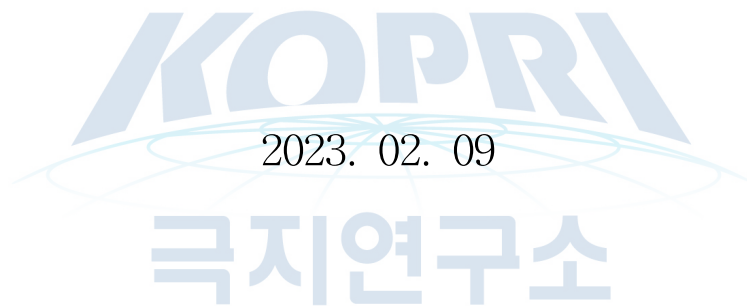


GDGT기반 과거 수온프록시 분석기법 확립:
북극해 로모노소프 해령 국제공동해저시추프로그램
참여 선행 연구

Establishing the analytical technique of the GDGT-based
paleotemperature proxy for the IODP expedition in the Arctic



한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ GDGT 기반 과거 수온프록시 분석기법 확립: 북극해 로모노소프 해령 국제공동
해저시추프로그램 참여 선행 연구”에 관한 연구 과제의 최종보고서로 제출합니다

2023. 02. 09.

연구책임자 : 김정현

참여연구원 : 남승일

“ : 손영주

“ : 김다혜

“ : 배민지 (인하대학교)

보고서 초록

과제관리번호	PE22520	해당단계 연구기간	2022.03.01.~2022.12.31	단계 구분	(1단계) / (총1단계)
연구사업명	중 사업명	연구·정책지원사업			
	세부사업명	정책·지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	GDGT 기반 과거 수온프록시 분석기법 확립: 북극해 로모노소프 해령 국제공동해저시추프로그램 참여 선행 연구			
연구책임자		해당단계 참여연구원수	총 : 5 명 내부 : 4 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 50,000천원 기업: 천원 계: 50,000천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 빙하환경연구본부		참여기업명	해당사항 없음	
국제공동연구	상대국명 : 해당사항 없음		상대국연구기관명 : 해당사항 없음		
위탁연구	해당사항 없음				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	60
<p>가. 환경시료 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 극지연구소 북극 퇴적코어 아카이브를 활용한 동해 및 서북극해 퇴적물 시료 확보 ○ 국내·외 연구네트워크를 활용한 소양호, 황해 및 노르딕해 환경시료 확보 ○ 극지연구소 아카이브를 활용한 서북극해 멀티코어 퇴적물 시료 확보 <p>나. 선진국 수준의 GDGT 분석 인프라 확립</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ GDGT 분석 인프라 구축 ○ 동해와 황해 퇴적물 시료 GDGT 분석 결과 확보 ○ 환경시료 분석을 통한 선진국형 GDGT 분석기법 확립 <p>다. 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 북극해에 적용 가능한 GDGT 분석기법 확립 ○ 서북극해를 포함한 다양한 환경시료 GDGT 분석 결과 확보 ○ 비교 연구용 타기관 환경시료 GDGT 자료 확보 ○ 북극해에 최적화된 GDGT 분석기법을 활용한 북극해 고수온 복원 가능성 확인 <p>라. 성과의 향후 활용방안</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 북극해에 활용 가능한 과거 수온프록시 분석기술을 확보함으로써 향후 IODP 국제공동시추 연구에서 핵심참여자로 선도적 역할 수행 가능함 ○ 확보한 과거 수온프록시 분석기술은 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 등과 같은 현재 극지연구소에서 수행 중인 연구과제에도 활용 가능함 ○ 확보한 과거 수온프록시 분석기술 기반으로 추후 북극해 과거 기후·환경 복원과 관련된 극지연구소 주요 사업 도출 가능함 ○ 확보한 분석기술은 북극해 빅사이언스 과제와 관련해 다양한 분야의 국내외 공동연구 활성화에 기여 가능함 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 고수온프록시, GDGTs, TEX ₈₆ , RI-OH'			
	영 어	Arctic Ocean, paleo-temperature proxy, GDGTs, TEX ₈₆ , RI-OH'			

요 약 문

I. 제 목

GDGT 기반 과거 수온프록시 분석기법 확립: 북극해 로모노소프 해령 국제공동해저시추프로그래م 참여 선행 연구

II. 연구개발 목적

- 선진국 수준의 GDGT 분석 인프라 확립
- GDGT 기반 북극해에 최적화된 과거 수온 복원 기술 확보

III. 연구개발 내용

- 극지연구소 북극 퇴적코어 아카이브 조사
- 국내·외 연구네트워크를 활용한 환경시료 아카이브 조사
- 동해와 소양호 환경시료의 GDGT 분석
- 황해와 서북극해 표층퇴적물의 GDGT 분석
- 노르딕해 표층퇴적물과 서북극해 코어 퇴적물 시료의 GDGT 분석
- KOPRI와 타기관의 GDGT 결과 비교

IV. 연구개발 결과

- 동해와 북극해 퇴적물 시료 확보
- 황해, 소양호 및 노르딕해 환경시료 확보
- 동해와 소양호 환경시료의 GDGT 자료 확보
- 황해와 서북극해 표층퇴적물의 GDGT 자료 확보
- 노르딕해 및 서북극해 퇴적물의 GDGT 자료 확보
- GDGT 분석 인프라 확립 및 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보

V. 연구개발 결과의 활용계획

- 북극해에 활용 가능한 과거 수온프록시 분석기술을 확보함으로써 향후 IODP 국제공동시추 연구에서 핵심참여자로서 선도적 역할 수행 가능함
- 확보한 과거 수온프록시 분석기술은 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 등과 같은 현재 극지연구소에서 수행 중인 연구과제에도 활용 가능함
- 본 선행연구 결과를 토대로 북극해 과거 기후환경 복원과 관련된 극지연구소 주요 사업 도출
- 본 선행연구 결과를 토대로 북극해 빅사이언스 국제공동연구 활성화 기여

S U M M A R Y

I. Title

Establishing the analytical technique of the GDGT-based paleotemperature proxy for the IODP expedition in the Arctic

II. Purpose and Necessity of R&D

- To establish GDGT analytical techniques at the level of world-wide leading groups
- To obtain GDGT analytical techniques optimized for reconstructing past sea surface temperatures in the western Arctic based on KOPRI's own technique

III. Contents and Extent of R&D

- To survey the sediment samples in the Arctic sedimentary core repository of KOPRI
- To survey the environmental samples through the national-international research networks
- To analyze the environmental samples collected from the East Sea and the Soyang Lake
- To analyze the surface sediment samples collected from the Yellow Sea and the western Arctic
- To analyze the surface sediment and sediment core samples collected from the Nordic Seas and in the western Arctic
- To compare KOPRI GDGT results with those obtained in other institutes

IV. R&D Results

- Acquisition of sediment samples collected in the East Sea and the western Arctic
- Acquisition of sediment samples collected in the Yellow Sea, the Soyang Lake and the Nordic Seas
- GDGT results obtained from the East Sea and the Soyang Lake
- GDGT results obtained from the Yellow Sea and the western Arctic
- GDGT results obtained from the Nordic Seas and in the western Arctic
- GDGT results obtained from the Nordic Seas and in the western Arctic
- Established infrastructure for the GDGT analysis at KOPRI and establishment of the KOPRI GDGT analytical technique optimized for the Arctic ocean

V. Application Plans of R&D Results

- To lead future IODP-related projects as a key player based on the results obtained from this project
- To apply the new analytical technique established from this project for other KOPRI projects
- To develop a new project related to Arctic climate changes based on the results obtained from this project
- To strengthen national and international collaborations by participating in the international big science programs in the Arctic based on the results obtained from this project

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	4
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	6
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute	45
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	47
Chapter 6 References	48



목 차

제 1 장 서론	1
제 1절. 연구개발의 필요성	1
제 2절. 연구개발의 목적과 범위	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	4
제 1절. 국내 기술개발 현황	4
제 2절. 국외 기술개발 현황	5
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	6
제 1절. 환경시료 확보	6
제 2절. 선진국 수준의 GDGT 분석 기술 확립	14
제 3절. 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보 및 활용	27
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도	45
제 1절. 연구개발목표의 달성도	45
제 2절. 관련분야 기술개발의 대외기여도	46
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	47
제 6 장 참고문헌	48

제 1 장 서론

제 1절. 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

- 장비 측정 또는 위성 관측 자료를 바탕으로 한 연구 방법으로는 장기간의 수온 기록(1979년 이전) 복원이 불가능함
- 따라서 현장 및 위성 관측 기반 자료 이전의 수온 기록은 고해양 프록시 기술을 통해서만 획득 가능함
- 향후 추진될 국제공동해저시추프로그램(IODP, International Ocean Discovery Program) 탐사에서 획득한 시료를 활용하여 북극해 과거 수온 변화 복원 연구를 진행하기 위해 선진국 수준의 수온 프록시 분석 기술 확보가 필요함 (※2004년 이후 북극해에서 두 번째로 2022년 8월부터 6주간 국제공동해저시추프로그램과 유럽공동해저지각시추 컨소시엄(ECORD, European Consortium for Ocean Research Drilling)이 공동으로 추진한 국제거대지구과학 프로그램 ‘로모노소프 해령 심부 시추’ 탐사가 예정되었으나 전 세계적인 ‘COVID-19’ 및 ‘러-우크라이나 전쟁’으로 인한 여파로 취소되었음)

2. 경제·산업적 측면

- 북극해 미래 항로 개척 및 활용을 대비한 북동항로에 위치한 중앙해역의 해빙 및 결빙 정보 확보가 필요함

3. 과학적 측면

- 전 지구적 열염분 순환에 중요한 역할을 하는 북극해의 장기간 환경변화 규명을 위해서는 우선 현재 관측자료에 기반해 개발된 수온프록시를 활용한 과거 수온 복원이 필요함
- 관측/측정 시기 이전의 북극해 환경 변화 기록 복원을 위해서는 북극해에 최적화된 수온프록시 분석기술 확보가 필요함

4. 사회·문화적 측면

- 추후 진행될 거대지구과학 프로그램 ‘로모노소프 해령의 심부 시추’는 전 세계가 주목하고 있는 국제공동해저시추프로그램으로 극지연구소가 주도적으로 참여함으로써 북극해 주요 이슈 해결을 위한 국제공동연구를 통한 국가 위상 제고가 필요함
- 전 세계 13개국(한국, 미국, 독일, 노르웨이, 일본, 스웨덴, 프랑스, 중국 등) 37명의 과학자가 참여하는 국제공동해저시추프로그램에 극지연구소의 주도적 역할 수행으로 북극해 연구성과 확산 및 극지연구 활성화가 필요함



제 2절. 연구개발의 목적과 범위

1. 연구개발의 목적

- GDGT 기반 북극해에 최적화된 과거 수온 복원 기술 확보

2. 연구개발의 범위

가. 환경시료 확보

- 극지연구소 북극 퇴적코어 아카이브를 활용한 동해 및 서북극해 퇴적물 시료 확보
- 국내·외 연구네트워크를 활용한 소양호, 황해 및 노르딕해 환경시료 확보
- 극지연구소 아카이브를 활용한 서북극해 멀티코어 퇴적물 시료 확보

나. 선진국 수준의 GDGT 분석 인프라 확립

- GDGT 분석 인프라 구축
- 동해와 황해 퇴적물 시료 GDGT 분석 결과 확보
- 환경시료 분석을 통한 선진국형 GDGT 분석기법 확립

다. 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보

- 북극해에 적용 가능한 GDGT 분석기법 확립
- 서북극해를 포함한 다양한 환경시료 GDGT 분석 결과 확보
- 비교 연구용 타기관 환경시료 GDGT 자료 확보
- 북극해에 최적화된 GDGT 분석기법을 활용한 북극해 고수온 복원 가능성 확인

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1절. 국내 기술개발 현황

- 국내 과거 수온 복원을 위한 GDGT 기반 프록시 연구는 초보 수준임
 - 전 지구적인 규모로 지구온난화가 진행되면서 극지역에서 강수의 변화에 따른 자연재해가 과거에 비해 더욱 돌발적으로 빈번하게 발생함에 따라 생태계뿐만 아니라 인류의 생활과 생존에도 막대한 영향을 미치고 있음
 - 최근 일어나고 있는 기후변화를 정확하게 판단하고 평가할 수 있는 기초자료가 매우 필요한 실정이며, 이를 위해서는 과거에 일어났던 기후변화를 정확하게 복원하여 미래에 일어날 수 있는 기후변화의 패턴과 영향을 보다 정확하게 이해하고 예측할 필요성이 강조되고 있음
 - 특히, 북극해는 남극해와는 다르게 대륙으로 둘러싸여 있고, 베링해협과 프람해협을 통해 태평양, 대서양과 연결되어 수괴의 교환이 일어나기 때문에 수온의 장기적, 자연적 추세를 파악하는 것이 최근 급속한 변화를 이해하는 데 매우 필수적임
 - 그러나, 유기분자생체지표를 활용한 북극해 과거 수온 기록 복원 연구는 선진국에 비해 매우 초보적인 수준이며, 극지연구소 내에서 수행한 선행과제도 주로 해빙복원에 중점을 두고 있을뿐, GDGT 기반 수온프록시 분석 인프라의 부재로 과거 수온 복원에 관한 과제는 아직까지 수행된 바 없음
 - 과거 수온 변화 정밀 복원(100-1,000년 단위)에 적용하기 위해서는 좀 더 확고한 기술 확립 및 선진국 수준의 국제표준화 분석기법이 필요함
 - 2004년 네덜란드에서 처음으로 GDGT 기반 수온프록시를 소개한 이후 2010년 북극해에 좀 더 정확한 수온 복원을 위해 본 과제 신청자에 의해 제안된 적이 있음. 이후에도 고수온 프록시 개발이 국외에서 지속적으로 시도되고 있으나 이러한 분석기법은 아직 한국연구팀에 의해 북극해에서 시도되지 않은 상태임

- 국내에서는 과거 수온 복원 연구를 위한 인적 인프라 부족함
 - 연구를 위한 분석 장비뿐만 아니라 관련 연구 인력 또한 부족한 실정임
 - 유기분자생체지표 분석시스템의 지속적 활용을 위해서는 구축된 인프라를 유지·발전시킬 수 있는 인력양성이 동시에 이루어져야 함

제 2절. 국외 기술개발 현황

- 선진국에서는 GDGT 기반 수온프록시를 활용한 고환경/고수온 복원 연구가 활발하게 진행되고 있음
 - GDGT 기반 수온프록시 TEX_{86} (Wuchter et al., 2004)은 2004년 네덜란드 왕립해양연구소(NIOZ) 팀이 처음으로 소개한 이후 2010년에 극지해역에서 좀 더 정확한 수온 복원을 위해 TEX_{86} -L (Kim et al., 2010)이 제안되는 등 유기분자생체지표의 분석기법에 토대를 두고 이를 활용한 연구가 네덜란드, 프랑스 및 독일을 중심으로 꾸준히 증가하는 추세를 보임
 - 뿐만 아니라 다른 다양한 고수온·고환경 프록시들이 지속적으로 국외에서 개발되고 있으며 이와 관련된 프록시 검증 연구가 활발히 진행되고 있음
 - 특히 2012년 이후 OH-GDGT 기반 수온프록시가 소개되어 현재 독일 등의 선진국에서 북극해 과거 수온 복원을 통한 고기후·고환경 연구에 보퍼트해에서 시추된 아라온 시추코어를 활용하여 연구가 추진되었음(Wu et al., 2020, 그림 1)

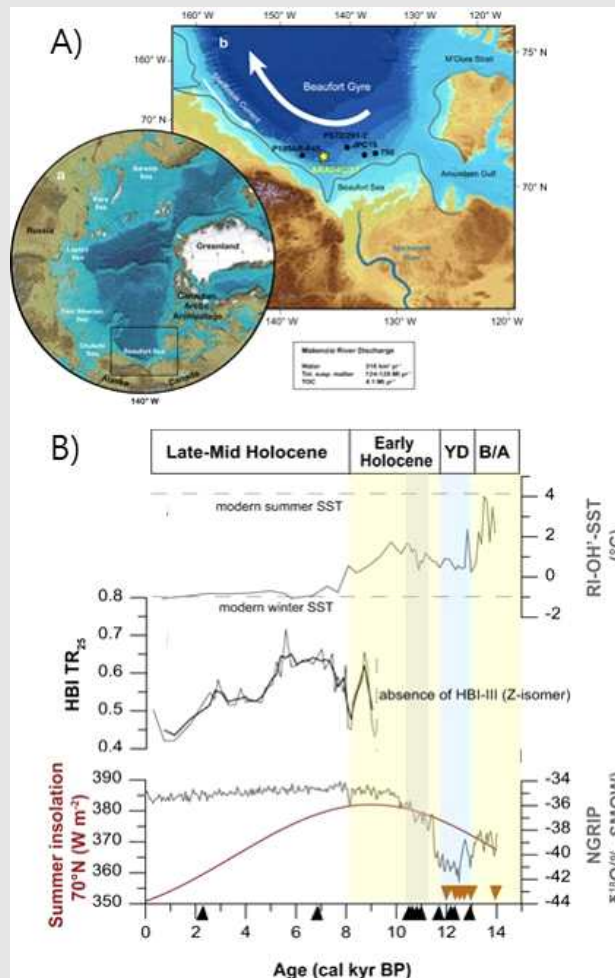


그림 1. GDGT 기반 수온프록시가 보퍼트해에서 사용된 예: A) 퇴적코어 ARA04C/37 정점, B) GDGT 기반 수온프록시 RI-OH' 기록 (modified from Wu et al., 2020).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. 환경시료 확보

1. 극지연구소 북극해 퇴적코어 아카이브 활용

가. 동해 멀티코어 퇴적물 시료 확보

- 2013년 아라온을 활용한 동해 시험항해를 통해 획득한 멀티코어 퇴적물 시료 (ARA04ES-02MUC-01)를 본 과제에서 GDGT 분석을 위한 Lab reference sample로 활용함

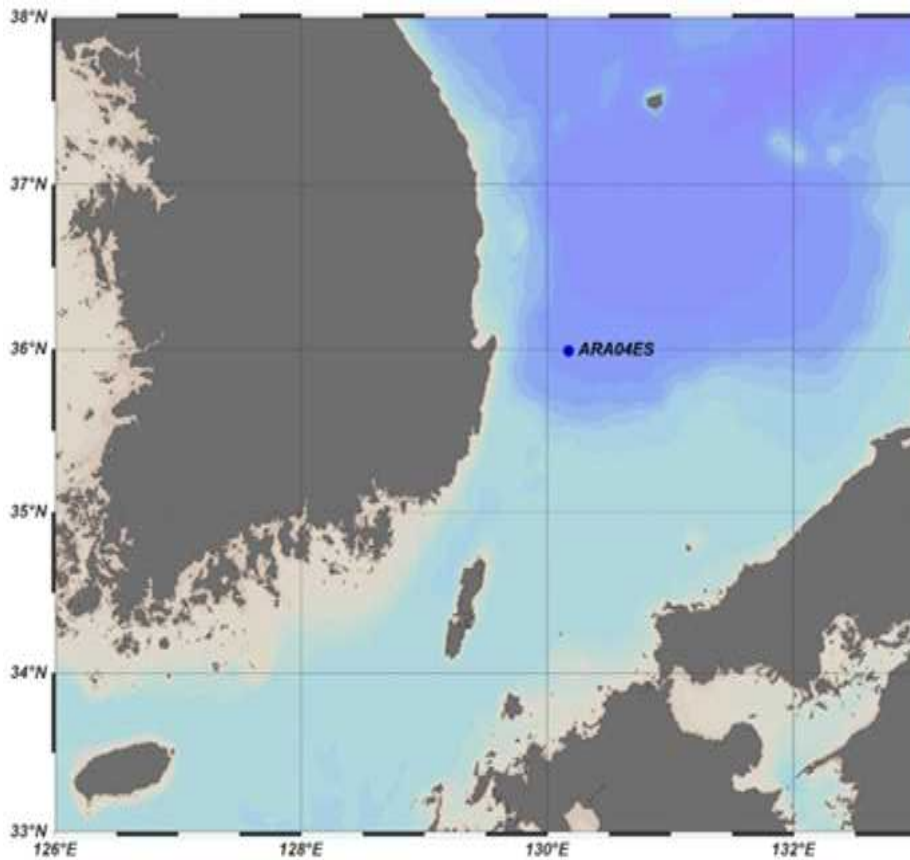


그림 2. 동해 시험항해에서 획득한 멀티코어 퇴적물 시료 정점.

표 1. 동해 퇴적물 시료 정보.

Core name	Longitude	Latitude	Water depth (m)
ARA04ES-02MUC-01	35°59.295N	130°10.258E	2206

나. 서북극해 표층퇴적물 시료 확보

- 지난 10년간 서북극해(척치해, 동시베리아해 및 버포트해)에서 수행된 아라온 항차(ARA01-ARA10)를 통해 획득한 박스 코어 및 멀티코어 시료(그림 3A) 중 척치해와 동시베리아해에서 채집한 샘플(총 28점, 그림 3B 및 표 1)을 본 과제의 연구대상으로 확정함

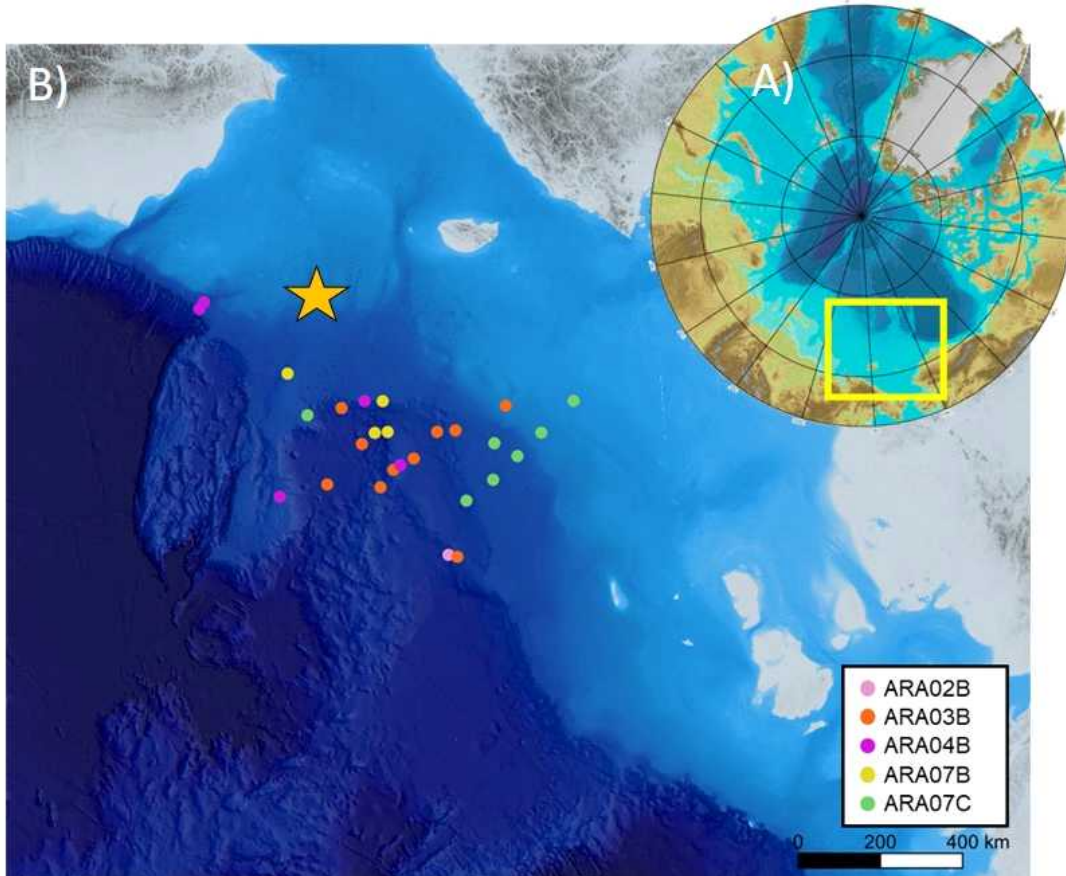


그림 3. A) ARA01-ARA10 항차 동안 수행된 박스코어 및 멀티코어 정점, B) 본 과제에서 연구대상으로 사용한 표층퇴적물 시료 정점(n=28).

표 2. 서북극해 퇴적물 시료 정보.

No.	Sample name	Longitude	Latitude	Water depth (m)
1	ARA02B 11 BOX-01	174.001	78.000	1375
2	ARA03B 19 BOX-01	173.041	77.968	1079
3	ARA03B 24 BOX-01	174.000	74.500	57
4	ARA03B 26 BOX-01	177.297	75.374	354
5	ARA03B 27 BOX-01	178.792	75.521	676
6	ARA03B 28A BOX-01	-179.838	76.220	1177
7	ARA03B 28B BOX-01	-178.260	76.569	762
8	ARA03B 29A BOX-01	-177.428	77.004	1428
9	ARA03B 30A BOX-01	-172.241	77.144	1961
10	ARA03B 31 BOX-01	-174.922	76.152	2176
11	ARA07C BC_ST-04_1	171.495	75.423	150
12	ARA07C BC_ST-05_1	170.455	74.744	60
13	ARA07C BC_ST-07_1	169.194	73.815	45
14	ARA07C BC_ST-13_1	-169.737	75.680	610
15	ARA07B BC_ST-14	-167.810	74.799	222
16	ARA07B BC_ST-16	-176.030	75.147	317
17	ARA07B BC_ST-18	-176.989	75.786	484
18	ARA07B BC_ST-23	-175.881	75.862	1564
19	ARA03B 35A BOX-01	-172.641	75.443	1077
20	ARA04B 01 MUC	-161.239	73.228	352
21	ARA04B 02 MUC	-161.243	73.229	341
22	ARA04B 03 MUC	-160.860	73.367	444
23	ARA04B 07 MUC	-167.644	77.501	490
24	ARA04B 11 MUC	-178.794	76.430	940
25	ARA04B 18 MUC	-174.507	75.214	366
26	ARA07C BC_ST-01_1	173.764	75.356	185
27	ARA07C BC_ST-02_1	174.261	76.748	700
28	ARA07C BC_ST-03_1	172.655	76.107	270

다. 서북극해 멀티코어 퇴적물 시료 확보

- 2011년 척치해에서 수행된 아라온 항차(ARA02B)를 통해 획득한 멀티코어 퇴적물 시료 (ARA02B-01(A)MUC)를 본 과제에 활용하여 GDGT 분석을 수행함(그림 4 및 표 3)

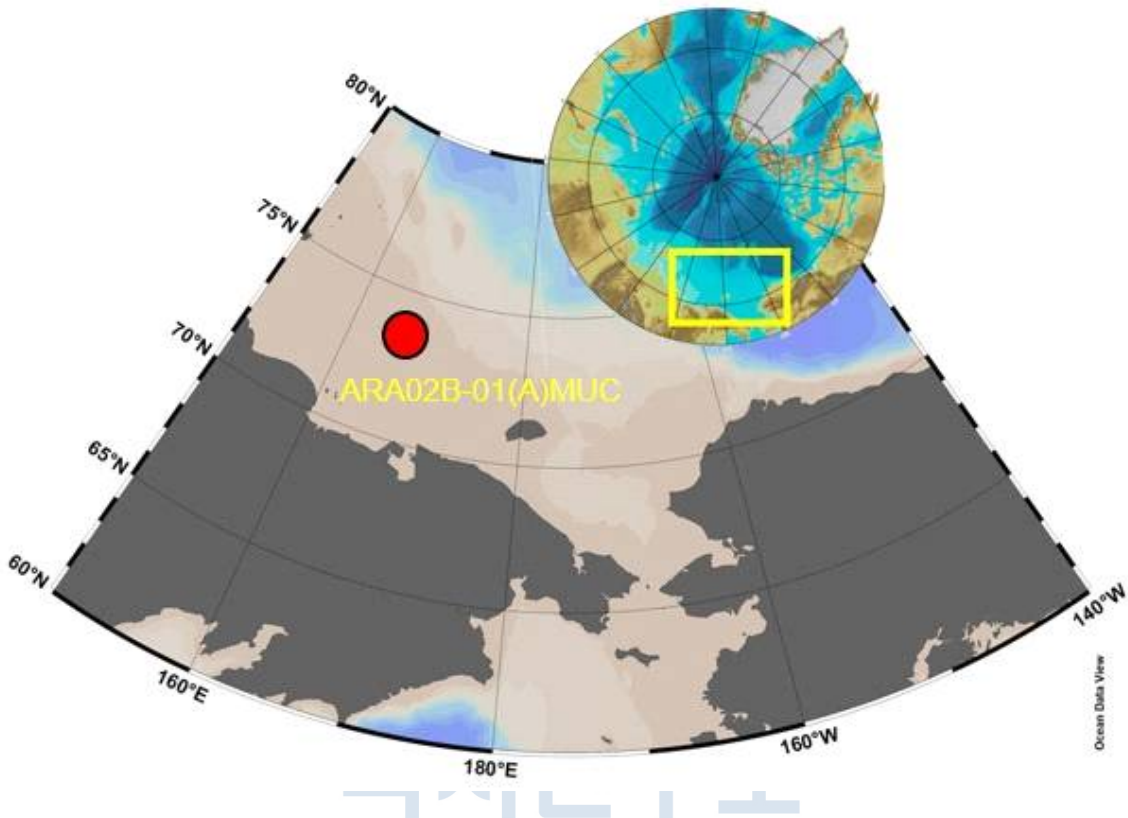


그림 4. 2011년 아라온 북극 탐사를 통해 획득한 멀티코어 퇴적물(ARA02B-01(A)MUC)시료 정점.

표 3. 서북극해 코어퇴적물 시료 정보.

Core name	Longitude	Latitude	Water depth (m)
ARA02B-01(A)MUC	166.517	73.617	119

2. 국내·외 연구네트워크 활용

가. 소양호 환경시료 확보

- 한양대학교 신경훈 교수님팀에서 2014년 강원도 양구 소재의 소양호에서 획득한 표층퇴적물 및 토양시료 총 6점을 본 과제에 활용하여 GDGT 분석을 수행함(그림 5 및 표 4)

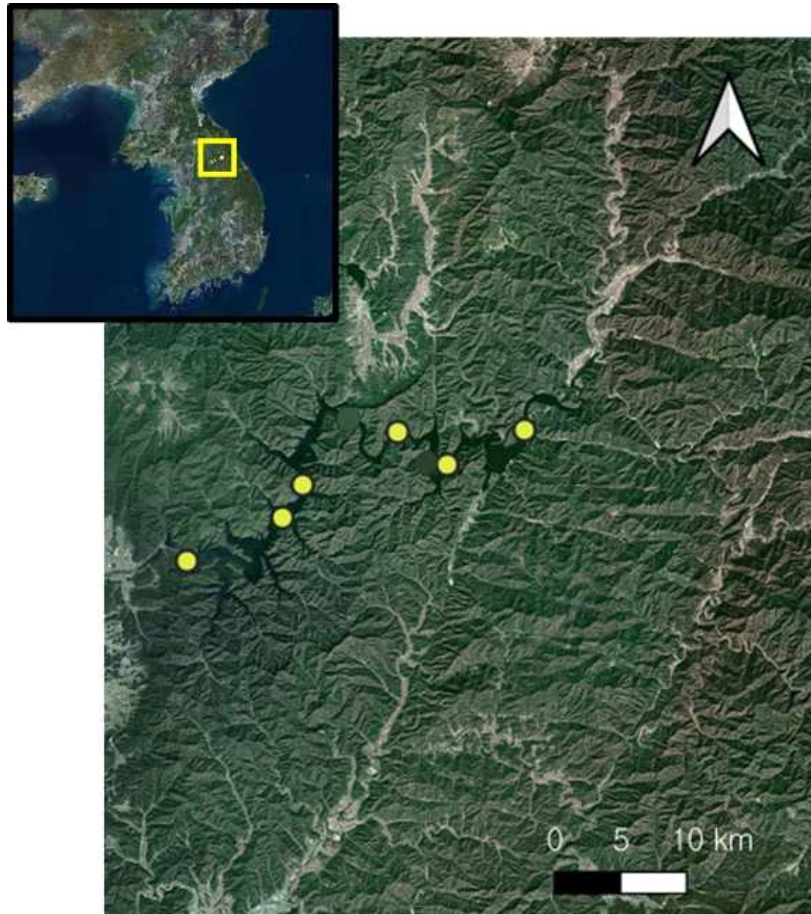


그림 5. 소양호 환경시료 샘플링 정점.

표 4. 소양호 환경시료 정보.

Sample name	Sampling date	Longitude	Latitude
SY-1	2014-05-28	127.915	37.963
SY-4	2014-05-28	127.933	37.985
SY-5	2014-05-28	127.973	38.030
SY-6	2014-05-28	128.015	38.020
SY-7	2014-05-28	128.041	37.999
SY-8	2014-05-28	128.057	37.998

나. 황해 표층퇴적물 시료 확보

○ 한양대학교 신경훈 교수님팀과 협업을 통해 황해에서 획득한 표층퇴적물 총 9점을 본 과제에 활용하여 GDGT 분석을 수행함(그림 6 및 표 5)

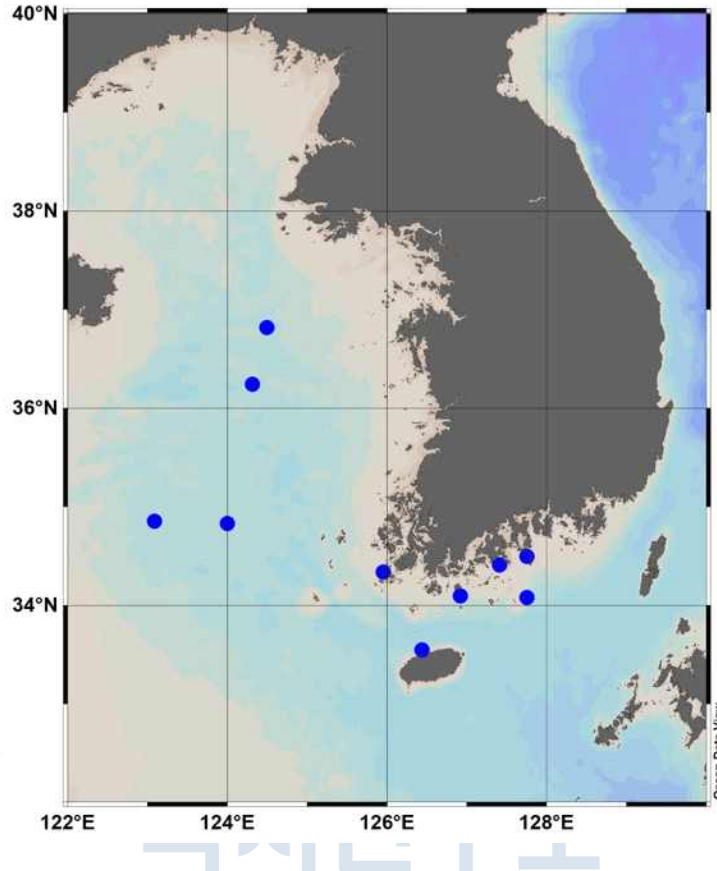


그림 6. 황해 표층퇴적물 시료 샘플링 정점.

표 5. 황해 표층 퇴적물 시료 정보.

No.	Sample name	Longitude	Latitude
1	2001-D05	123.086	34.855
2	YS63-52	124.000	34.830
3	2014_EEZ_S18	124.498	36.820
4	15YS-BC-A	124.313	36.244
5	ECO-09-9	127.752	34.079
6	ECO-09-12	127.408	34.411
7	ECO-09-22	126.921	34.095
8	ECO-11-4	126.438	33.548
9	YS(090)-B-01	127.756	34.496

다. 노르딕해 표층퇴적물 시료 확보

- 프랑스 보르도대학 제롬 보나 교수와의 국제공동연구를 통해 2014년과 2017년 노르딕해 탐사 중 획득한 표층퇴적물 시료 각각 12점, 11점, 총 32점을 본 연구에 활용하여 GDGT 분석을 수행함(그림 7 및 표 6)

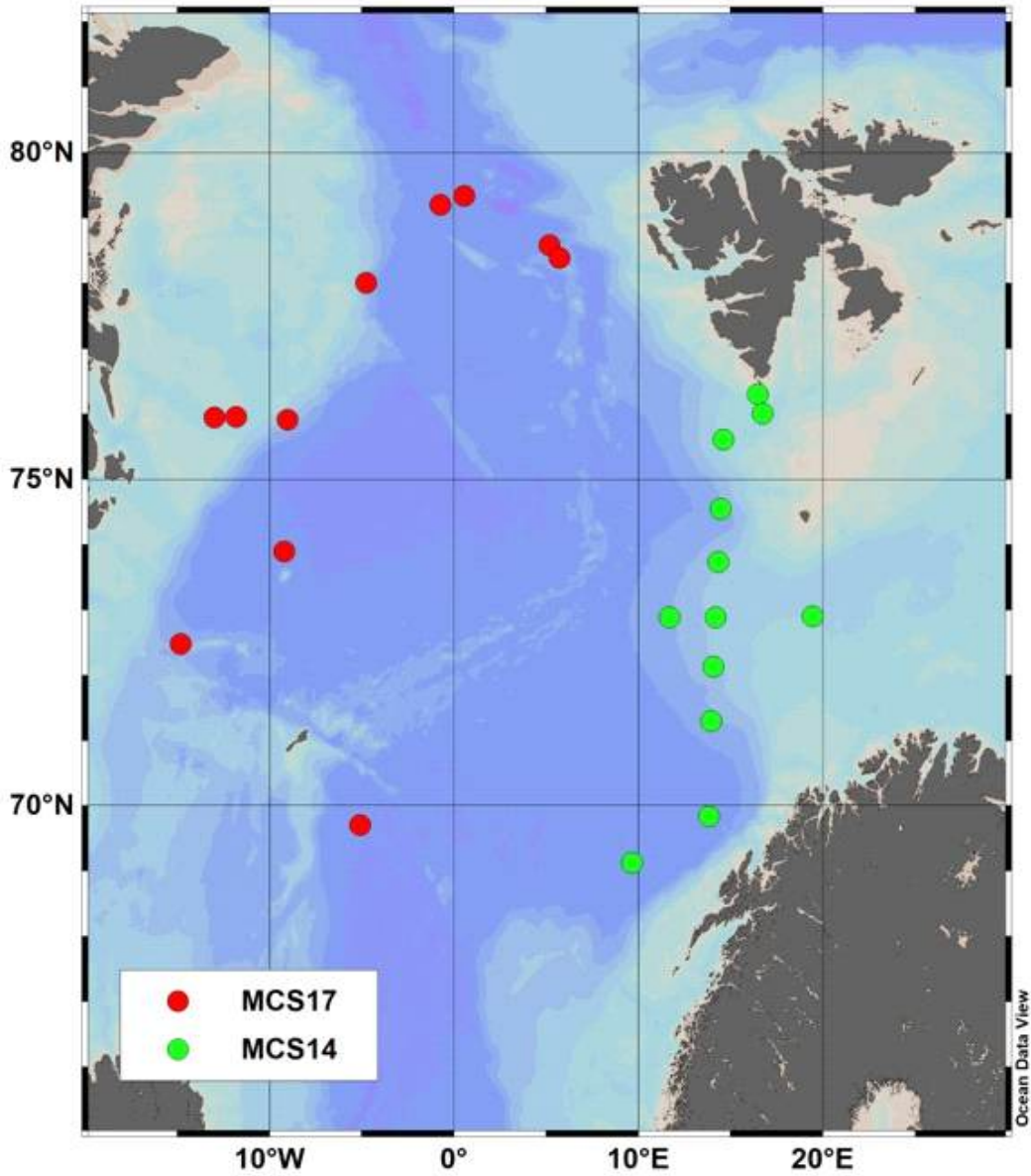


그림 7. 2014년, 2017년 노르딕해에서 획득한 표층퇴적물 시료 샘플링 정점.

표 6. 노르딕해 표층퇴적물 시료 정보.

No.	Sample name	Longitude	Latitude	Water depth(m)
1	MCS14-1	11.723	72.877	1850
2	MCS14-2	19.467	72.896	430
3	MCS14-3	13.852	69.833	2687
4	MCS14-4	13.971	71.293	1940
5	MCS14-5	14.098	72.122	1265
6	MCS14-6	14.212	72.881	985
7	MCS14-7	14.342	73.728	1360
8	MCS14-8	14.468	74.537	2041
9	MCS14-9	14.632	75.602	394
10	MCS14-10	16.500	76.300	95
11	MCS14-11	16.743	76.000	326
12	MCS14-12	9.681	69.119	3000
13	MCS17-1	-5.065	69.701	3144
14	MCS17-3	-14.785	72.470	1759
15	MCS17-4	-9.180	73.890	3106
16	MCS17-6	-8.999	75.909	1385
17	MCS17-7	-12.966	75.939	276
18	MCS17-8	-11.793	75.945	388
19	MCS17-9	-4.749	78.000	1720
20	MCS17-10	-0.717	79.200	2674
21	MCS17-11	0.591	79.333	3095
22	MCS17-12	5.190	78.579	2297
23	MCS17-13	5.751	78.383	1678

제 2절. 선진국 수준의 GDGT 분석 인프라 확립

1. GDGT 분석 인프라 구축

가. ASE 추출 장비 및 GDGT 분석 장비 테스트

- 유기분자생체지표 중 하나인 GDGT(Glycerol dialkyl glycerol tetraether)는 특정 archaea, 및 bacteria에 의해 합성되는 물질로 퇴적물 내 미량으로 존재하기 때문에 고온(100°C 이상)· 고압(1000 psi 이상)의 조건에서 유기용매로 추출한 후, 고분해능 액체크로마토그래피 질량분석기(UHPLC-APCI-MS; Ultra High Performance Liquid Chromatography-Atmospheric Pressure Chemical Ionization-Mass Spectrometry)를 이용하여 검출함
- 이를 위해 ‘서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구’ 과제를 통해 2022년도 2월에 UHPLC-APCI-MS를 도입하였으며 ‘북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구’ 과제를 통해 2022년도 8월에 가속용매추출장치(ASE; accelerated solvent extraction)를 도입함(그림 8)



그림 8. 본 연구에 활용한 장비 사진(위: UHPLC-APCI-MS, 아래; ASE).

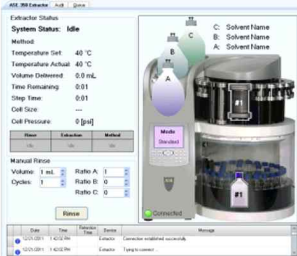
- 장비 구축 후 Thermo Scientific 및 Agilent Technologies 본사의 장비 전문가가 방문하여 ASE, UHPLC-APCI-MS 장비 사용에 대한 교육을 진행함. 장비 운영 원리와 운영법, software 사용방법 및 장비 유지 보수에 관한 내용 등을 상세히 교육함(그림 9)



Dionex ASE 350 Accelerated Solvent Extractor Operator's Manual

2.4.2 Remote Control

In Remote mode, Chromleon software sends commands from the host computer to the Dionex ASE 350 via the USB interface. Connecting the Dionex ASE 350 to a Chromleon ePanel (see Figure 2-23) immediately selects Remote mode. (An ePanel is the window from which you monitor and control Dionex ASE 350 operation. ePanels are displayed in the Console in the Instruments view.)



3.3.2 Example Methods

Example Method 5: Solvent Saver Fixed Volume Mode

NOTE Chromleon software control is required in run fixed volume methods.

Figure 3-25 illustrates the Extraction Method page for Example 5. In this method, the solvent volume is less than the cell volume.

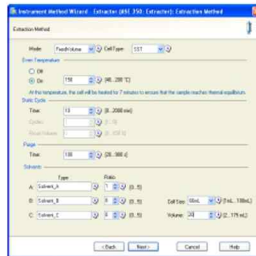
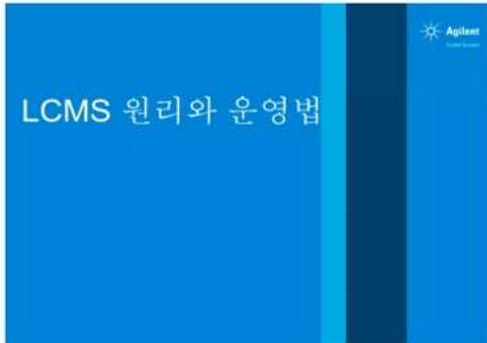
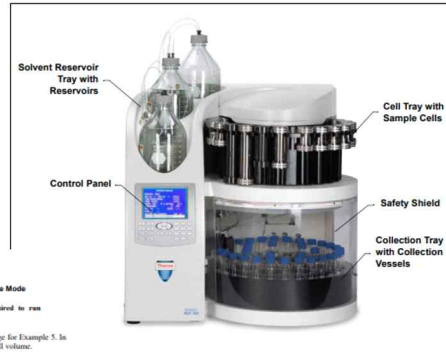


Figure 3-25. Example Method 5: Fixed Volume Mode

1.1 Overview

The Thermo Scientific™ Dionex™ ASE™ 350 Accelerated Solvent Extractor (see Figure 1-1) is an automated system for extracting organic compounds from a variety of solid and semisolid samples. The Dionium™ internal pathway allows extraction of mildly acidic or basic samples.



Contents

1. LCMS 이온화 원리
2. Mass Filter의 원리
3. Software 운영법
4. LCMS 유지보수



APCI 사용시 고려 사항

- 시료**
- 분자량과 극성이 중간인 화합물: PAHs, PCBs, Fatty acids, phthalate
 - 분자구조내에 산성 및 염기성기가 없는 화합물: Hydrocarbons, Alcohols, Aldehydes, Ketones, Esters
 - 이온원자를 포함한 화합물: Ureas, Benzodiazepines, Carbamates
 - APCI-ES 소스에서 이온성이 떨어지는 물질들
 - 입자 빔이나 열분사기에 잘 작동하는 물질들

- 용액 화학 재개변수**
- APCI-ES 보다 용액 희석이 덜 민감
 - APCI-ES 보다 높은 용량도 가능
 - APCI-ES와 호환되지 않는 몇몇 용매도 가능

- 피해야 할 시료**
- 일반적으로 용액 내에서 다중 전하 형태로 락는 화합물: Proteins, Peptides, Oligonucleotides
 - 기화 과정 때문에 불안정한 화합물: Steroids, Aminoglycosides, 일부 폭발성 물질들

분무기 니들 조절3

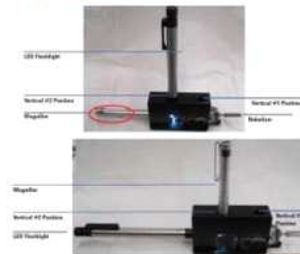


그림 9. ASE (위) 및 UHPLC-APCI-MS (아래) 교육 자료.

나. 국내 전문가 활용

- ASE 및 UHPLC-APCI-MS 장비 관련 국내 전문가(한국해양과학기술원 강수진 선임연구원, 부산대학교 박유현 박사)를 활용하여 장비 사용 및 GDGT 분석 인프라 구축에 관한 자문을 얻음
- 국립수산과학원 이동헌 해양환경연구사로부터 북극해 퇴적물의 GDGT 동위원소 분석법과 이를 활용한 환경해석에 관한 자문을 얻음(그림 10, 11)

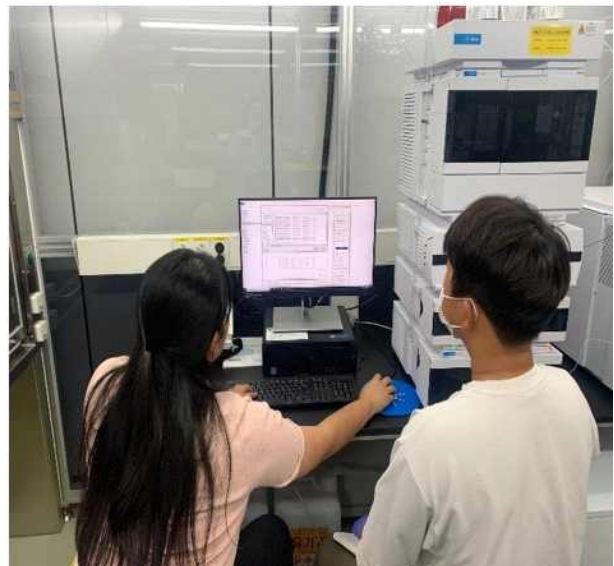
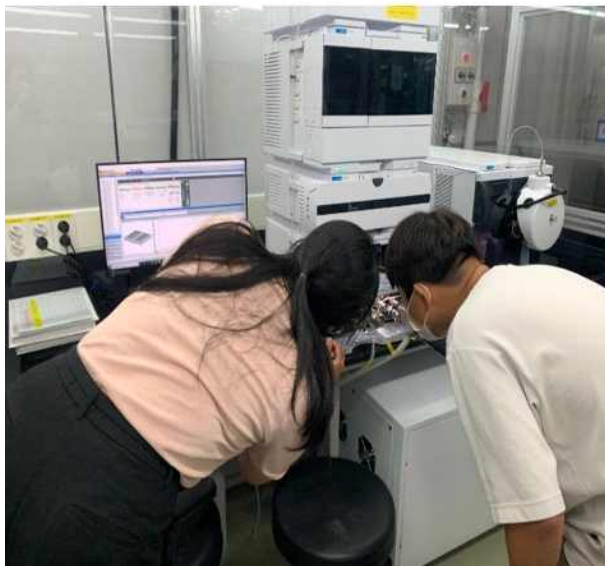
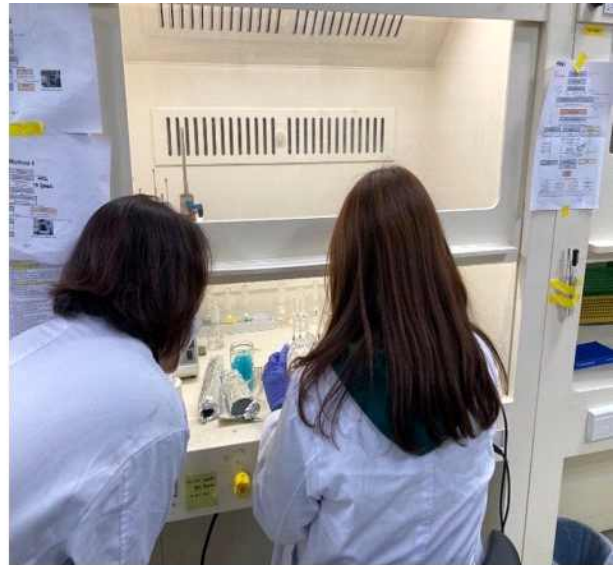
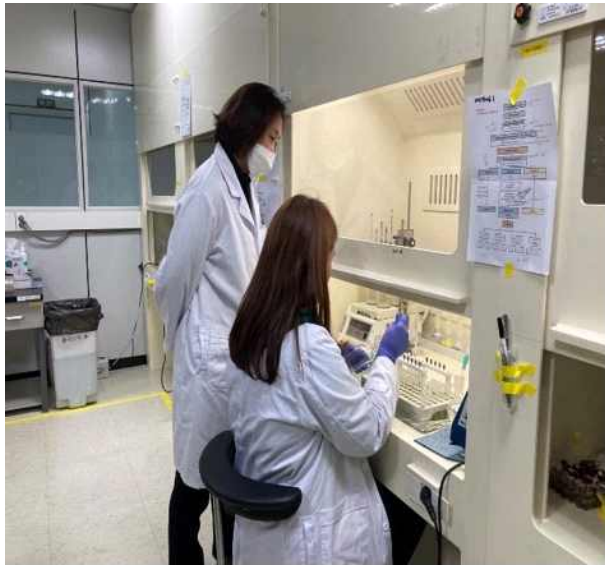
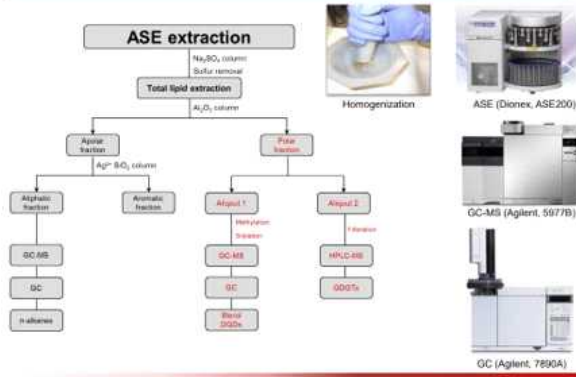


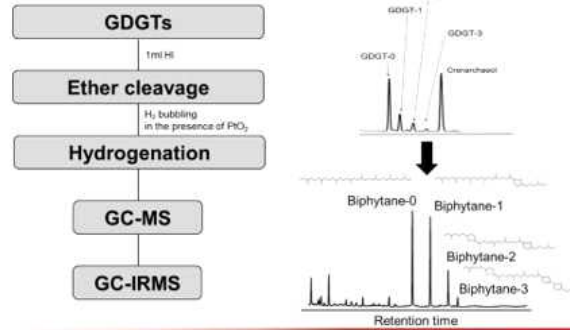
그림 10. 전문가 활용 증빙사진(위: 한국해양과학기술원 강수진 선임연구원, 아래: 부산대학교 박유현 박사).

Lipid fingerprinting combined with carbon isotope analysis



Isotope analysis of archaeal ether-bound hydrocarbon

The usage of hydrogenation methods (HI-H₂/PtO₂)



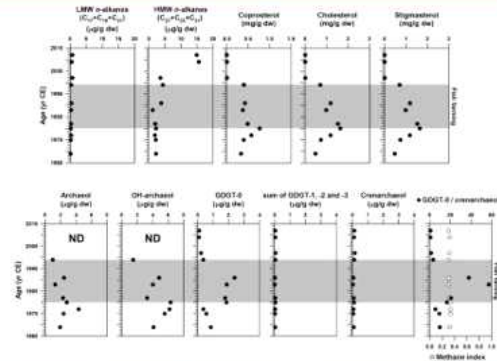
Gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry (GC/C/IRMS)

Instrument information

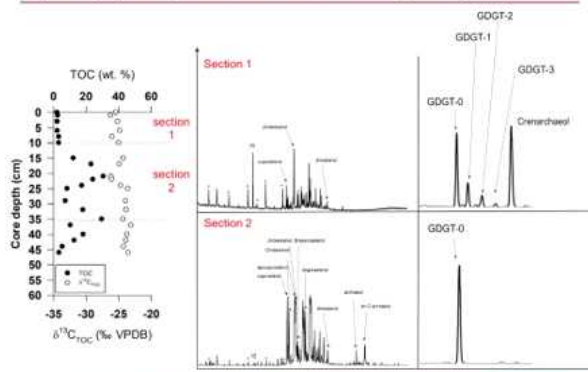
- Gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry (GC/C/IRMS)
- GC; Agilent 7890A (Agilent, USA)
- IRMS; isoprime visION (isoprime, UK)
- Interface and furnace temperature; 350 °C and 850 °C
- Column; CP-sil-5CB (length; 25 m, diameter; 0.32 mm, film; 0.12 μm)



Evidence of methane production during 30 years



Lipid fingerprinting combined with carbon isotope analysis



Biogeochemical methane cycle (methanogenesis)

- Kinetic isotope effect (KIE) in reactions catalysed by enzymes
- ¹³C-depleted products of biochemical reactions

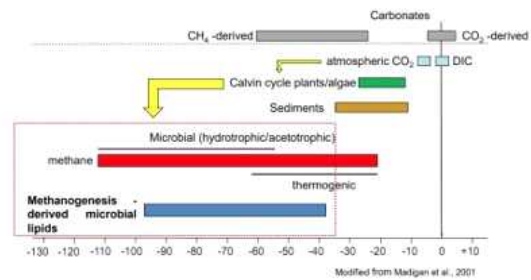


그림 11. 전문가 활용 증빙자료(국립수산과학원 이동현 해양환경연구소).

다. GDGT 분석 프로토콜 정립

- GDGT 분석을 위한 flow chart를 그림 12에 나타냄. 퇴적물을 고온(100°C)· 고압(1000 psi)에서 DCM:MeOH (9:1, v:v) 용매를 사용하여 ASE로 추출한 후 silica로 채운 column chromatography를 통해 각 극성에 맞는 세 개의 fraction으로 나누어줌. GDGT는 세 번째에 해당하는 극성 fraction을 필터링 하여 UHPLC-APCI-MS로 분석함

Lipid extraction flow chart

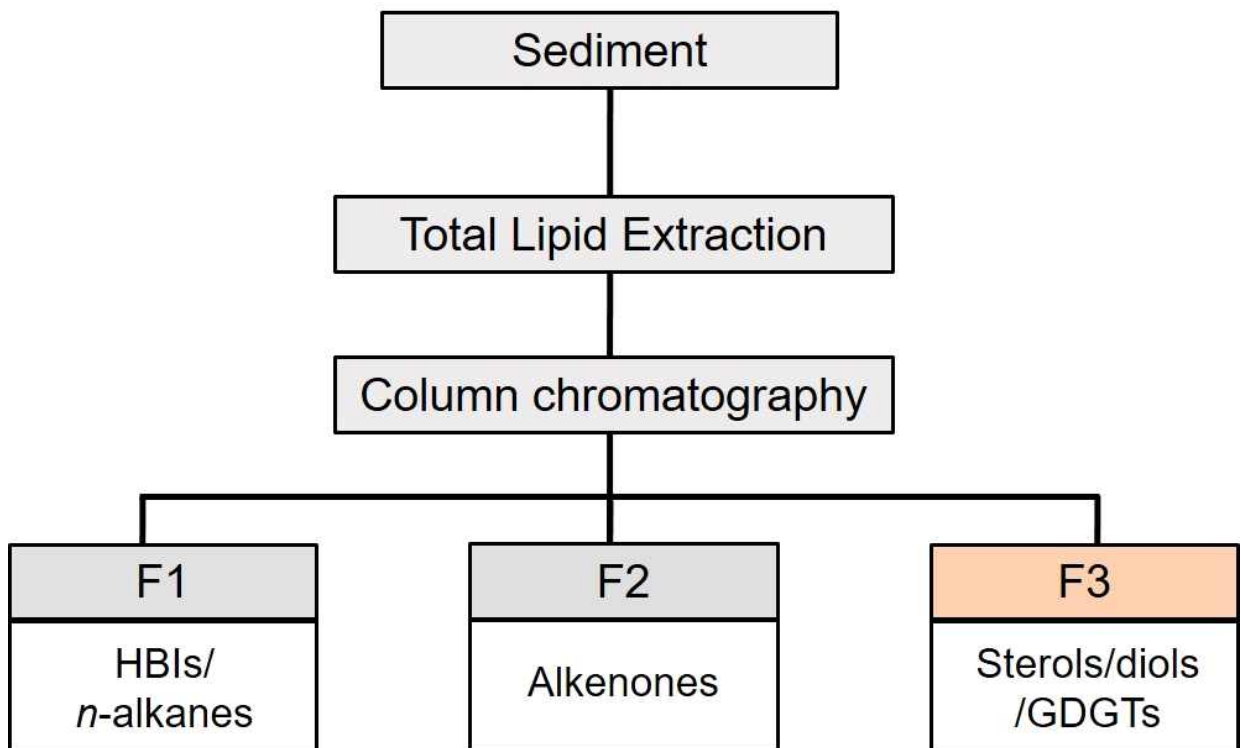


그림 12. GDGT 분석을 위한 전처리 flow chart.

- 유기분자생체지표 중 하나인 GDGT(Glycerol dialkyl glycerol tetraether)는 특정 archaea, 및 bacteria에 의해 합성되는 물질로 isoGDGTs, OH-GDGTs 등을 이용한 프록시를 기반으로 한 수온 복원 연구가 활발하게 진행되고 있음
- HPLC-APCI-MS를 활용하여 코어 퇴적물의 GDGT를 분석한 크로마토그램 예시 및 주요 GDGT compound 분자구조를 그림13~15에 나타냄
- GDGT는 500-1500m/z 사이의 분자량을 갖는 이온들을 total scan mode로 분석 한 후 주요 compound는 SIM (Selected Ion Monitoring) mode로 mass fragment에 따라 각 peak 별로 정량하여 Internal standard와 Creanarchaeol의 상대비로 구한 response factor 로 농도를 계산함
- 본 과제에서 사용한 주요 GDGT compound의 SIM ion을 표 7에 나타냄

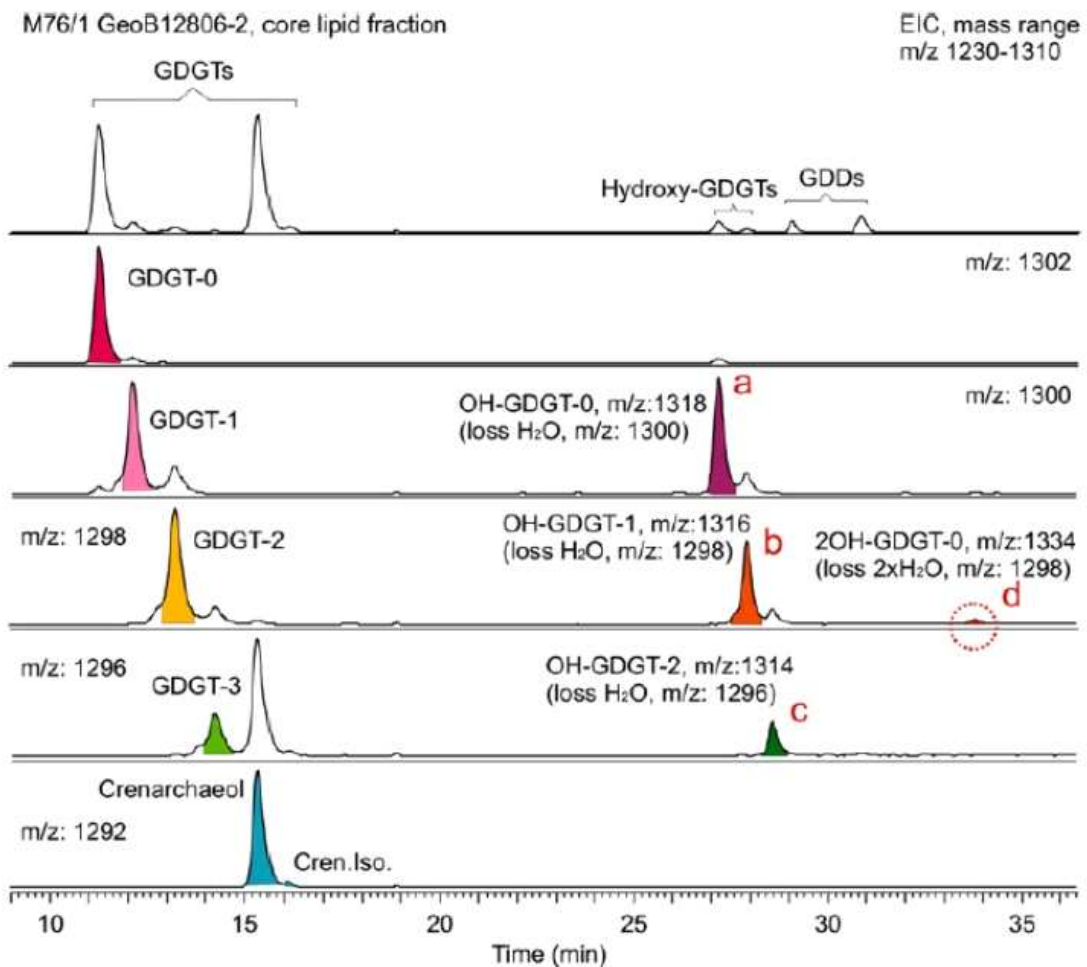


그림 13. HPLC-APCI-MS를 활용하여 분석한 주요 GDGT compound 분석 크로마토그램 예 (Liu et al., 2012).

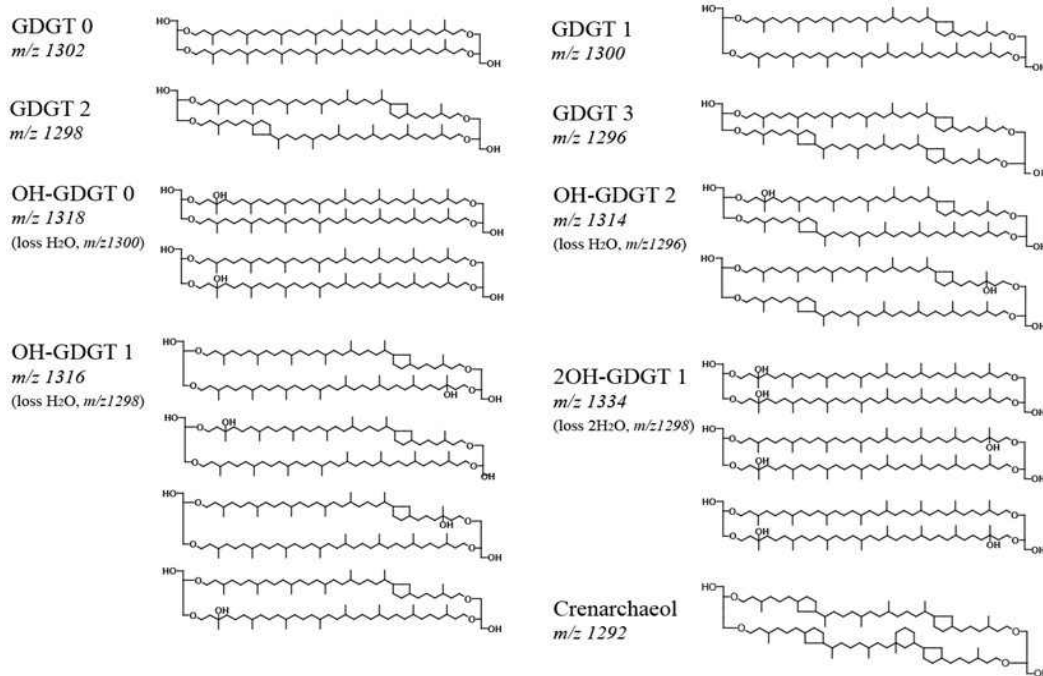


그림 14. 주요 isoGDGT 및 OH-GDGT compound의 분자구조 (Sinninghe Damsté et al., 2018).

표 7. 주요 GDGT compound SIM ion 정보.

주요 GDGT compound SIM ion	
Compound	SIM
GDGT 0 (isoGDGT-0)	1302 m/z
GDGT 1	1300 m/z
GDGT 2	1298 m/z
GDGT 3	1296 m/z
OH-GDGT 0	1318 m/z (loss H ₂ O; 1300 m/z)
OH-GDGT 1	1316 m/z (loss H ₂ O; 1298 m/z)
OH-GDGT 2	1314 m/z (loss H ₂ O; 1296 m/z)
2OH-GDGT 0	1334 m/z (loss 2H ₂ O; 1298 m/z)
Crenarchaeol	1292 m/z
Cren. stereoisomer	1292' m/z
C ₄₆ GDGT standard	744 m/z

○ 고수온 복원 및 유기물 기원 연구에 사용되는 GDGT 농도 및 인덱스는 기존 문헌을 참고하여 다음과 같이 계산함

- $isoGDGTs = [isoGDGT0 + isoGDGT1 + isoGDGT2 + isoGDGT3]$

- $OH-GDGTs = [OH-GDGT0 + OH-GDGT1 + OH-GDGT2 + 2OH-GDGT1]$

- $TEX_{86} = \frac{[GDGT2 + GDGT3 + cren']}{[GDGT1 + GDGT2 + GDGT3 + cren']}$

(Schouten et al., 2002)

- $RI-OH' = \frac{OH-GDGT-1 + 2 \times OH-GDGT-2}{OH-GDGT-0 + OH-GDGT-1 + OH-GDGT-2}$

(Liu et al., 2015)

○ GDGT 농도를 기반으로 계산된 인덱스와 SST(Sea surface temperature)와의 상관관계는 다음과 같음

- $RI-OH' = 0.0422 \times SST - 0.029$ (Lu et al., 2015)

- $RI-OH = 0.018 \times SST + 1.11$ (Fietz et al., 2020)

○ ASE 추출 및 필터링을 포함한 전처리 과정이 완료된 샘플은 최종적으로 2mL GC vial에 농축하여 UHPLC-APCI-MS (Agilent 1290 Infinity LC System G6135B LC/MSD)를 사용하여 분석함

○ 분석시 사용하는 컬럼은 Waters 사의 ACQUITY UPLC® BEH HILIC 1.7 μ m (2.1 x 150mm Column) 으로 두 개의 컬럼을 연결하여 분자량이 높은 GDGT compound의 분석이 가능하도록 구축함(그림 15)



그림 15. UHPLC-APCI-MS 분석시 사용하는 컬럼

- GDGT 분석은 Solvent A (Hex), Solvent B (Hex:IPA 90:10, v:v)를 Retention time에 따라 농도 구배를 주어 각 용매의 배율을 달리하여 분석함(그림 16). 분석이 완료된 GDGT는 Agilent MassHunter 정량 프로그램을 이용하여 각 compound의 peak를 identification 한 후 peak area를 이용하여 정량함(그림 17)

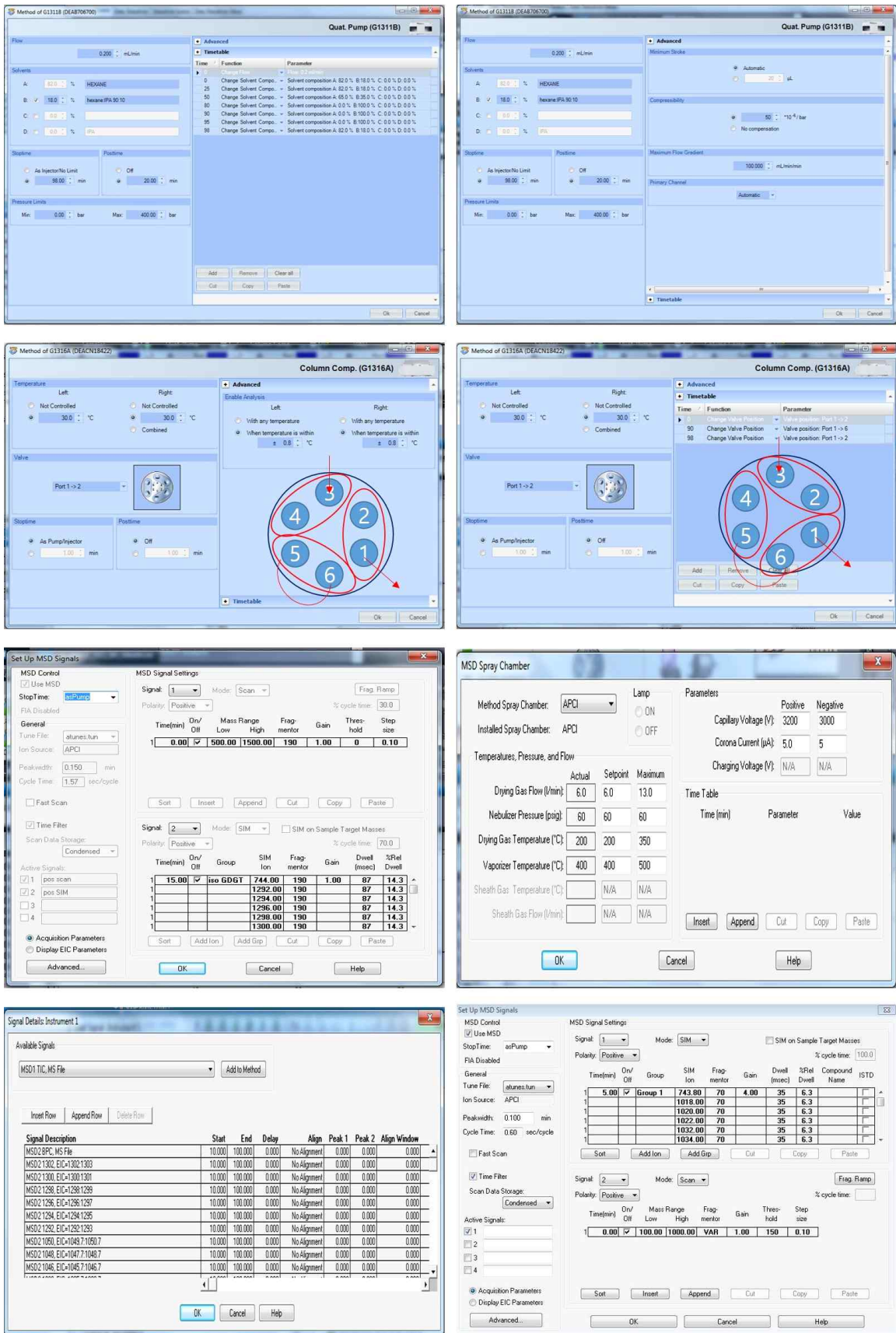


그림 16. 본 연구에서 확립한 UHPLC-APCI-MS 분석 method.

2. 환경시료 분석을 통한 선진국형 분석기법 구축

가. 동해 Lab reference sample 분석

- 본 과제에서 정립한 GDGT 분석 프로토콜에 기반하여 동해 Lab reference sample의 GDGT 분석을 수행함. UHPLC-APCI-MS를 이용하여 분석한 전체 크로마토그램(그림 18) 및 주요 compound의 SIM Ion chromatogram(그림 19)를 아래와 같이 나타냄
- 동해 Lab reference sample 분석 결과 본 과제에서 target으로 하는 compound가 모두 검출됨을 확인함.

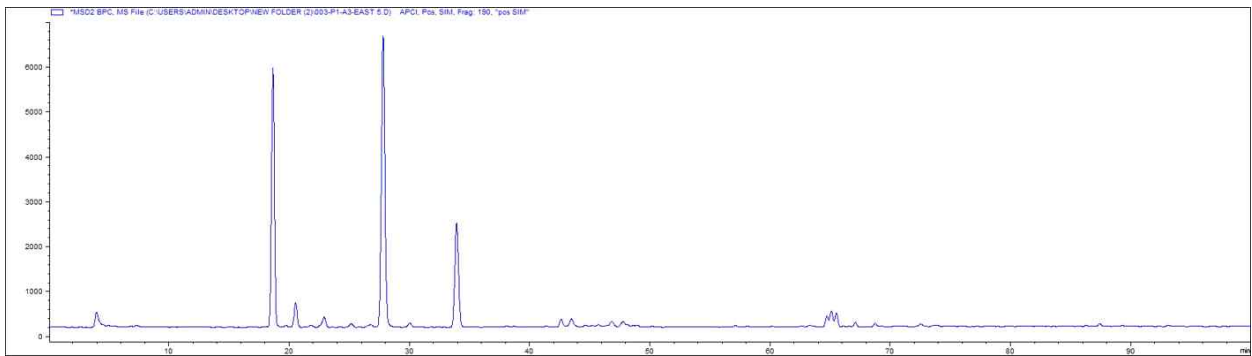


그림 18. UHPLC-APCI-MS를 이용하여 분석한 lab reference sample(동해 퇴적물 시료)의 GDGT 전체 크로마토그램 예.

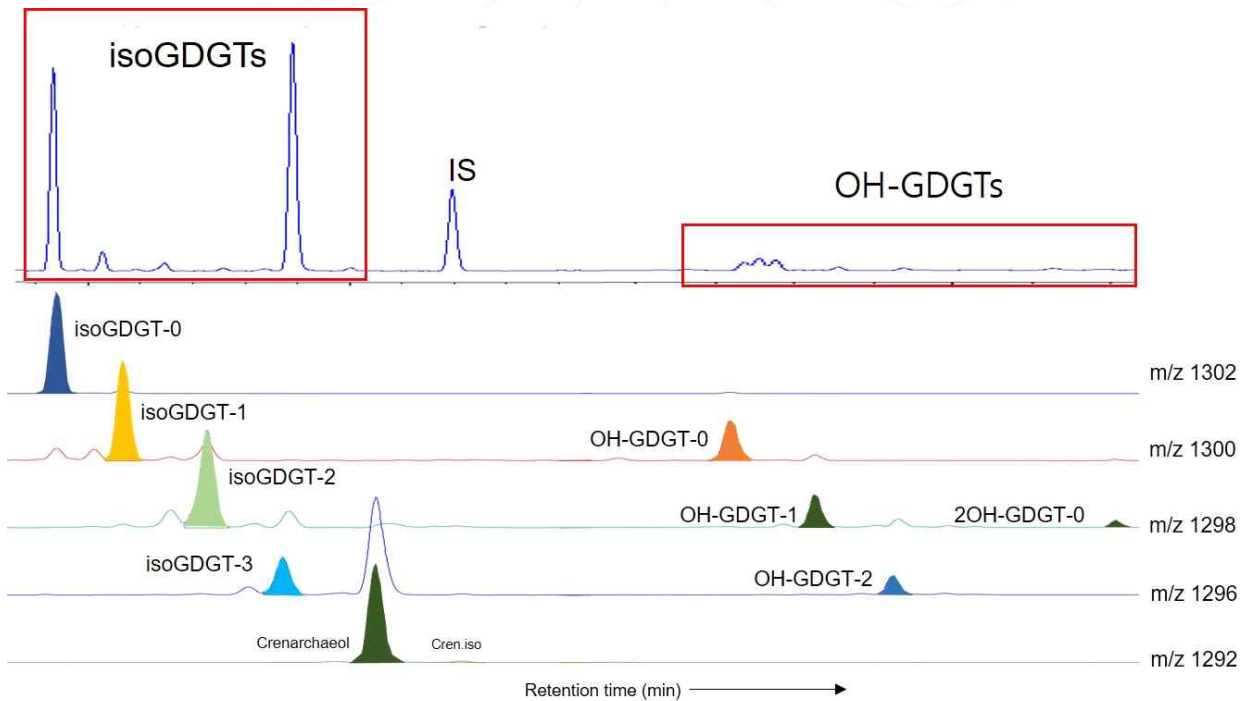


그림 19. UHPLC-APCI-MS를 이용하여 분석한 lab reference sample(동해 퇴적물 시료)의 주요 compound SIM ion chromatogram 예.

나. 황해 표층퇴적물 시료 분석

- 본 과제에서 정립한 GDGT 분석 프로토콜에 기반하여 황해 표층퇴적물의 GDGT 분석을 수행함. UHPLC-APCI-MS를 이용하여 분석한 전체 크로마토그램을 나타냄(그림 20)

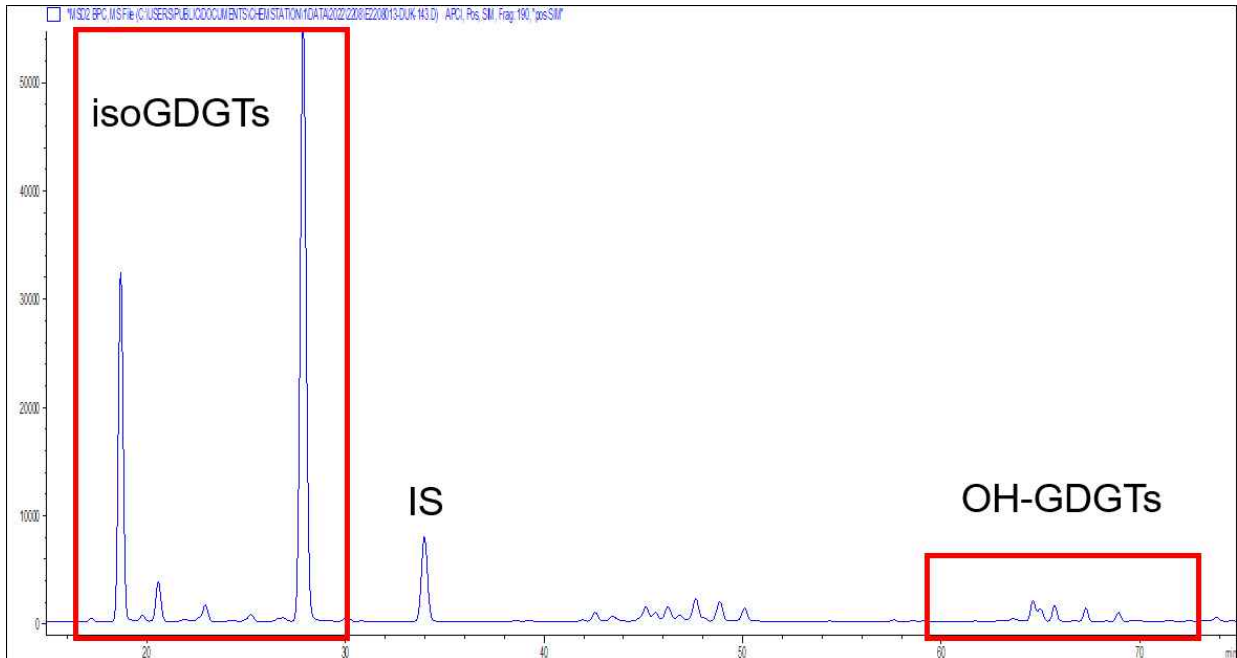


그림 20. 황해 표층퇴적물의 GDGT 분석 크로마토그램 예.

다. 서북극해 표층퇴적물 시료 분석

- GDGT 분석에 사용하는 UHPLC-APCI-MS는 장비 구동을 위해 질소가스를 지속적으로 흘려주어야 하는데 가스 공급방식에 따라 두 가서북극해 표층퇴적물을 대상으로 UHPLC-APCI-MS를 활용하여 GDGT 분석을 수행함. 대부분의 표층퇴적물 시료에서 isoGDGT-0, crenarchaeol, OH-GDGT-0을 제외한 isoGDGTs, OH-GDGTs 는 모두 검출되지 않거나 검출한계 미만으로 정량이 불가함
- 따라서 북극해에 보다 적합한 GDGT 분석 기법 확립이 필요함

제 3절. 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보

1. 북극해에 최적화된 GDGT 분석기법 확립

가. 동해 Lab reference sample 분석(N₂ generator vs. LN₂)

- GDGT 분석에 사용하는 UHPLC-APCI-MS는 장비 구동을 위해 질소가스를 지속적으로 흘러주어야 하는데 가스 공급방식에 따라 두 가지로 나눌 수 있음
- 주변 공기를 흡착하여 압축공기로부터 산소를 분리 한 후, 질소만 공급하는 원리로 작동하는 질소발생기와, 공기 중에 있는 질소를 극저온 상태(-196℃)에서 액체로 만들어 탱크에 저장한 후에 기화기를 통해 질소가스를 공급하는 액화질소 형태가 있음(그림 21)



그림 21. GDGT 분석용 질소가스 사진(위: 액체질소, 아래; 질소발생기).

- 질소발생기는 고순도의 질소가스를 안정적으로 공급이 가능하다는 장점이 있는 반면, 실험실 내부의 공기를 가스 공급원으로 사용하기 때문에 실험실 내 오염된 공기나 휘발된 유기용매에 의한 오염 문제가 있을 뿐만 아니라 분석 감도에 차이가 있을 수 있음
- 이를 확인하기 위해 동일한 시료를 동일 조건에서 질소발생기와 액체질소를 사용하여 각각 분석한 후 그 결과를 비교함
- 동해 퇴적물 시료로 분석한 결과, 질소발생기를 사용했을 때보다 액체질소를 사용하여 분석했을 때 GDGT의 peak intensity가 10배 정도 높게 나타남(그림 22)

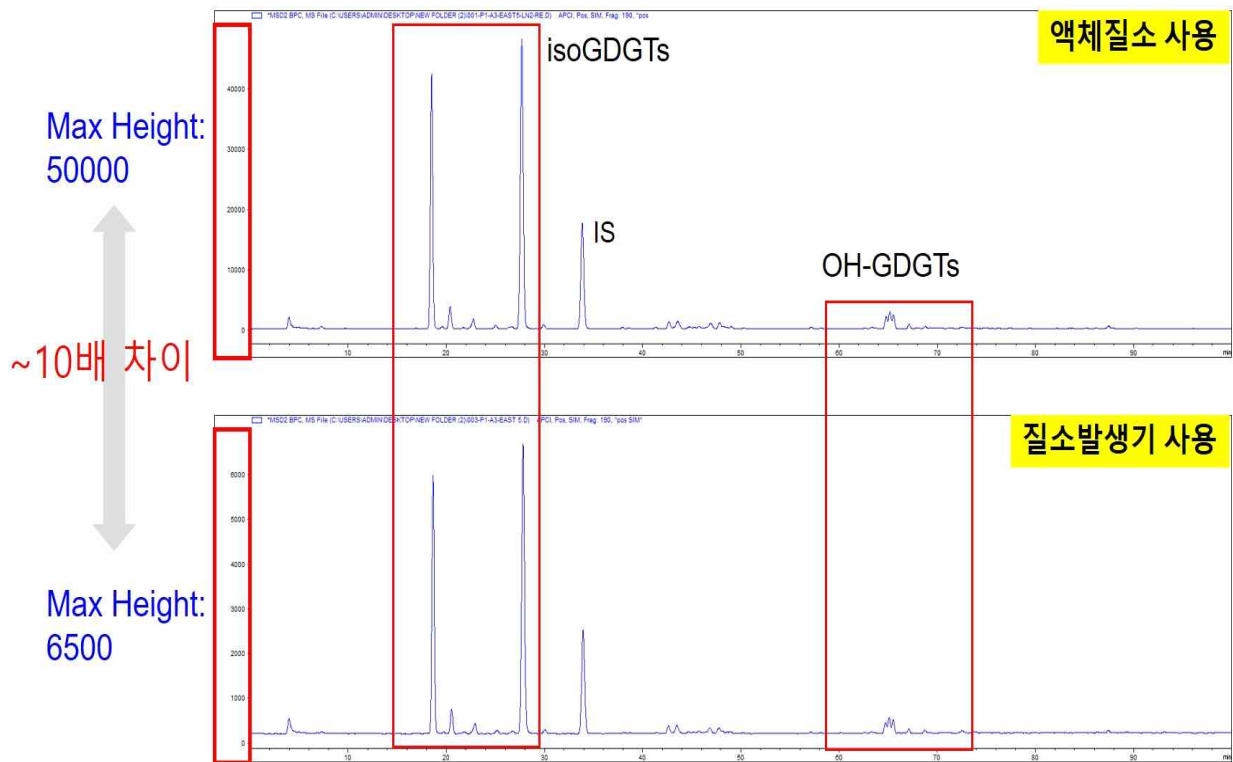


그림 22. 동해 코어 퇴적물의 GDGT 분석 크로마토그램(위: 액체질소 사용, 아래: 질소발생기 사용).

나. 황해 표층 퇴적물 분석(N₂ generator vs. LN₂)

- 황해 표층 퇴적물 9점을 대상으로 각각 질소발생기와 액체질소를 사용했을 때 GDGT 분석 결과를 그림 23 및 표 10에 나타냄
- 액체질소 및 질소발생기를 사용했을 때 황해 표층퇴적물 9점의 농도 및 인덱스 값을 비교하여 isoGDGTs, OH-GDGTs, TEX₈₆, RI-OH', isoGDGT-0/Cren. 으로 나타냄

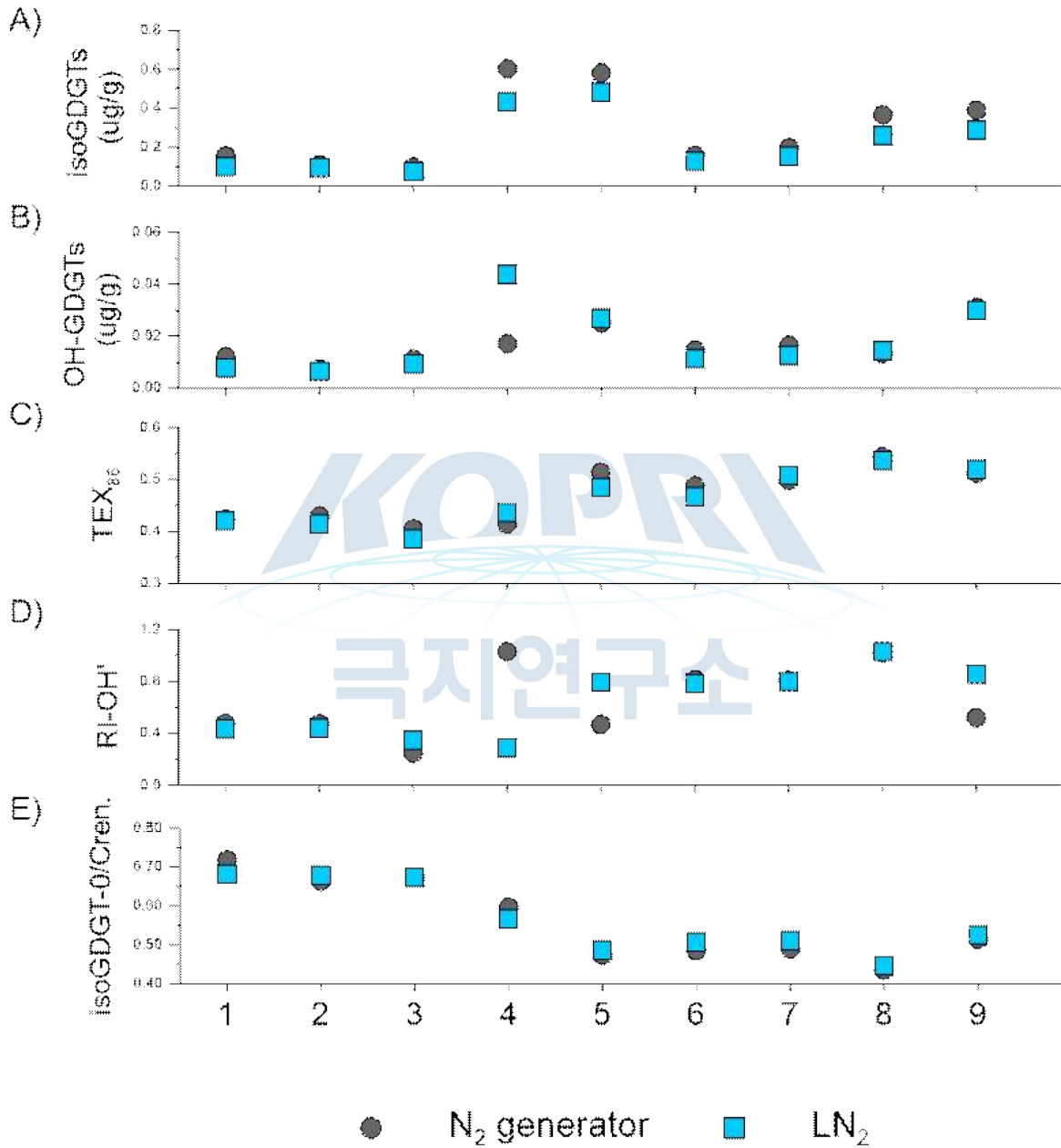


그림 23. 황해 표층 퇴적물의 GDGT 분석 결과 A) isoGDGTs (ug/g), B) OH-GDGTs (ug/g), C) TEX₈₆, D) RI-OH', 및 E) isoGDGT-0/Cren.

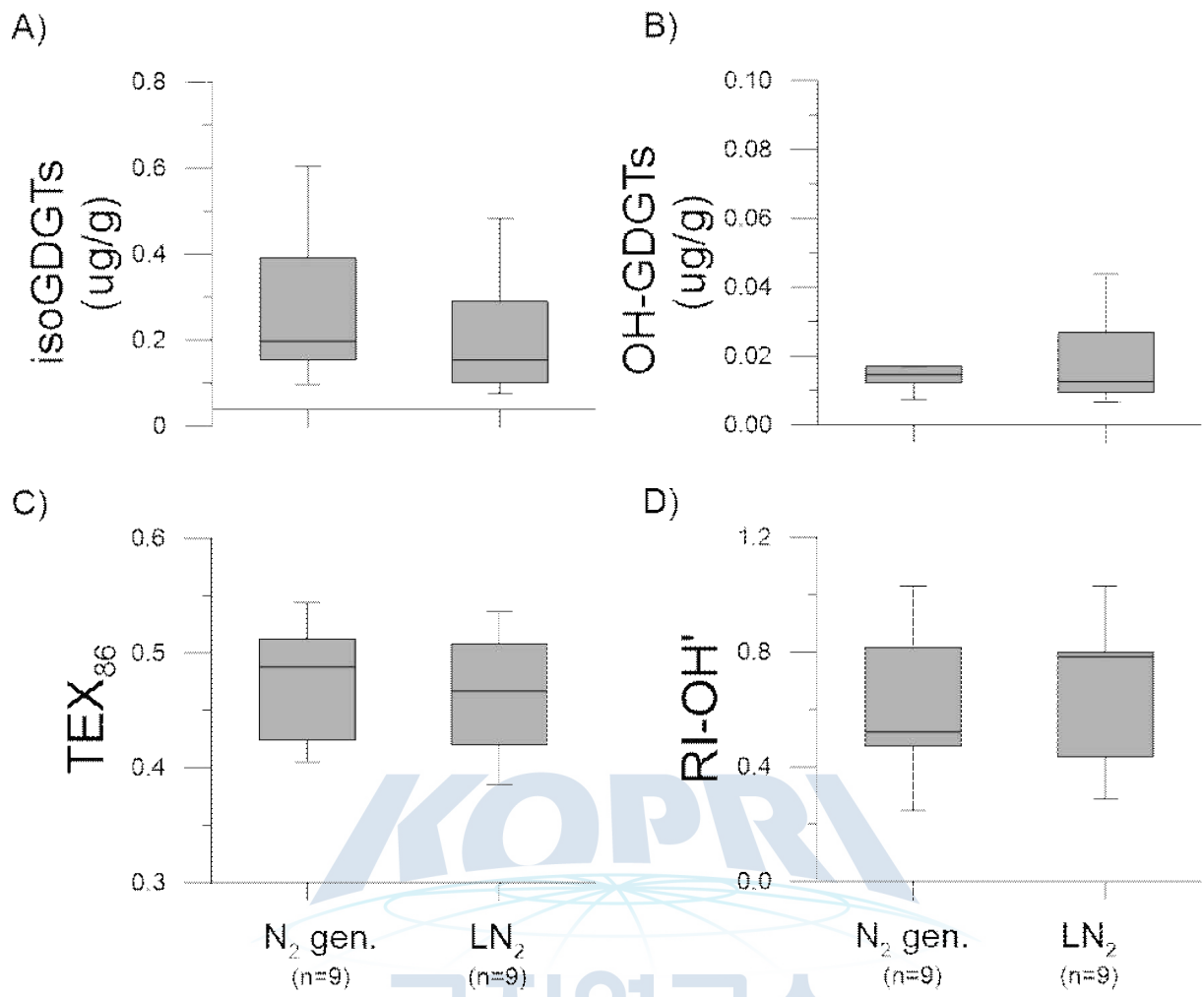


그림 24. 황해 표층 퇴적물의 GDGT 분석 결과 A) isoGDGTs (ug/g), B) OH-GDGTs (ug/g), D) TEX₈₆, 및 E) RI-OH'.

표 10. 황해 표층퇴적물의 GDGT 분석 결과.

N ₂ generator 사용						
No	Sample name	Iso-GDGTs (ug/g)	OH-GDGTs (ug/g)	TEX ₈₆	RI-OH'	isoGDGT-0/Cr en.
1	2001-D05	0.154	0.012	0.424	0.477	0.72
2	YS63-52	0.108	0.007	0.430	0.473	0.66
3	2014_EEZ-S18	0.097	0.011	0.405	0.248	0.67
4	15YS-BC-A	0.603	0.017	0.414	1.030	0.60
5	ECO-09-9	0.581	0.025	0.514	0.468	0.47
6	ECO-09-12	0.158	0.015	0.488	0.814	0.48
7	ECO-09-22	0.197	0.016	0.498	0.808	0.49
8	ECO-11-4	0.366	0.013	0.544	1.022	0.44
9	YS(090)-B-01	0.390	0.031	0.512	0.520	0.51
	평균	0.295	0.016	0.470	0.651	0.56
	표준편차	0.198	0.007	0.052	0.275	0.10
LN ₂ 사용						
	Sample name	Iso-GDGTs (ug/g)	OH-GDGTs (ug/g)	TEX ₈₆	RI-OH'	isoGDGT-0/Cr en.
1	2001-D05	0.100	0.008	0.420	0.434	0.68
2	YS63-52	0.096	0.006	0.414	0.439	0.68
3	2014_EEZ-S18	0.076	0.009	0.385	0.347	0.67
4	15YS-BC-A	0.433	0.044	0.436	0.288	0.57
5	ECO-09-9	0.483	0.027	0.485	0.794	0.49
6	ECO-09-12	0.128	0.011	0.467	0.784	0.51
7	ECO-09-22	0.154	0.013	0.508	0.798	0.51
8	ECO-11-4	0.260	0.014	0.536	1.030	0.45
9	YS(090)-B-01	0.289	0.030	0.519	0.857	0.52
	평균	0.224	0.018	0.463	0.641	0.56
	표준편차	0.152	0.013	0.052	0.265	0.09

다. 서북극해 표층퇴적물 분석

- 본 과제에서 구축한 GDGT 분석 기법을 기반으로 실제 북극해 표층퇴적물에 적용함. 필터링을 포함한 전처리 과정이 완료된 샘플을 UHPLC-APCI-MS (Agilent 1290 Infinity LC System 6135B LC/MSD) 로 분석함(그림 25)

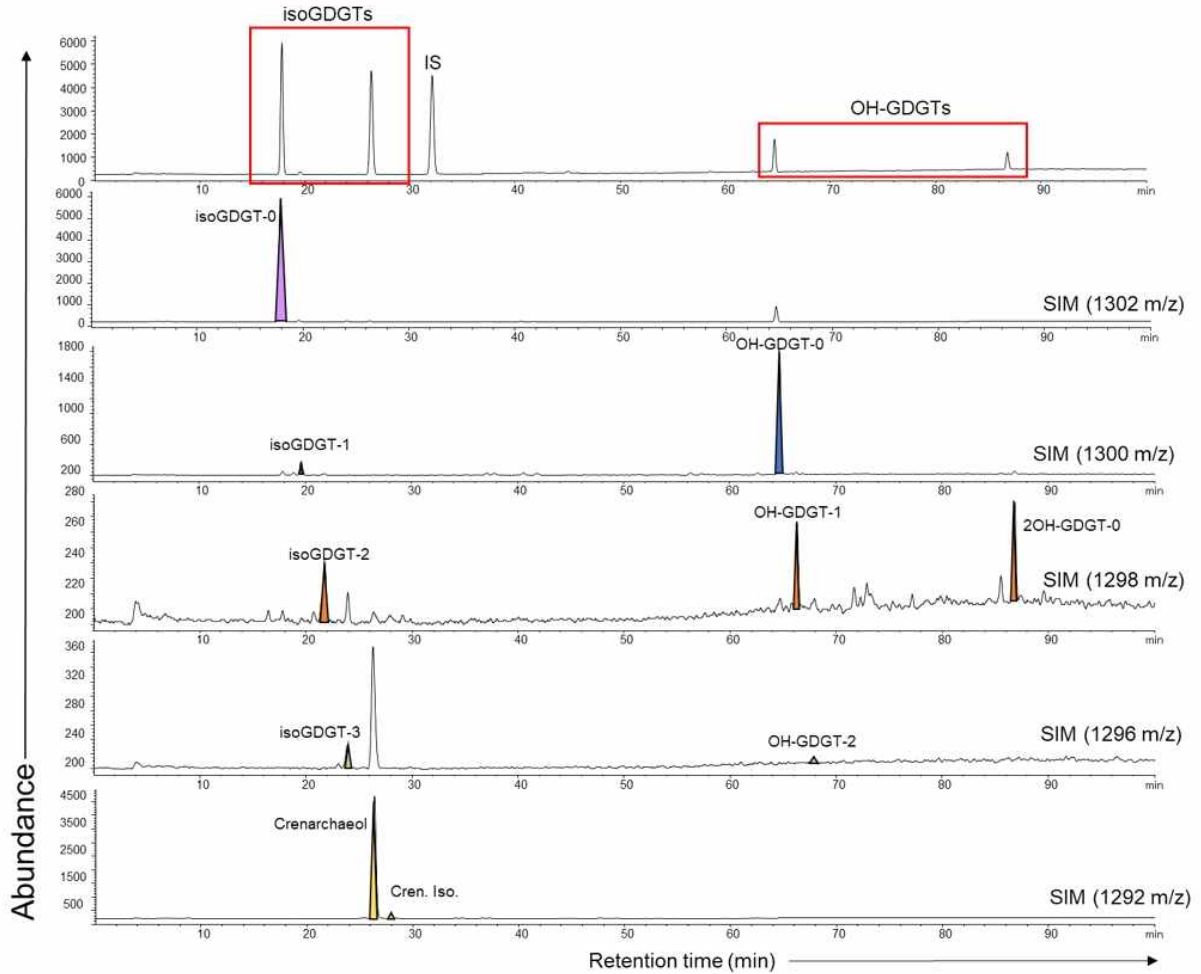


그림 25. 북극 표층퇴적물의 UHPLC-APCI-MS 분석 크로마토그램 예.

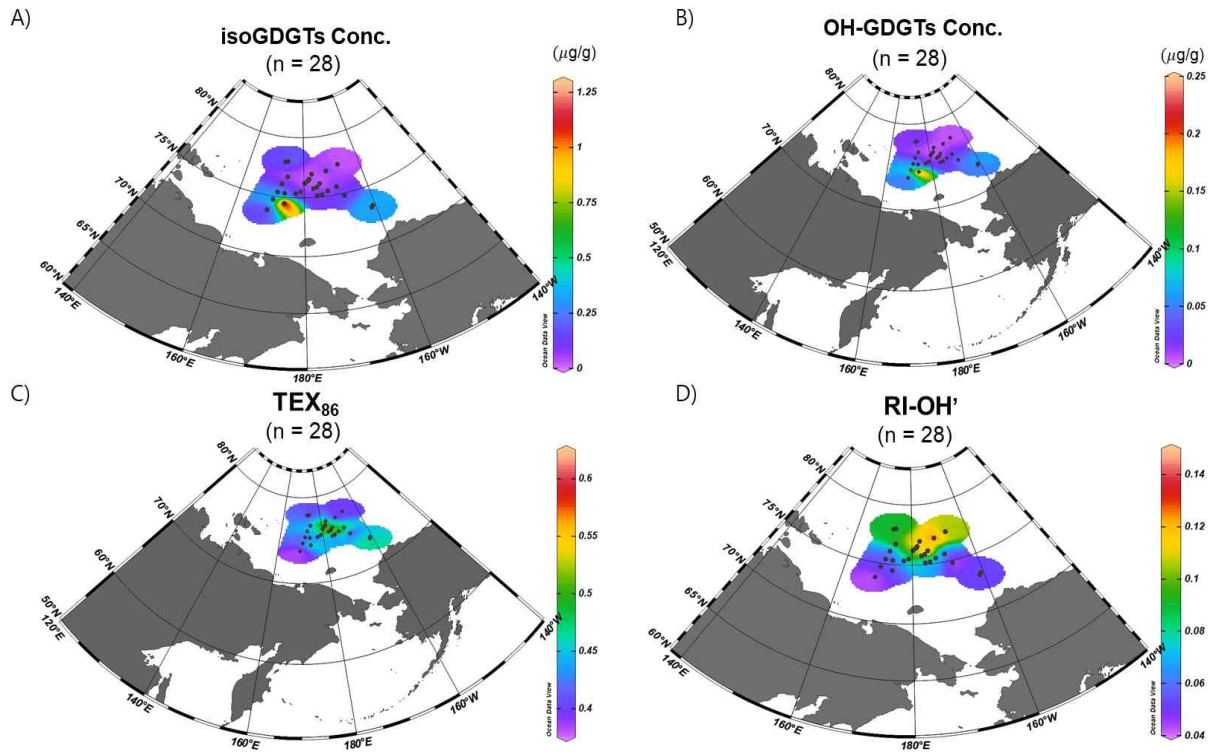


그림 26. 북극해 표층퇴적물의 GDGT 분석 결과, A) isoGDGTs ($\mu\text{g/g}$), B) OH-GDGTs ($\mu\text{g/g}$), C) TEX_{86} , 및 D) RI-OH'.

- 서북극해 표층 퇴적물에서 획득한 GDGT 분석 결과를 나타냄(그림 26 및 표 11).
- 서북극해 표층 퇴적물에서 획득한 isoGDGTs 농도는 대부분 낮게 나타났으며, 서북극해 중앙부터 농도가 낮아지는 경향이 확인됨. isoGDGTs 농도의 최솟값은 $0.02 \mu\text{g/g}$ 이고, 최댓값은 $1.30 \mu\text{g/g}$ 임
- 서북극해 표층 퇴적물에서 획득한 OH-GDGTs 농도는 대부분 낮게 나타났으며, 대륙에서 멀어질수록 농도가 낮아지는 경향이 확인됨. OH-GDGTs 농도의 최솟값은 $0.003 \mu\text{g/g}$ 이고, 최댓값은 $0.232 \mu\text{g/g}$ 임
- 서북극해 표층 퇴적물에서 획득한 GDGT의 peak area를 바탕으로 TEX_{86} 와 RI-OH' 인덱스를 계산함.
- 서북극해 표층 퇴적물에서 획득한 GDGT의 peak area를 바탕으로 계산한 TEX_{86} 인덱스의 최솟값은 0.378, 최댓값은 0.618 이고, RI-OH'의 최솟값은 0.043, 최댓값은 0.142 으로 나타남
- TEX_{86} 와 RI-OH' 인덱스는 서북극해 중앙에서 가장 높은 값을 나타냈으며 중앙에서 바깥쪽으로 갈수록 인덱스의 값이 낮아지는 경향을 보임. 특히 TEX_{86} 은 서북극해 중앙 및 그 외 지역에서 상대적으로 큰 차이를 보이며, RI-OH' 인덱스는 서북극해 중앙보다 대륙에 가까워질수록 낮은 값을 나타냈음

표 11. 서북극해 표층퇴적물의 GDGT 분석 결과.

Sample name	Iso-GDGTs (ug/g)	OH-GDGTs (ug/g)	TEX ₈₆	RI-OH'
ARA02B 11 BOX-01	0.26	0.028	0.38	0.092
ARA03B 19 BOX-01	0.08	0.010	0.44	0.089
ARA03B 24 BOX-01	1.30	0.232	0.47	0.054
ARA03B 26 BOX-01	0.11	0.019	0.40	0.067
ARA03B 27 BOX-01	0.06	0.011	0.48	0.087
ARA03B 28A BOX-01	0.03	0.006	0.42	0.100
ARA03B 28B BOX-01	0.02	0.003	0.49	0.140
ARA03B 29A BOX-01	0.03	0.004	0.45	0.108
ARA03B 30A BOX-01	0.06	0.007	0.39	0.126
ARA03B 31 BOX-01	0.02	0.004	0.40	0.127
ARA07C BC_ST-04_1	0.30	0.070	0.40	0.055
ARA07C BC_ST-05_1	0.30	0.061	0.41	0.051
ARA07C BC_ST-07_1	0.13	0.044	0.38	0.043
ARA07C BC_ST-13_1	0.08	0.029	0.46	0.056
ARA07B BC_ST-14	0.16	0.051	0.40	0.043
ARA07B BC_ST-16	0.10	0.025	0.43	0.064
ARA07B BC_ST-18	0.04	0.009	0.53	0.095
ARA07B BC_ST-23	0.02	0.006	0.62	0.142
ARA03B 35A BOX-01	0.04	0.009	0.57	0.069
ARA04B 01 MUC	0.30	0.072	0.49	0.051
ARA04B 02 MUC	0.34	0.013	0.46	0.051
ARA04B 03 MUC	0.35	0.082	0.43	0.054
ARA04B 07 MUC	0.03	0.006	0.40	0.105
ARA04B 11 MUC	0.03	0.006	0.58	0.086
ARA04B 18 MUC	0.16	0.032	0.38	0.064
ARA07C BC_ST-01_1	0.21	0.048	0.46	0.058
ARA07C BC_ST-02_1	0.04	0.007	0.43	0.095
ARA07C BC_ST-03_1	0.10	0.022	0.45	0.063

2. 북극해 GDGT 분석기법 적용

가. 노르딕해 표층퇴적물 분석

- 본 과제에서 구축한 GDGT 분석 기법을 기반으로 실제 노르딕해 표층퇴적물에 적용함. 필터링을 포함한 전처리 과정이 완료된 샘플을 UHPLC-APCI-MS 로 분석함(그림 27, 28)

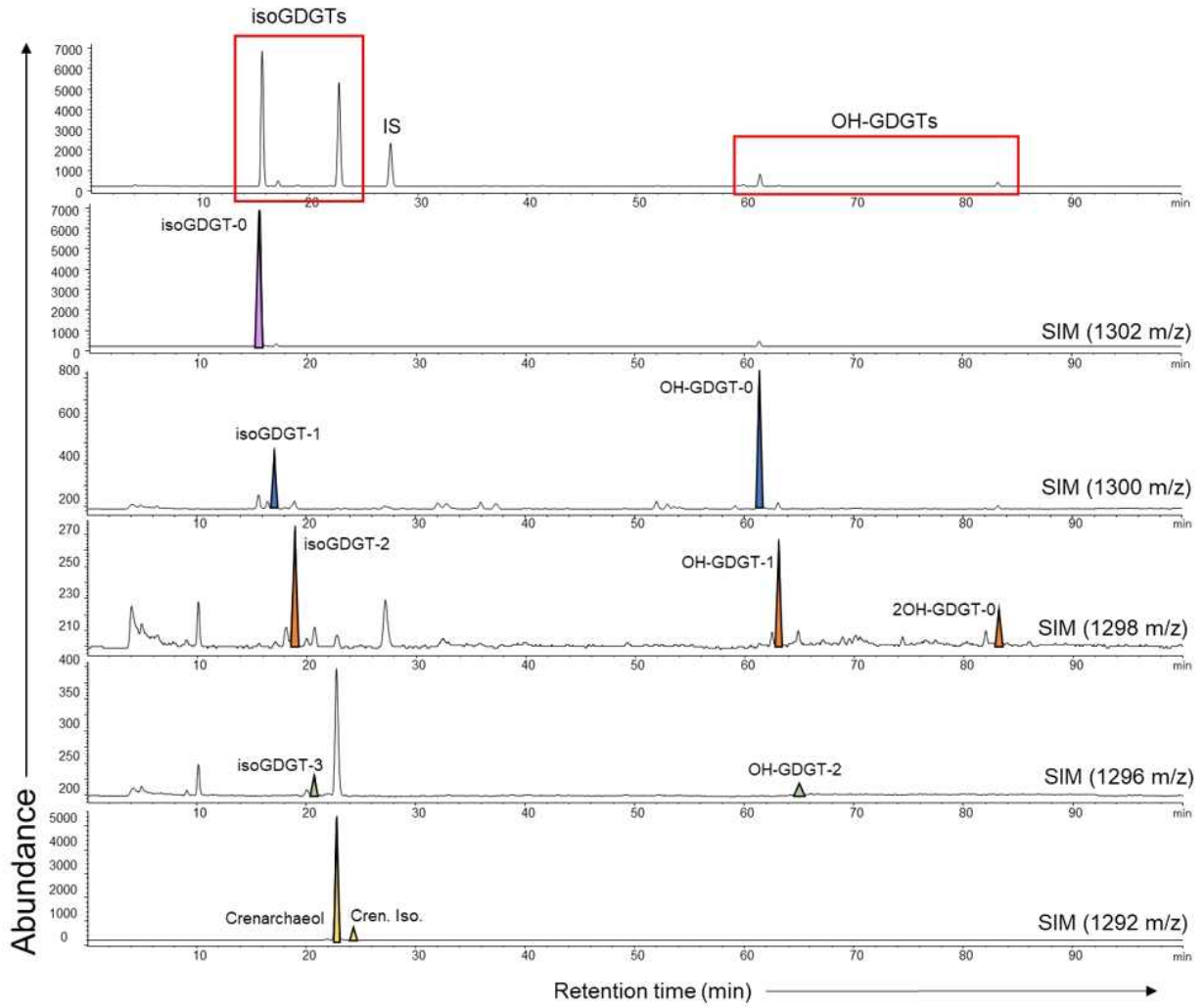


그림 27. 노르딕해 표층퇴적물의 UHPLC-APCI-MS 분석 크로마토그램 예.

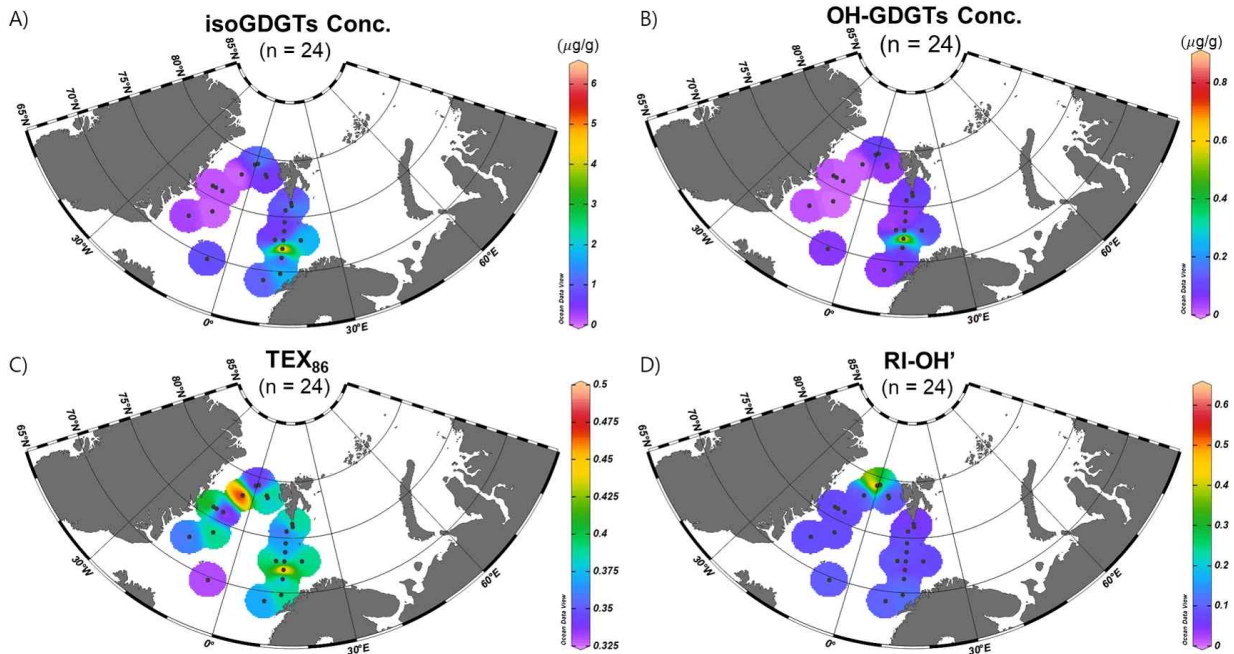


그림 28. 노르딕해 표층 퇴적물의 GDGT 분석 결과, A) isoGDGTs ($\mu\text{g/g}$), B) OH-GDGTs ($\mu\text{g/g}$), C) TEX_{86} , 및 D) RI-OH'.

- 노르딕해 표층 퇴적물에서 획득한 GDGT 분석 결과를 나타냄(그림 28 및 표 12).
- 노르딕해 표층 퇴적물에서 획득한 isoGDGTs 와 OH-GDGTs 농도는 일부 정점에서 높은 값을 보였지만 대부분 비슷한 값을 보임.
- MOCOS14 에서 isoGDGTs 농도의 최솟값은 $0.36 \mu\text{g/g}$ 이고, 최댓값은 $6.10 \mu\text{g/g}$ 이며, MOCOS17 에서는 최솟값이 $0.06 \mu\text{g/g}$, 최댓값이 $1.69 \mu\text{g/g}$ 으로 나타남
- MOCOS14 에서 OH-GDGTs 농도의 최솟값은 $0.009 \mu\text{g/g}$ 이고, 최댓값은 $0.801 \mu\text{g/g}$ 이며, MOCOS17 에서는 최솟값이 $0.005 \mu\text{g/g}$, 최댓값이 $0.111 \mu\text{g/g}$ 으로 나타남
- 노르딕해 표층 퇴적물에서 획득한 GDGT의 peak area를 바탕으로 TEX_{86} 와 RI-OH' 인덱스를 계산함.
- MOCOS14에서 TEX_{86} 인덱스의 최솟값이 0.348, 최댓값이 0.481 이며, MOCOS17에서는 최솟값이 0.328, 최댓값이 0.469으로 나타남
- MOCOS14에서 RI-OH' 인덱스의 최솟값이 0.048, 최댓값이 0.118 이며, MOCOS17에서는 최솟값이 0.078, 최댓값이 0.605 으로 나타남
- TEX_{86} 인덱스는 스발바르 서쪽 해역 일부 정점에서 낮은 값을 보였지만 전반적으로 비슷한 값을 보였으며, RI-OH' 인덱스는 스발바르 서쪽 해역에서 높은 값을 보이고 전반적으로 0.1에 가까운 값을 나타냄

표 12. 노르딕해 표층퇴적물의 GDGT 분석 결과.

Sample name	Iso-GDGTs (ug/g)	OH-GDGTs (ug/g)	TEX ₈₆	RI-OH'
MCS14-1	0.36	0.009	0.39	0.098
MCS14-2	1.82	0.118	0.39	0.080
MCS14-3	1.78	0.081	0.39	0.118
MCS14-4	0.69	0.034	0.37	0.112
MCS14-5	6.10	0.801	0.48	0.056
MCS14-6	0.65	0.032	0.37	0.093
MCS14-7	0.56	0.047	0.37	0.084
MCS14-8	0.69	0.048	0.37	0.092
MCS14-9	0.83	0.066	0.35	0.072
MCS14-10	0.43	0.060	0.39	0.048
MCS14-11	1.98	0.151	0.39	0.062
MCS14-12	1.01	0.051	0.37	0.101
MCS17-1	0.88	0.059	0.33	0.099
MCS17-3	0.25	0.019	0.36	0.087
MCS17-4	0.07	0.005	0.39	0.086
MCS17-6	0.18	0.014	0.33	0.080
MCS17-7	0.15	0.022	0.44	0.078
MCS17-8	0.12	0.008	0.34	0.082
MCS17-9	0.06	0.008	0.47	0.086
MCS17-10	0.51	0.077	0.33	0.605
MCS17-11	1.69	0.111	0.35	0.106
MCS17-12	0.65	0.064	0.41	0.088
MCS17-13	0.49	0.029	0.37	0.087

나. 서북극해 코어퇴적물 분석

- 본 과제에서 구축한 GDGT 분석 기법을 기반으로 실제 서북극해 코어 퇴적물에 적용함. 필터링을 포함한 전처리 과정이 완료된 샘플을 UHPLC-APCI-MS 로 분석함(그림 30)

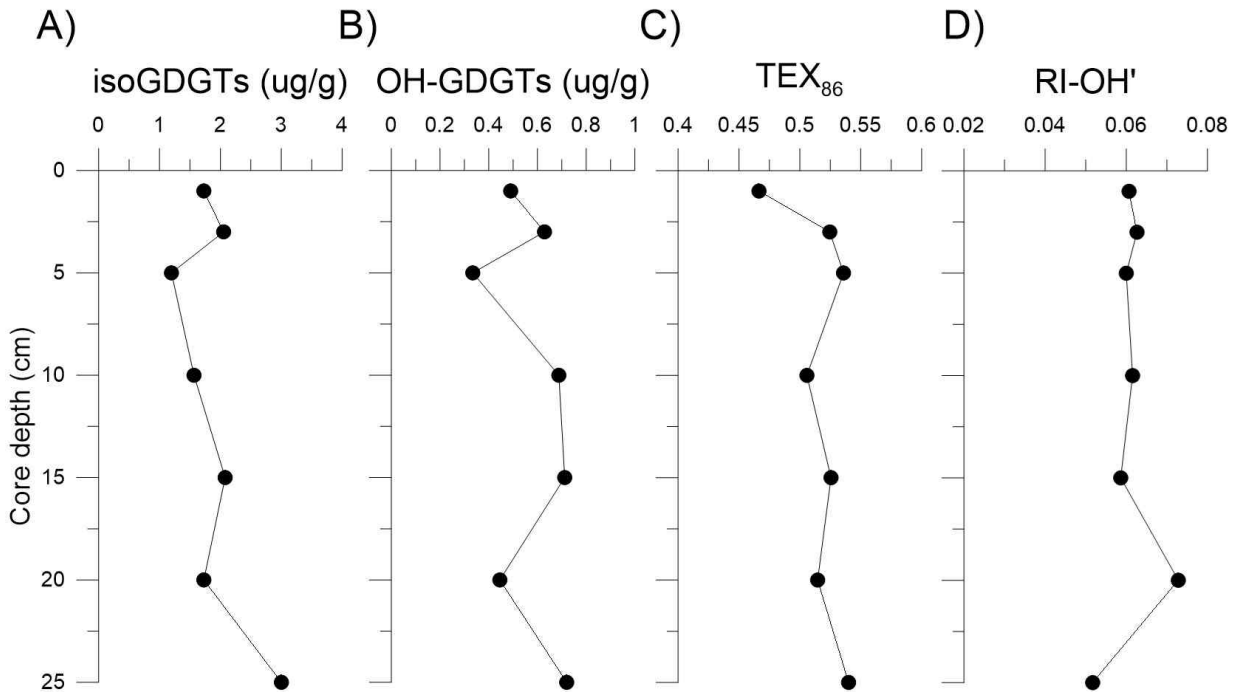


그림 29. 서북극해 코어퇴적물의 GDGT 분석 결과 A) isoGDGTs ($\mu\text{g/g}$), B) OH-GDGTs ($\mu\text{g/g}$), C) TEX_{86} , 및 D) RI-OH'.

- 서북극해 코어 퇴적물 총 7점의 isoGDGT 농도는 $1.20\sim 3.00 \mu\text{g/g}$ (평균 $1.91 \pm 0.57 \mu\text{g/g}$), OH-GDGT 농도는 $0.33\sim 0.72 \mu\text{g/g}$ (평균 $0.57 \pm 0.15 \mu\text{g/g}$) 의 범위를 보임. TEX_{86} 인덱스 값은 $0.47\sim 0.54$ (평균 0.52 ± 0.02) 로 나타났으며, RI-OH' 인덱스값은 $0.05\sim 0.07$ (평균 0.06 ± 0.01) 로 나타남
- RI-OH' 인덱스값을 제외한 isoGDGT, OH-GDGTs 농도 및 TEX_{86} 인덱스값은 모두 하부 25cm 시료에서 가장 높은값을 보였으며 상부로 갈수록 증가, 감소 패턴이 반복적으로 나타남

3. 국외 연구기관과의 GDGT 분석 데이터 비교

가. 소양호 환경시료 분석 결과 비교

- 본 과제에서 정립한 GDGT 분석 프로토콜을 이용한 GDGT 분석이 가능함을 확인하였으며 이를 바탕으로 소양호 환경 시료를 분석함
- GDGT 기반 수온프록시를 활용한 연구의 선두그룹인 네덜란드 왕립해양연구소(NIOZ)에서 분석한 데이터와 상호 비교 및 본 연구에서 구축한 GDGT 분석 결과의 validation을 확인하기 위해 GDGT 농도 및 인덱스 값을 비교함
- 두 기관(KOPRI, NIOZ)의 GDGT 시료 전처리 및 분석 기법 차이를 비교하여 표 8에 나타냄

표 8. 두 기관(KOPRI, NIOZ)의 GDGT 분석방법 비교.

	KOPRI	NIOZ
Extraction	ASE	ASE
Extraction solvent	DCM/MeOH (9:1, v:v)	DCM/MeOH (9:1, v:v)
Column chromatography	Silica	Al ₂ O ₃
Fractions	F1, F2, F3	F1, F2, F3
GDGT fraction	F3 (DCM/MeOH, 1:1, v/v)	F3 (DCM/MeOH, 1:1, v/v)
Filtering	0.4 μ m PTFE filter	0.4 μ m PTFE filter
Filtering solvent	Hex/IPA (99:1, v:v)	Hex/IPA (99:1, v:v)
Equipment	Agilent 1290 LC 6135B MS	Agilent 1100 HPLC/MS
Detector	APCI	APCI
Column	ACQUITY UPLC® BEH HILIC 1.7 μ m Column (2.1 x 150mm; Waters)	Prevail Cyano 3 μ m column (2.1 x 150mm; Alltech, Deerfield)

- 동일한 시료를 반복 분석하여 시료의 loss가 생긴 것으로 추정되는 SY6-0, SY7-0, SY8-0 시료는 OH-GDGT의 peak area 및 농도가 detection limit 이하로 검출됨. 이 시료를 제외하고 소양호 토양시료 6점의 OH-GDGT 농도, 및 TEX₈₆ 인덱스 값 모두 NIOZ에서 분석한 값 보다 극지연구소에서 분석한 값이 높게 나타남. 이는 두 기관 사이의 분석조건 및 분석 감도 등에 차이가 있음을 의미하며 상호 데이터 비교, data compilation 등을 통한 데이터 해석 시 이러한 사항들을 고려해야 할 것으로 사료됨

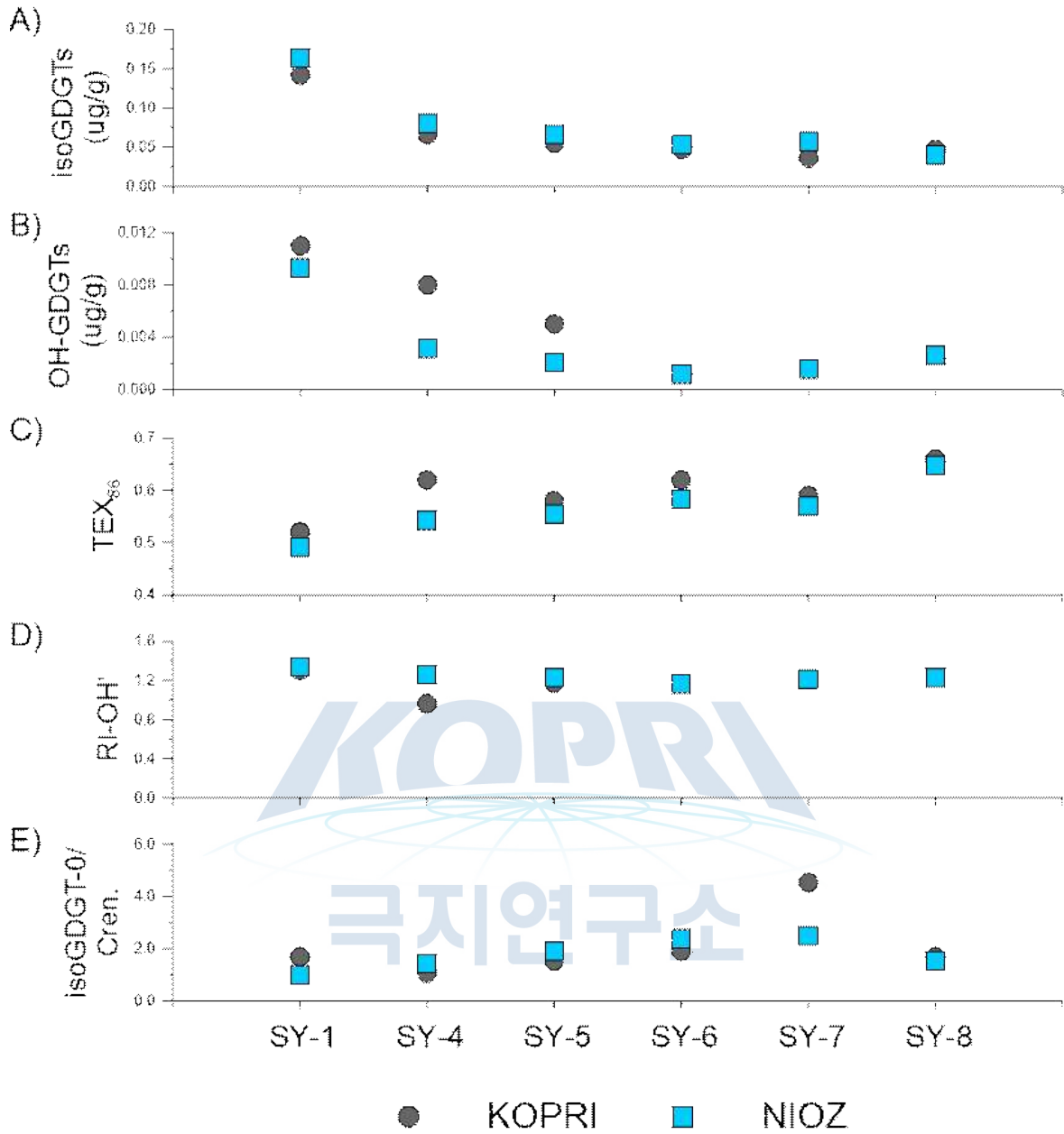


그림 30. 환경시료(소양호 토양시료)를 활용하여 KOPRI, NIOZ에서 분석한 GDGT 결과, A) isoGDGTs (ug/g), B) OH-GDGTs (ug/g), C) TEX₈₆, D) RI-OH', 및 E) isoGDGT-0/Cren.

표 9. 두 기관(KOPRI, NIOZ)의 환경시료(소양호 토양시료)의 GDGT 분석 결과(DL: under the detection limit).

KOPRI					
Sample name	Iso-GDGTs (ug/g)	OH-GDGTs (ug/g)	TEX ₈₆	RI-OH'	isoGDGT-0/Cren.
SY-1	0.142	0.011	0.52	1.305	1.68
SY-4	0.066	0.008	0.62	0.965	1.07
SY-5	0.055	0.005	0.58	1.173	1.53
SY-6	0.047	DL	0.62	DL	1.89
SY-7	0.036	DL	0.59	DL	4.54
SY-8	0.047	DL	0.66	DL	1.68
평균	0.065	0.008	0.60	1.148	2.07
표준편차	0.039	0.003	0.05	0.171	1.24
NIOZ					
Sample name	Iso-GDGTs (ug/g)	OH-GDGTs (ug/g)	TEX ₈₆	RI-OH'	isoGDGT-0/Cren.
SY-1	0.164	0.009	0.49	1.341	0.99
SY-4	0.080	0.003	0.54	1.261	1.43
SY-5	0.066	0.002	0.55	1.228	1.90
SY-6	0.053	0.001	0.58	1.167	2.38
SY-7	0.057	0.002	0.57	1.214	2.49
SY-8	0.040	0.003	0.65	1.228	1.53
평균	0.077	0.003	0.56	1.240	1.79
표준편차	0.045	0.003	0.05	0.058	0.58

나. 서북극해 퇴적코어 분석 결과 비교

- GDGT 기반 수온프록시를 활용하여 활발한 연구를 진행 중인 일본 홋카이도 대학교에서 분석한 데이터와 상호 비교 및 본 연구에서 구축한 GDGT 분석 결과의 validation을 확인하기 위해 환경시료(북극해 코어퇴적물; ARA02B-01(A)MUC) 7점을 사용하여 GDGT 인덱스 값을 비교함
- GDGT 분석에 앞서 두 기관(KOPRI, 홋카이도대학교)의 GDGT 시료 전처리 및 분석 기법 차이를 비교하여 표 13에 나타냄

표 13. 두 기관(KOPRI, 홋카이도 대학교)의 GDGT 분석방법 비교.

	KOPRI	Hokkaido University
Extraction	ASE	ASE
Extraction solvent	DCM/MeOH (9:1, v:v)	DCM/MeOH (6:4, v:v)
Column chromatography	Silica	Silica
Fractions	F1, F2, F3	F1, F2, F3, F4
GDGT fraction	F3 (DCM/MeOH, 1:1, v/v)	F4 (Toluene/MeOH, 3:1, v/v)
Filtering	0.4 μ m PTFE filter	Sodium sulfate column
Filtering solvent	Hex/IPA (99:1, v:v)	Hex/IPA (99:1, v:v)
Equipment	Agilent 1290 LC 6135B MS	Shimadzu HPLC
Detector	APCI	Bruker Daltonics microTOF-HS ms
Column	ACQUITY UPLC® BEH HILIC 1.7 μ m Column (2.1 x 150mm; Waters)	Prevail Cyano 3 μ m column (2.1 x 150mm; Alltech, Deerfield)

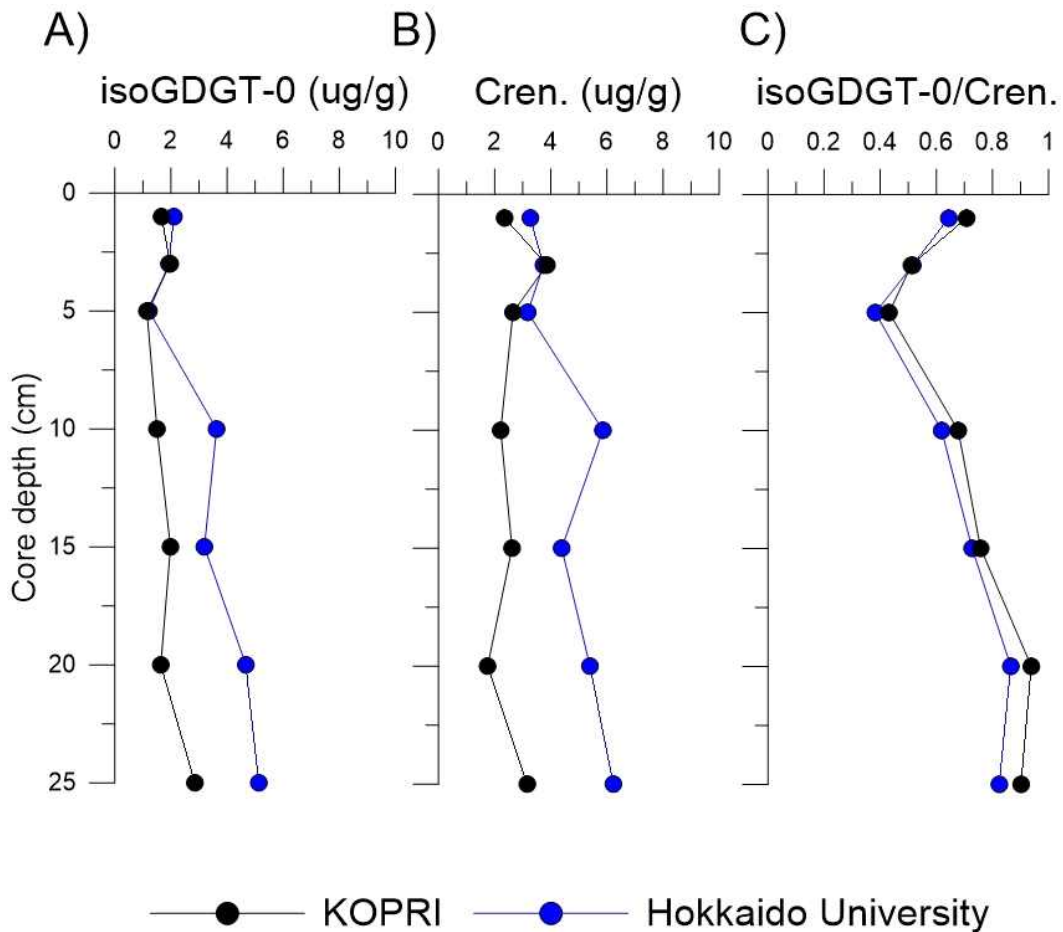


그림 31. 환경시료(북극해 코어퇴적물)를 활용하여 KOPRI, 홋카이도 대학교에서 분석한 GDGT 결과 비교, A) isoGDGT-0 (ug/g), B) crenarchaeol (ug/g), 및 C) isoGDGT-0/Cren.

○ ARA02B-01(A)MUC 코어 GDGT 분석 결과 비교

동일한 시료를 이용하여 KOPRI 방법으로 추출, 전처리 및 분석한 데이터와 홋카이도 대학교에서 표 13에 나온 방법을 사용하여 분석한 데이터를 비교하여 함께 나타냄(그림 31 및 표 14). isoGDGT-0, Crenarchaeol의 농도 및 두 compound의 비 결과를 살펴보면, 코어 퇴적물 상부 3개 시료는 상대적으로 비슷한 값을 보이는 반면, 하부 시료에서 차이가 크게 나타남. GDGT 분석을 위한 코어퇴적물 추출 시, KOPRI 방법으로는 대략 1g의 시료를 추출하였고, 일본 홋카이도 대학교에서는 평균 2.4g의 시료를 사용하였으며, Internal standard로 사용하는 C₄₆ GDGT의 injection 양의 차이, 그리고 분석기기 조건의 차이 등도 결과에 영향을 주었을 것으로 보임. 이는 GDGT compound 중에 가장 큰 peak area 값을 갖는 isoGDGT-0과 crenarchaeol 각 peak area의 비 (그림 31C)의 값과 경향이 매우 비슷하게 나온것으로도 확인이 가능함. 따라서 추후 상호 데이터 비교, data compilation 등을 통한 데이터 해석 시 이러한 사항들을 고려해야 할 것으로 보여지며, 더욱 정확한 비교를 위해서 KOPRI에서 GDGT 실험 시에 퇴적물 시료 추출량에 대한 사전 조사가 선행되어야 할 것으로 사료되어짐

표 14. 두 기관(KOPRI, 홋카이도 대학교)의 북극해 코어퇴적물 GDGT 분석 결과.

KOPRI			
Sample name	isoGDGT-0 (ug/g)	Cren. (ug/g)	isoGDGT-0/Cren.
ARA02B-01(A)MUC-1 cm	1.67	2.35	0.71
ARA02B-01(A)MUC-3 cm	1.97	3.86	0.51
ARA02B-01(A)MUC-5 cm	1.14	2.65	0.43
ARA02B-01(A)MUC-10 cm	1.50	2.21	0.68
ARA02B-01(A)MUC-15 cm	1.98	2.62	0.76
ARA02B-01(A)MUC-20 cm	1.64	1.75	0.94
ARA02B-01(A)MUC-25 cm	2.85	3.16	0.90
평균	1.82	2.66	0.70
표준편차	0.54	0.69	0.19
Hokkaido University			
Sample name	isoGDGT-0 (ug/g)	Cren. (ug/g)	isoGDGT-0/Cren.
ARA02B-01(A)MUC-1 cm	2.11	3.27	0.64
ARA02B-01(A)MUC-3 cm	1.93	3.74	0.52
ARA02B-01(A)MUC-5 cm	1.21	3.17	0.38
ARA02B-01(A)MUC-10 cm	3.62	5.86	0.62
ARA02B-01(A)MUC-15 cm	3.19	4.39	0.73
ARA02B-01(A)MUC-20 cm	4.67	5.39	0.87
ARA02B-01(A)MUC-25 cm	5.13	6.23	0.82
평균	3.12	4.58	0.65
표준편차	1.46	1.25	0.17

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1절. 연구개발목표의 달성도

가. 총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)

구분	년도	세부연구목표	가중치 (%)	달성실적	연차별 계획대비 연구실적 달성율 (%)	
1차년도	2022	<ul style="list-style-type: none"> 환경시료 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 극지연구소 아카이브 조사 국내·외 연구 네트워크 활용 	30	<ul style="list-style-type: none"> 동해와 서북극해 퇴적물 시료 확보 황해, 소양호 및 노르딕해환경시료 확보 	100
		<ul style="list-style-type: none"> 선진국 수준의 GDGT 분석 프로토콜 정립 	<ul style="list-style-type: none"> 분석 장비 테스트 동해와 황해 퇴적물 시료 분석 	35	<ul style="list-style-type: none"> GDGT 분석 인프라 확립 동해와 황해 퇴적물 시료 GDGT 분석 결과 확보 선진국형 GDGT 분석 기법 구축 	100
		<ul style="list-style-type: none"> 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보 및 활용 	<ul style="list-style-type: none"> 서북극해, 소양호, 및 노르딕해 환경시료 분석* GDGT 분석자료 정리 타기관 GDGT 분석자료 활용 	35	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 지역의 GDGT 분석 결과 확보 비교 연구용 타 기관 GDGT 자료 확보 북극해에 적용 가능한 GDGT 분석 기법 확립 북극해에 최적화된 GDGT 분석기법을 활용한 북극해 고수온 복원 가능성 확인 	100

*(2022년 북극해 국제공동해저시추프로그램에서 획득한 코어퇴적물 시료를 활용할 계획이었으나 러시아-우크라이나 전쟁으로 탐사가 취소되어 다른 환경시료로 대체함)

제 2절. 관련분야 기술개발의 대외기여도

가. 과학 분야

- GDGT 기반 과거 수온 복원 기술은 IODP 퇴적코어 분석시 가장 중요한 인자 중 하나로 본 과제에서 확립한 분석기법을 북극해 IODP 퇴적코어 분석에 활용함으로써 국제공동연구에서 핵심멤버로 선도적 역할을 할 수 있음
- 현재 국외 그룹에서 획득한 과거 수온복원 자료에 의존하여 고해양/고기후 연구를 진행하고 있지만, 본 과제에서 확립한 분석인프라는 순수 국내 기술로 과거 수온 복원 자료 획득이 가능하므로, 기존 연구와는 다르게 IODP 관련 국제공동연구에서 좀 더 주도적 역할을 할 수 있음

나. 사회/경제적 분야

- 본 과제 수행으로 북극해 연구성과 확산 및 극지연구 활성화에 기여 가능함
- 전 세계가 주목하고 있는 북극해 국제공동해저시추프로그램 참여로 북극해 연구에 대한 우리나라 국격 및 극지연구소의 국제적 위상 제고가 가능함



제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

- 극지연구소에 북극해에 활용 가능한 과거 수온프록시 분석 기술을 확보함으로써 IODP 국제공동해저시추 연구에서 핵심참여자로서 선도적 역할 수행 가능
- 확보한 과거 수온프록시 분석 기술은 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 등과 같은 현재 극지연구소에서 수행 중인 연구과제에 활용 가능
- 북극해 과거 기후환경 복원과 관련된 극지연구소 주요 사업 도출
- 북극해 빅사이언스와 관련해 다양한 분야의 국내·외 공동연구 활성화 기여



제 6 장 참고문헌

- Fietz S, Huguet C, Rueda G, Hambach B, Rosell-Mele A. (2013). Hydroxylated isoprenoidal GDGTs in the Nordic Seas. *Mar Chem* 152, 1 - 10.
- Hopmans E. C., Weijers J. W. H., Schefuß E., Herfort L., Sinninghe Damste J. S. and Schouten S. (2004). A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids. *Earth Planet. Sci. Lett.* 224, 107 - 116.
- Huguet C, Fietz S, Rosell-Mele A. (2013). Global distribution patterns of hydroxy glycerol dialkyl glycerol tetraethers. *Org. Geochem.* 57, 107 - 118.
- Kim J.-H., van der Meer J., Schouten S., Helmke P., Willmott V., Sangiorgi F., Koc, N., Hopmans E. C. and Sinninghe Damste J. S. (2010). New indices and calibrations derived from the distribution of crenarchaeal isoprenoid tetraether lipids: implications for past sea surface temperature reconstructions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4639 - 4654.
- Kim J.-H., Schouten S., Hopman E. C., Donner B., Damste J. S. (2008). Global sediment core-top calibration of the TEX86 paleothermometer in the Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 1154 - 1173.
- Kim J.-H., Gal J.-K., Jun S.-Y., Smik L., Kim, D., Belt, S.T., Park, K., Shin K.-H., Nam S.-I. (2019). Reconstructing spring sea ice concentration in the Chukchi Sea over recent centuries: insights into the application of the PIP25 index. *Environ. Res. Lett.* 14, 125004.
- Schouten S., Hopmans E. C., Schefuß E. and Sinninghe Damste J. S. (2002). Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth Planet. Sci. Lett.* 204, 265 - 274.
- Sinninghe Damste J. S., Rijpstra W. I. C., Foesel B. U., Huber K. J., Overnamm J., Nakagawa S., Kim J., Dunfield P., Dedysh S., Villanueva L. (2018). An overview of the occurrence of ether- and ester-linked iso-diabolic acid membrane lipids in microbial cultures of the Acidobacteria: Implications for brGDGT paleoproxies for temperature and pH. *Org. Geochem.* 124, 63 - 76.
- Wu J., Stein R., Fahl K., Syring N., Nam S.-I., Hefter J., Mollenhauer G., Geibert W. (2020). Deglacial to Holocene variability in surface water characteristics and major floods in the Beaufort Sea. *Comm. Earth. Envir.* 1:27.
- Wuchter C., Schouten S., Wakeham S. G. and Sinninghe Damste J. S. (2005). Temporal and spatial variation in tetraether membrane lipids of marine Crenarchaeota in particulate organic matter: implications for TEX86 paleothermometry. *Paleoceanography* 20, 1 - 11.

발표자 (과제유형)	평가의견
<p>김정현 책임연구원 (정책지원)</p>	<p>과제명: GDGT 기반 과거 수온프록시 분석기법 확립: 북극해 로모노소프 해령 국제공동해저시추프로그램 참여 선행 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 성과활용 방안 및 기대효과 <ul style="list-style-type: none"> - 예산을 계획대로 집행함 - 분석값이 불확실성이 크다는 한계는 있으나 북극해에서 검출에 성공했고 공인된 기관 분석값과 비슷한 패턴을 보였다는 것은 성과로 보임 - 향후 더 많은 분석을 수행하여 북극해 환경 변화를 이해하는데 중요한 자료로 활용될 수 있기를 기대함 - GDGT 기법을 이용하여 퇴적물의 수온측정에 활용하는 것은 고기후 연구에 많은 도움이 될 것임 ○ 최종보고서에 반영할 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 결론에 아래 내용을 구체적으로 기술해 주기 바람 <ul style="list-style-type: none"> · IODP 참여 시, 과거-현재에 대비하여 얼마나 다른 차원의 연구성과를 창출할 수 있는지 · 이 과제의 연구결과가 향후 IODP 참여와 국제협력에 있어 얼마나 중요한 또는 큰 영향을 미치는지 - 향후 IODP 참여 방안을 포함 북극해 연구에 활용할 계획을 좀더 구체적으로 정리해 주기 바람 - 중력코어나 멀티코어와 같이 짧은 길이의 코어가 회수되었을 경우, 이 코어시료를 이용하여 GDGT 결과를 도출할 수 있는 연구의 가능성 제시 - GDGT 농도변화를 이용하여 수온의 변화를 알 수 있는 방법, 또는 상관관계를 표, 도면으로 제시 - 성과의 활용 구체화 <ul style="list-style-type: none"> · IODP 혹은 국내외 유사 연구와의 협력 관련 구체적인 활용방안 제시 필요 ○ 기타 종합의견 <ul style="list-style-type: none"> - 실제 정확도와 정밀도가 해외 기성 연구자들의 수준에 얼마나 근접한지 설명해 주기 바람 <ul style="list-style-type: none"> · 방법을 일정수준 우리 역량으로 확립한 것은 짐작할 수 있으나 해외 경쟁 집단에 얼마나 필적할 수 있는지 바로 이해가 되는 설명을 듣지 못했음 - IODP 국내 프로그램을 개발하는데 결정적인 촉진제 역할을 할 수 있다면 설명해 주기 바람 - 절대값이 분석기관마다 차이를 보인다는 것은 데이터에 대한 신뢰도를 낮추는 것으로 보임 - GDGT 분석을 활용한 과거온도 추정의 신뢰도를 높이기 위해서는 분석 표준 물질의 확립을 포함 분석값의 신뢰도를 높이기 위한 노력이 많이 필요할 것으로 판단됨

연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	정책·지원과제		
과제명	GDGT 기반 과거 수온프록시 분석기법 확립: 북극해 로모노소프 해령 국제공동 해저시추프로그램 참여 선행 연구 (계정번호: PE22520)	연구기간	2022.03.01 ~ 2022.12.31
연구책임자	김 정 현 책임연구원	연구비(직접비)	50,000 천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> GDGT 기반 북극해에 최적화된 과거 수온 복원 기술 확보 <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> 극지연구소 아카이브 및 국내·외 연구네트워크를 활용한 환경시료 확보 선진국 수준의 GDGT 분석 기술 확립 북극해에 최적화된 GDGT 분석 기술 확보 및 활용 <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> 극지연구소에 북극해에 활용 가능한 과거 수온프록시 분석 기술을 확보함으로써 IODP 국제공동 해저시추 연구에서 핵심참여자로 선도적 역할 수행 가능 확보한 과거 수온프록시 분석 기술은 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 등과 같은 현재 극지연구소에서 수행 중인 연구과제에 활용 가능 북극해 과거 기후환경 복원과 관련된 극지연구소 주요 사업 도출 북극해 빅사이언스와 관련해 다양한 분야의 국내·외 공동연구 활성화 기여 <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견		반영사항	비고
<ul style="list-style-type: none"> 결론에 아래 내용을 구체적으로 기술해 주기 바람 - IODP 참여 시, 과거-현재에 대비하여 얼마나 다른 차원의 연구성과를 창출할 수 있는지 - 이 과제의 연구결과가 향후 IODP 참여와 국제협력에 있어 얼마나 중요한 또는 큰 영향을 미치는지 		<ul style="list-style-type: none"> GDGT 기반 과거 수온 복원 기술은 IODP 퇴적코어 분석시 가장 중요한 인자 중 하나로 본 과제에서 확립한 분석기법을 북극해 IODP 퇴적코어 분석에 활용함으로써 국제공동연구에서 핵심멤버로 선도적 역할을 할 수 있음 현재 국외 그룹에서 획득한 과거 수온복원 자료에 의존하여 고해양/고기후 연구를 진행하고 있지만, 본 과제에서 확립한 분석인프라는 순수 국내 기술로 과거 수온 복원 자료 획득이 가능하므로, 기존 연구와는 다르게 	<p>연구보고서 p.46-47 참조</p>

	IODP 관련 국제공동연구에서 좀 더 주도적 역할을 할 수 있음	
<ul style="list-style-type: none"> 향후 IODP 참여 방안을 포함 북극해 연구에 활용할 계획을 좀 더 구체적으로 정리해 주기 바람 	<ul style="list-style-type: none"> 현재 K-IODP 과제가 2022년 12월로 종료됨에 따라 한국연구자의 IODP 참여가 불분명한 상황임. 하지만 본 과제에서 확보한 과거 수온 복원 기술은 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 등과 같이 현재 극지연구소에서 수행 중인 연구과제에 활용 가능함 	
<ul style="list-style-type: none"> 중력코어나 멀티코어와 같이 짧은 길이의 코어가 회수되었을 경우, 이 코어시료를 이용하여 GDGT 결과를 도출할 수 있는 연구의 가능성 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 북극해 멀티코어 퇴적물 시료를 활용한 GDGT 분석 결과를 최종보고서에 기재하였음 기본 적으로 본 과제에서 확립한 분석 기법은 중력 및 멀티코어를 비롯한 다양한 환경시료 분석에 사용 가능함 	<p>연구보고서 p.43-44 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> GDGT 농도변화를 이용하여 수온의 변화를 알 수 있는 방법, 또는 상관관계를 표, 도면으로 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 기본적으로 과거 수온프록시 계산에 GDGT 농도 결과가 필수적이지 않으며, 농도 결과는 생물 생산성 변화를 파악하는데 사용할 수 있음. 최종 보고서에 인텍스와 수온과의 상관관계식을 추가 기재하였음 	<p>연구보고서 p.21 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> 성과의 활용 구체화 - IODP 혹은 국내외 유사 연구와의 협력 관련 구체적인 활용방안 제시 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 본 과제에서 확보한 과거 수온 복원 기술은 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 등과 같이 현재 극지연구소에서 수행 중인 연구과제에 활용 가능함. 또한 국내외 연구팀으로부터의 GDGT 분석관련 협업 요청에 능동적으로 대응할 수 있음 	<p>연구보고서 p.46-47 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> 실제 정확도와 정밀도가 해외 기성 연구자들의 수준에 얼마나 근접한지 설명해 주기 바람 - 방법을 일정수준 우리 역량으로 확립한 것은 짐작할 수 있으나 해외 경쟁 집단에 얼마나 필적할 수 있는지 바로 이해가 되는 설명을 듣지 못했음 	<ul style="list-style-type: none"> GDGT 분석 분야에서 선두그룹인 네덜란드 NIOZ에서 사용하고 있는 방법을 KOPRI에 구축하였으며 target 하고 있는 GDGT compound 분석에 성공함으로써 선진국 수준의 분석기술 및 분석 정확도/정밀도 확보에 근접하였다고 사료됨. 하지만 지속적인 분석 및 분석결과 컨트롤로 좀 더 정밀한 내부적인 분석 know-how를 쌓을 필요가 있음 	
<ul style="list-style-type: none"> IODP 국내 프로그램을 개발하는데 결정적인 촉진제 역할을 할 수 있다면 설명해 주기 바람 	<ul style="list-style-type: none"> GDGT 기반 과거 수온 복원 기술은 IODP 퇴적코어 분석시 가장 중요한 인자 중 하나로 이 프록시 분석 기술 확보는 국제공동연구에서 선도적 역할을 할 수 있음을 의미함 	<p>연구보고서 p.46-47 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> 절대값이 분석기관마다 차이를 보인 	<ul style="list-style-type: none"> 본 과제에서는 액체질소를 사용하여 	

<p>다는 것은 데이터에 대한 신뢰도를 낮추는 것 요인으로 보임</p>	<p>고성능 액체크로마토그래피로 분석하여 분석 감도가 개선되어 타 분석기관에서 분석했을 때 농도가 낮아 검출이 안되었던 GDGT가 KOPRI 방법으로는 검출이 됨</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ GDGT 농도는 분석기관마다 분석 기기, 분석 조건 및 상태에 따라 차이가 날 수 있지만, 이러한 부분들을 감안하여 주로 GDGT compound의 상대비로 계산되는 인덱스를 활용하고 있음 ◦ 그럼에도 불구하고 분석값에 차이를 보인 부분은 추후 더 정밀하게 확인할 예정임 ◦ 북극해 멀티코어 퇴적물 시료의 GDGT 결과의 경우, 타 분석기관에서는 본 과제에서 사용한 시료보다 5배 많은 양의 시료를 사용하였으며, 이로 인해 분석 결과에 차이가 있을 수 있음. 이를 확인하기 위해 추후 타 분석기관에서 사용한 시료량과 동일한 양의 시료로 재분석하여 비교할 예정임 	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ GDGT 분석을 활용한 과거온도 추정 의 신뢰도를 높이기 위해서는 분석 표준 물질의 확립을 포함 분석값의 신뢰도를 높이기 위한 노력이 많이 필요할 것으로 판단됨 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ GDGT 분석시 Crenarchaeol과 표준 물질 C₄₆-GDGT를 1:1의 비율로 합성하여 만든 물질을 분석한 결과값을 지속적으로 확인하여 기기 상태와 분석 조건이 항상 동일함을 확인한 후에 시료 분석을 진행함으로써 분석값의 신뢰도를 확보하고 있음 ◦ 하지만 모든 GDGT 타겟 물질의 표준 물질 확립은 현재 전세계적으로 매우 어려운 과제로 이와 관련한 새로운 연구과제가 필요함 ◦ 국내 기술로 GDGT 타겟 물질의 표준 물질을 만들 수 있는 기술을 확보할 수 있다면, 이 연구분야에서 선도적인 위치를 점할 수 있으며 세계 최초 연구성과를 창출할 수 있을 것으로 사료됨 	

뒷 면



(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.