~-0.46(평균 -0.63 \pm 0.09), 첨도는 0.73~0.89(평균 0.83 \pm 0.03)의 범위를 보인다.

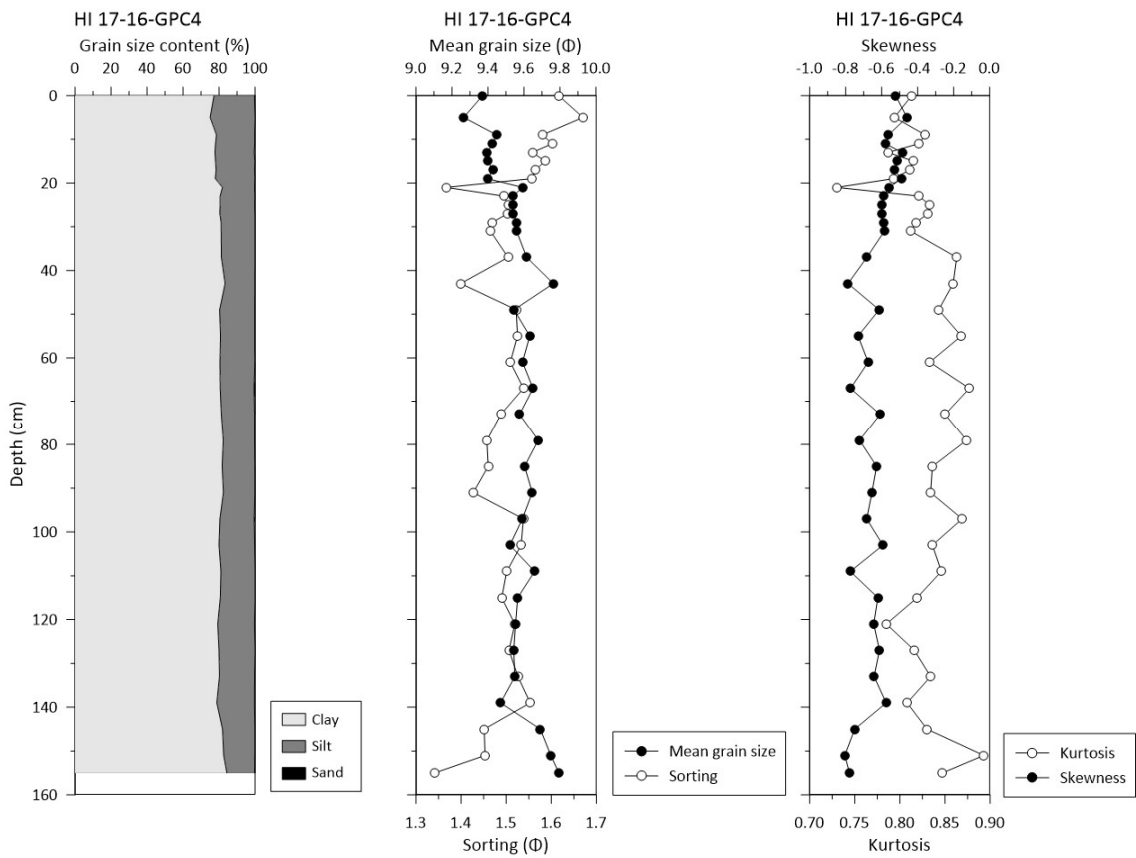


그림 34. 태평양 코아 퇴적물(GPC-4)의 조성 및 조직변수 분포

- Al는 5.63~10.7%(평균 8.24 \pm 1.29%), Ca는 0.62~1.13%(평균 0.89 \pm 0.11%), Fe는 3.12~7.74%(평균 5.57 \pm 0.76%), K은 1.39~1.95%(평균 1.63 \pm 0.15%), Mg는 1.02~2.62%(평균 1.96 \pm 0.42%), Mn은 0.11~0.76%(평균 0.43 \pm 0.11%), Na는 2.31~3.23%(평균 2.76 \pm 0.21%), Ti은 0.40~0.57%(평균 0.47 \pm 0.03%), P은 0.007~0.081%(평균 0.067 \pm 0.009%)의 범위를 보임. 희토류(Σ REEs)는 53~137 mg kg⁻¹(평균 85 \pm 18 mg kg⁻¹)의 범위를 보였다.

- Al과 Mg은 약 60 cm 깊이를 기준으로 코어 상부는 함량이 낮고 코어 하부는 함량이 높았다. Mg은 코어 상부에서 함량 변동 폭이 컸으며, 코어 하부에서는 일정한 경향을 보였다.
- Ca와 Fe, K는 약 80 cm 깊이를 기준으로 원소함량 분포양상이 달라졌다. Ca와 Fe 함량은 코어 상부(표층~약 80 cm)가 하부보다 높았으나, K는 코어 하부에서 높았다.
- Na와 Ti는 80 cm 깊이에서 최대값(Na 3.23%, Ti 0.57%)을 보였으며, Σ REEs는 90 cm 깊이에서 최대값(137 mg kg^{-1})을 보였다.

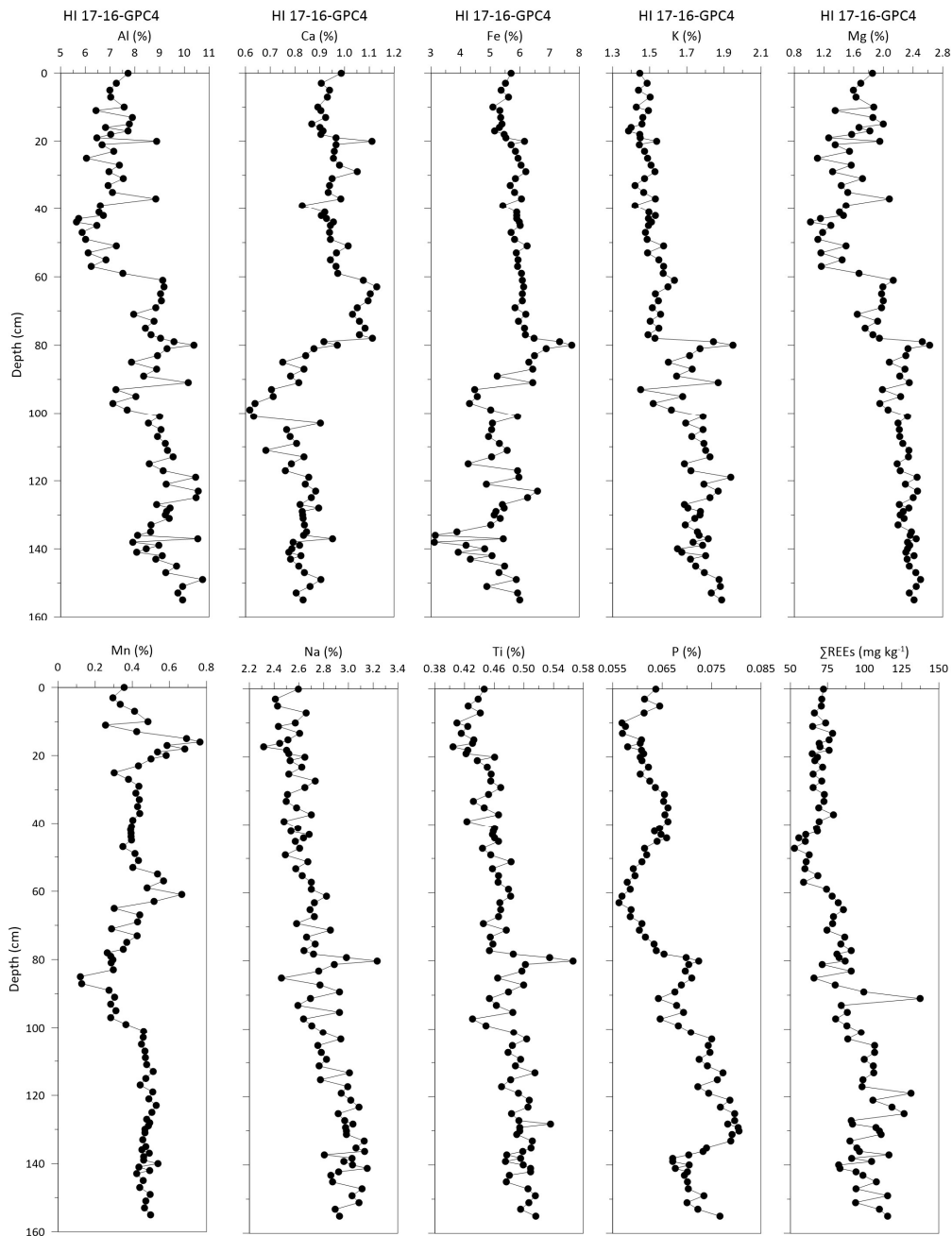


그림 35. 동해 울릉분지 코어 퇴적물(GPC-2B)의 원소성분 분포도

- Dust flux 변동성 관련하여 고해양 생산성을 지시하는 Ba/Ti 비에 대해서 기존 Parece Vela 분지의 코아 PV090102(Jiang et al., 2019)와 GPC-4 간 비교를 하였다.
- MPT(mid-Pleistocene transition, 1.25~0.7Myr) 시기에서 기존 PV090102과 GPC-4 코아 간 Ba/Ti 비 피크가 일치하는 경향이 있으며, GPC-4 코아에서 MPT 이후 Ba/Ti 비의 증가는 dust flux 증가-고해양 생산성 간 피드백과 관계하는 것으로 보였다.

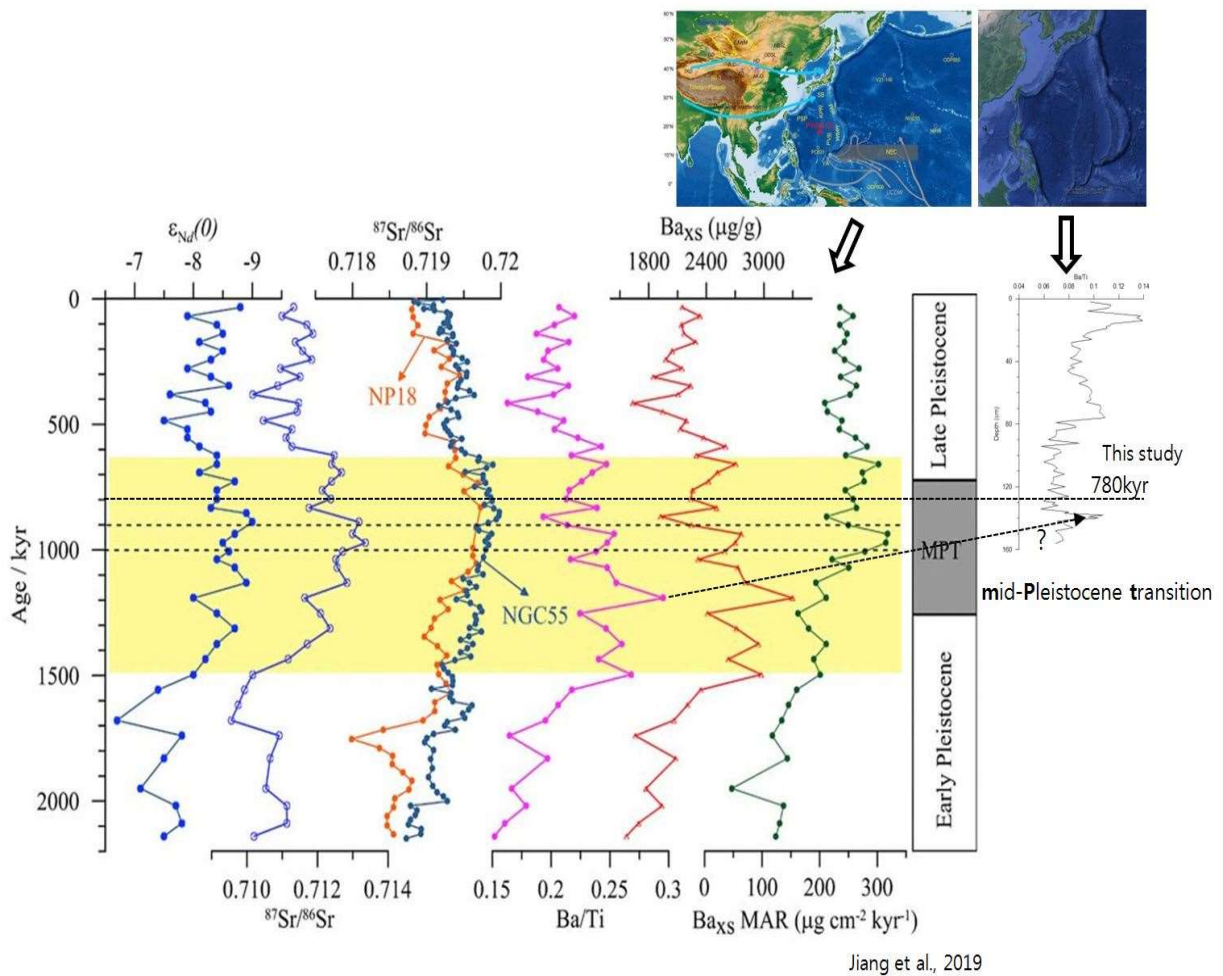


그림 36. Parece Vela 분지의 PV090102와 GPC-4 간 Ba/Ti 변화 비교

제 4 절 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803) 분석

(1) 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803)의 채취

- GPC-1803 코아는 2018년 7월 5일에 인도양 벵갈 해저 선상지(Bengal Fan; 5.34736°N, 88.83344°E)에서 채집한 GPC(Giant Piston Core) 시료이다.
- 코아 정점은 수심 3,328 m로 시추한 GPC 코아의 총 길이는 956 cm이다. 총 10개의 섹션으로 나누어 보관하였다.
- 첫번째 섹션(0~100 cm)은 전 깊이에 대하여 1 cm 간격으로 부시료를 채취하였으며, 두번째 섹션부터는 10 cm 간격으로 1 cm 두께로 채취하였다.

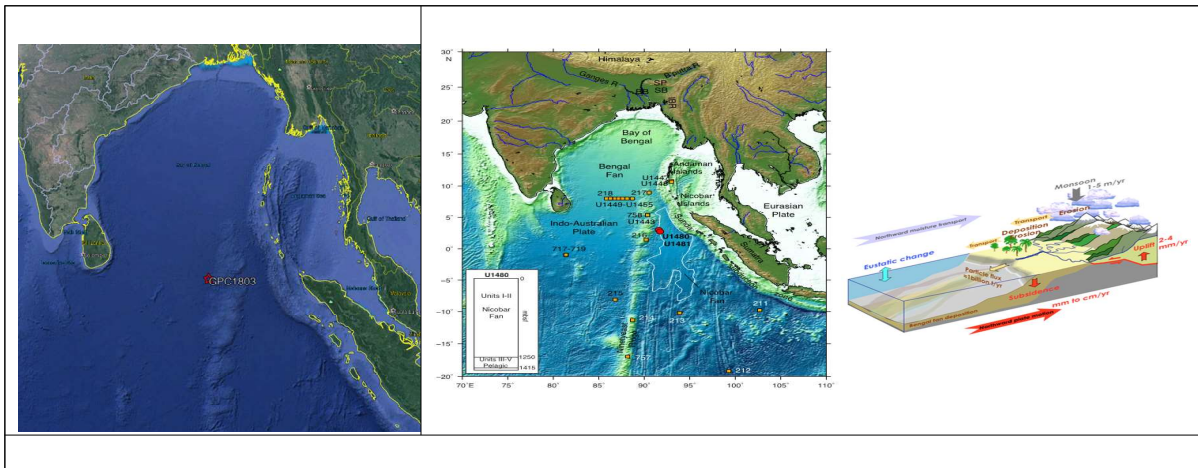


그림 37. 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803) 위치도

(2) 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803)의 분석 진행

- 함수율은 31.6~55.5%(48.0±3.48%)의 범위를 보였다. 일부 구간(120, 130, 950 cm)에서 40% 미만의 다소 낮은 함수율을 보였고, 이를 제외한 대부분의 깊이에서 48% 이상의 함수율을 보였다.
- 4Φ 이상의 조립질 함량은 5.32~30.4%(12.9±5.56%)의 범위를 보였다.
- 간극수(water content)에 의한 예비적 고찰에 의하면 이 코아는 산소동위원소단계 13 정도로, 과거 약 50만년의 기록을 보유하고 있는 것으로 판단된다.
- 현재 유공충에 의한 산소동위원소 측정이 진행중이며, MIS 13 정도로 간주하여 저서성 유공충 및 부유성 유공충에 대한 균집분석이 이루어지고 있다(그림 41).

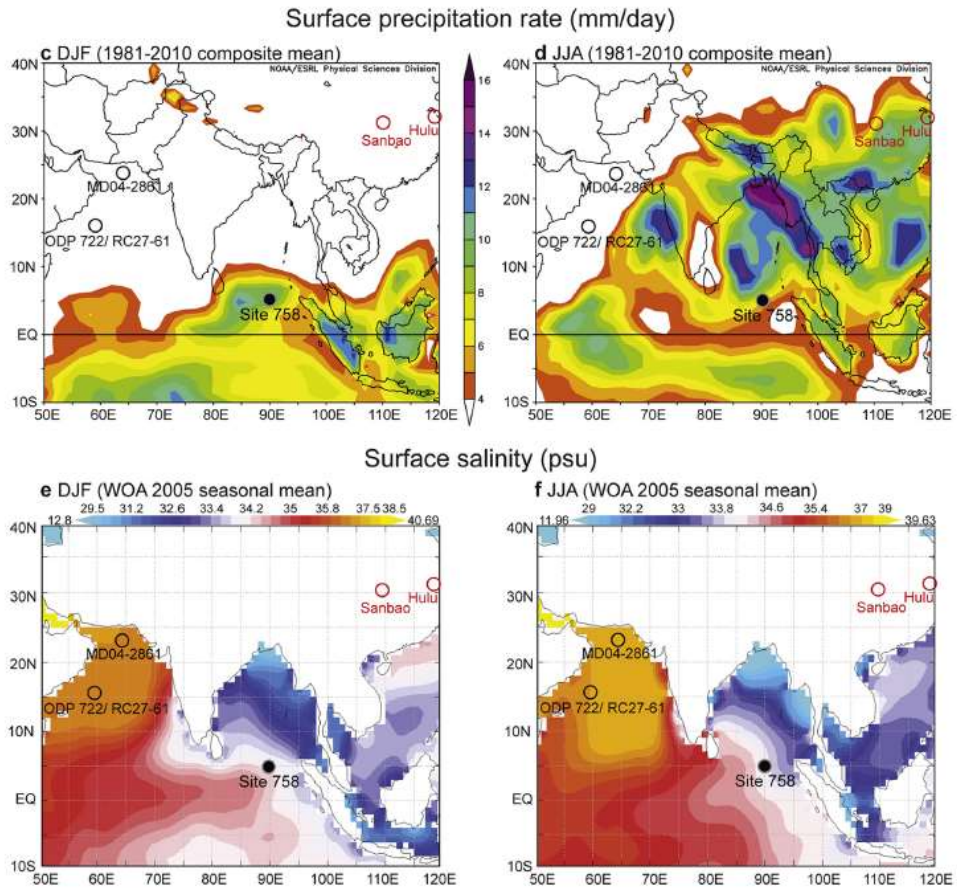


그림 38. IODP Site 758 지점 위치도(Bolton et al., 2013)

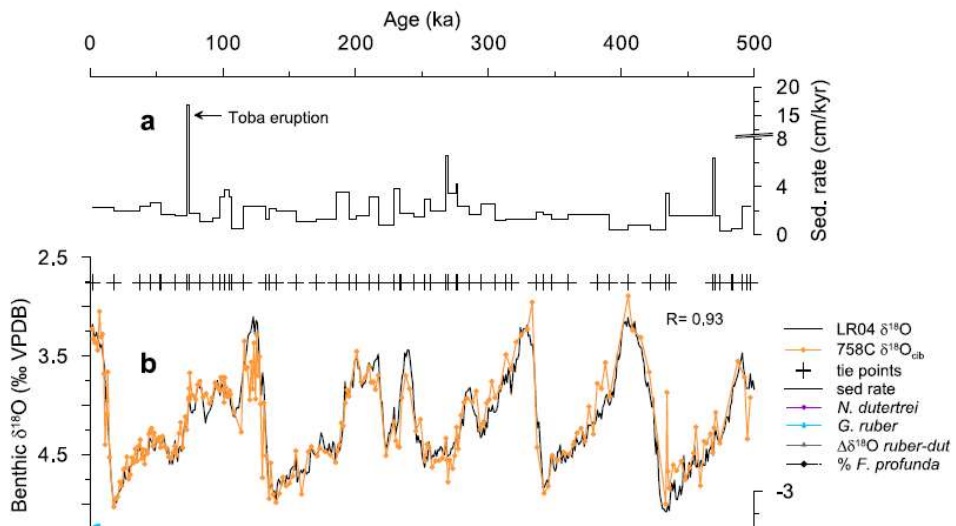


그림 39. IODP Site 758 지점의 산소 동위원소비(Bolton et al., 2013)

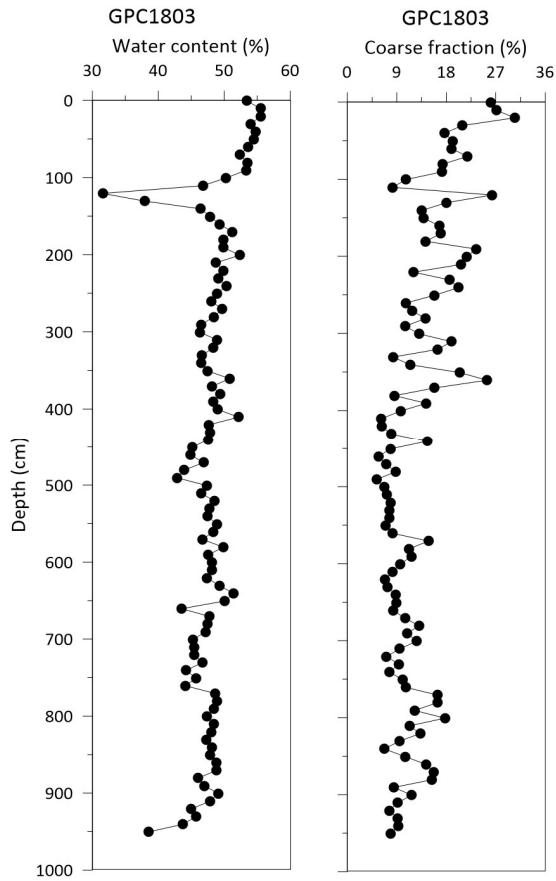


그림 40. 인도양 코아 퇴적물(GPC-1803)의 함수율과 4 Φ 이상 분포도

- 현재 GPC-1803 코아에 대한 분석이 진행중이다. 유공충 균집분석과 유공충의 산소 동위원소 분석이 진행중에 있다.

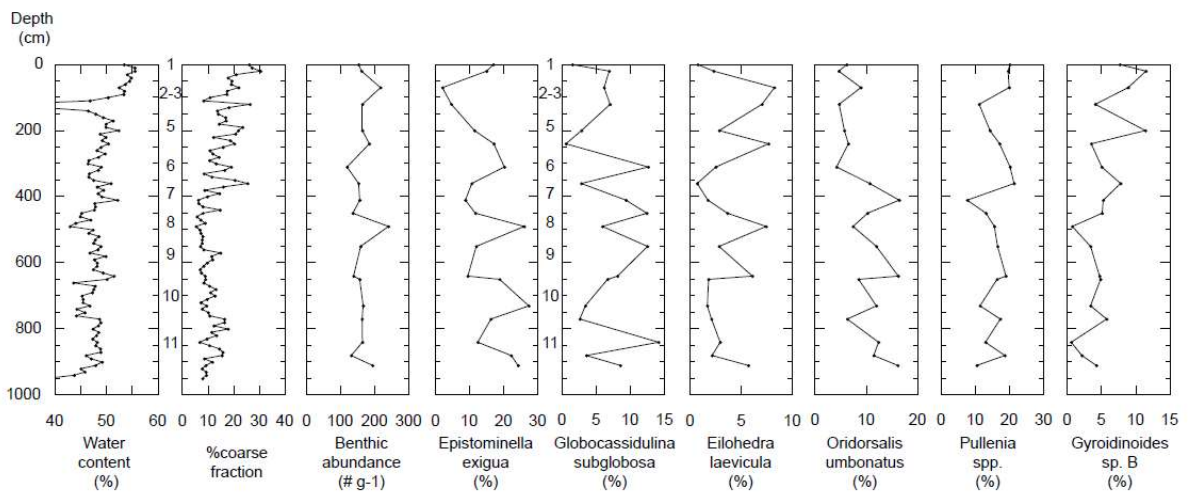


그림 41. GPC-1803 코아에서 진행중인 유공충 균집분석(asmsemblage)

제 5 절 결론

- 저위도 열대 남서태평양, 인도양 퇴적물(시료) 채취 및 중위도 지역(동해)에서 일어난 기후변화 기록 중 장주기 자연변동 파악, 기후변화 영향 파악
 - 각종 프록시에 의한 퇴적물 중에 기록된 기후변화 변동 인자 복원 연구 수행(프록시 개발 포함)

- 저위도 태평양 및 인도양, WPWP, ITF지역에 대한 퇴적물 및 기후변화 관련 각종 분석(분석항목 및 관련 정보 취득)
 - 퇴적물중 유기물의 탄소 및 질소 동위원소, n-alkanes 및 alkanes의 탄소동위원소, alkenones, 입도분석 및 각종 무기원소 분석을 통한 다양한 정보 취득
 - 위 분석들을 통하여 과거 표층 SST 복원, 육상기원 유기물 유입 및 식생변화 복원, 수소동위원소를 이용한 강수량 복원, 기후변화에 따른 육지 dust 유입 등 파악

- 기존 확보된 아시안 몬순변화, 서태평양 기록과 비교 연구를 통한 위도 간, 지역 간 기후변화 관련성 규명, 도출된 자료를 이용한 기후변화 변동성 연구를 수행

- 저위도 ITF지역에서 얻어진 코아에서는 홀로세 동안의 각종 기록을 얻을 수 있었음. 표층 SST변화는 기존에 얻어진, 홀로세 중기 이후 온도가 다소 떨어지는 현상이 확인됨. 이에 따른 육상기원 유기물의 유입 등에 관해서 심도있는 고찰이 필요.

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표달성도

총 연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년 차	연 구 성 과	진척율		성취도 (정상, 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차별 계획대비	총연구 기간대비		
2019	저위도 태평양 지역 코아 채취		100		- 저위도 태평양 지역 코아 2018년 채취
	태평양 지역 지화학 분석		95		- 태평양 지역 지화학 분석 일부완료, 일부 진행중
	태평양(동해) 시료에 대한 유기지화학 분석		90		- 동해 SST복원, 알케인 복원 - 무기 지화학 거동 복원
	태평양, 인도양 지역 육상기원 물질별 파악		90		- 인도양 시료채취, 전처리 - 태평양 코아 기타 분석 (연대, 대자율, 원소성분 및 유기일부)

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 한반도의 기후변화를 지배하는 서태평양, 저위도 지역의 해양환경, 기후변화 양상을 파악함으로써 기후 자연변동 규명을 위한 모델개발에 기초자료를 제공할 뿐만 아니라 기후변화 복원기술을 배양함
- 미래의 기후변화 예측을 위한 모델 개발을 위한 신뢰할 만한 고품질 자료를 제공하여 미래 기후예측 모델 결과에 대한 신뢰성 확보

2. 경제·산업적 측면

- 대양연구를 통하여 경제·산업적 부가가치 창출
- 과제를 수행하면서 여러 홍보활동을 통해 기후변화의 심각성을 부각시킴과 동시에 그 중요성을 홍보함

3. 사회적 측면

- 전지구적 기후변화 및 한반도 주변의 기후변화에 대한 이해 제고와 기후변화에 대한 국제적 연구 리더 지위 확보
- 국내 기관 간 협력, 국제 협력 연구를 통해 관련 연구 인프라를 확보하고 국제적 기후변화 연구에 동참함으로써 국위 선양

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

○ 추가 연구사업의 추진 및 활용방안

- 국가의 기후변화 대책에 기본 자료 제공
- 광범위에 걸친 기후변화와 영향 파악, 정책 자료로 활용
- 범지구적 기후변화 대책에 유용한 장기적인 R&D 개발에 활용

○ 기대효과

- 국제적 공동연구를 기획 및 선도적 연구역할 고양
- 이 연구는 대양연구의 성격을 띠고 있는 만큼, 향후 연구원에서 진행되는 대양연구와 결부하여 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단됨. 예산상, 시간상 완결하지 못한 연구항목에 대해 추가적인 연구의 필요성이 있으며, 이들 데이터 셋은 국제학술지에 투고하여 연구성과를 공표

제 6 장 참고문헌

- 천중화, 정대교, 한상준, 허식, 유해수, 2006. 동해 기타-야마토 해곡에서 채취된 시추코아의 테프라층서와 고환경. *자원환경지질* 39, 83-93.
- Bolton et al., 2013. A 500,000 year record of Indian summer monsoon dynamics recorded by eastern equatorial Indian Ocean upper water-column structure. *Quaternary Science Review* 77, 167-180
- Croudace IW, Rindby A, Rothwell RG, 2006. ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner. In *New Techniques in Sediment Core Analysis* (pp. 51 - 63). London: Geological Society.
- Gallagher SJ, Sagawa T, Henderson ACG, et al., 2018. East Asian Monsoon history and paleoceanography of the Japan Sea over the last 460,000 years. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 10.1029/2018PA003331.
- Irino T, Tada R, 2002. High-resolution reconstruction of variation in aeolian dust (Kosa) deposition at ODP site 797, the Japan Sea, during the last 200 ka. *Global and Planetary Change* 35, 143-156.
- Khim B-K, Tada R, Itaki T, 2014. Different nature of glacial CaCO₃ constituents between MIS 2 and MIS 12 in the East Sea/Japan Sea and its paleoceanographic implication. *Quaternary International* 333, 130-138.
- Kido Y, Minami I, Tada R, Fujine K, Irino T, Ikehara K, Chun J-H, 2007. Orbital-scale stratigraphy and high-resolution analysis of biogenic components and deep-water oxygenation conditions in the Japan Sea during the last 640 kyr. *Palaeo3* 247, 32-49.
- Stott, L et al., 2004. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature* 431, 56-59.
- Yokoyama et al., 2006. Dust influx reconstruction during the last 26,000 years inferred from a sedimentary leaf wax record from the Japan Sea. *Global and Planetary Changes* 54, 239-250.
- Yoo DG, Kang NK, Yi BY, Kim GY, Ryu BJ, Lee K, Lee GH, Riedel M, 2013. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology* 47, 236-247.