

서북극 척치해 주변해역 해저퇴적층의
고해상 층서 분석을 통한 고환경 복원 연구

Reconstruction of paleoenvironment based on
high-resolution stratigraphic analysis
of Late Quaternary sediments
in the Chukchi Sea, West Arctic



제주대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서북극권 해역 가스하이드레이트 특성과 고해양환경변화 복원 연구” 과제의 위탁연구 “서북극 척치해 주변해역 해저퇴적층의 고해상 총서 분석을 통한 고환경 복원연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



총괄연구책임자	: 남 승 일
위탁연구기관명 학협력단	: 제주대학교 산
위탁연구책임자	: 윤 석 훈
위탁참여연구원	: 조 영 진
“	: 고 창 성
“	: 김 성 현

요 약 문

I. 제 목

서북극 척치해 주변해역 해저퇴적층의 고해상 층서 분석을 통한 고환경 복원연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 범세계적인 기후변동(온난화)으로 인해 자연환경 변화가 가장 급격히 나타나는 지역 중에 하나인 북극해는 과거의 기후변화 과정을 규명하고 미래를 예측하기 위한 연구조사의 최적 장소로 알려져 있다. 특히, LGM을 포함한 과거의 기후변동 양상을 규명하기 위해서는 북극해에 집적되어 있는 퇴적층에 대한 지화학 및 고생물학적 기후변화 프록시 연구가 그 중심에 있다. 이와 함께 과거 기후와 해양환경 시공간적 변화과정을 이해하기 위해서는 해저에 집적되어 있는 지층을 집적순서에 따라 그 특성(프록시)의 변화를 분석하고 서로 다른 지역의 지층을 대비하여 비교하는 층서분석이 필요하다. 이 연구과제에서는 척치해 주변해역 해저퇴적층의 고해상 퇴적층서 수립과 고해양환경 변동에 따른 퇴적층서 형성 모델 구축을 목표로 하여 수행되었다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

이 연구에서는 2011년과 2012년 척치분지 및 인근 해역에서 취득된 sub-bottom profile (SBP) 자료에 대한 고해상 탄성파층서 분석을 실시하고 그 결과를 이용하여 (고해상) 광역 층서체계를 제시하였다. 아울러, 척치분지에서 취득된 중력 코어(16BGC) 퇴적물 시료에 대해 층서를 구분하고 고해양환경 변화에 따른 퇴적상 모델을 제시하였다.

IV. 연구개발결과

- 척치해저분지에서 취득된 코어퇴적물에 대해 조직, IRD 함량, 색상, 암상, 퇴적상 등의 특성을 분석한 결과, 코어구간은 7개의 층단위로 구분됨
- 각 층단위는 간빙기(홀수 층단위)와 빙하기(짝수 층단위)의 반복적인 주기성을 반영하는 것으로 해석되며, 이에 따른 퇴적상 모델 제시
- 즉, 갈색 계열의 층단위 I, III, V 및 VII는 해빙기 후기를 포함한 간빙기 퇴적층으로, 회색 계열의 층단위 II, IV 및 VI는 빙하기를 포함한 해빙기 퇴적층으로서 해석
- MIS와의 비교를 통해 코어 16BGC 퇴적물은 잠정적으로 지난 10만 동안에 쌓인 것으로 추정
- 척치해저분지 및 인근 로모노소프해저분지에서 취득된 SBP 자료에서 고진폭의 강한 반사면(일부는 국지적 침식면과 대비)을 경계로 하는 5개의 층단위(SU1, SU2, SU3, SU4, SU5)로 구성된 층서체계를 구축
- 척치분지 및 로모노소프분지 사면 및 분지평원 지역에서 두께 20~30 m, 축선상 최대 폭(길이) 30km 내외의 빙하기원 암설류 퇴적체의 집적체 확인
- SBP 자료에서 인지되는 대규모 암설류 퇴적체는 코어와의 층서대비로 볼 때, 대부분 10만년전 이전에 발생한 것으로 해석

V. 연구개발결과의 활용계획

- 플라이스토세 말기 및 홀로세 동안의 북극해의 고해양 환경의 변화(LGM 동안의 대륙빙상의 분포 포함)를 규명함으로써 향후 지구 기후계의 변동 양상을 가늠하는 데 중요한 자료로 활용
- 향후 북극해 가스하이드레이트 등 해저자원탐사 및 북극항로탐사에 기본 자료로 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Reconstruction of paleoenvironment based on high-resolution stratigraphic analysis of Late Quaternary sediments in the Chukchi Sea, West Arctic

II. Purpose and Necessity of R&D

Recently, the Arctic Ocean has been considered as a place experiencing the most obvious environmental changes in association with global climatic warming on the way. As a result, it has been at the forefront of researches aiming to reconstruct and predict the earth climate changes in the past and the future, respectively. In particular, the studies regarding geochemical and paleontological proxies from the submarine sedimentary deposits are crucial to reconstruction of the past climatic and oceanographic changes during LGM and the earlier glacial periods in the Arctic region. In addition, for the comprehensive understanding of temporal and spatial changes in the past climate and oceanography, it is necessary to analyze the stratigraphy of submarine sediments in various settings and correlate each other. This study focuses on establishing a high-resolution stratigraphy of sedimentary deposits in Chukchi Sea and a sedimentary sequence model associated with the paleoceanographic changes.

III. Contents and Extent of R&D

This study establishes the high-resolution regional stratigraphic framework of the Chukchi Sea region based on analysis of seismic stratigraphy with sub-bottom profiles obtained from Chukchi Basin region in 2011 and 2012, and also presents a sedimentary facies model extracted from sedimentological analysis of a sediment core (16BGC) from the Chukchi Basin.

IV. R&D Results

- In sediment core (16BGC), 7 stratigraphic units are recognized based on sediment texture, IRD contents, lithology, color and sediment facies.
- Stratigraphy of sediment core is interpreted to reflect the cyclicity between glacial and interglacial periods, and the resulting sedimentary facies model is suggested.
- Units I, III, V and VII with brownish color are interpreted as interglacial deposits, whereas units II, IV and VI showing gray color as glacial to deglacial deposits.
- Stratigraphic correlation with the MIS-interpreted reference core strongly suggests that the core 16BGC most probably encompasses sediment accumulation for the last 100 thousands years at least.
- On the SBP profiles from Chukchi and Lomonosov basins, a stratigraphic framework consisting of 5 seismic units (SU1, SU2, SU3, SU4, SU5) are suggested based on seismic reflection configuration and high-amplitude bounding reflectors (rarely correlated with local erosional horizons).
- Stacks of glaciogenic debrite masses of 20~30 m thick and max. 30 km wide are recognized in the slope and marginal areas of basin plains of Chukchi and Lomonosov basins.
- SBP profile-to-core correlation suggests that the large-scale debrite masses were mainly deposited prior to 100,000 years B.P.

V. Application Plans of R&D Results

- As fundamental or supportive data for the prediction of future changes in the earth climate system
- As fundamental or supportive data for preliminary researches or evaluations on marine resources potential and development of sea route in the Arctic region.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	7
제1절 연구 내용 및 방법	7
1. 연구 내용	7
2. 연구 방법	7
가. 코어 자료	7
나. 고해상 천부지층탐사 자료	10
제2절 연구 결과	13
1. 코어퇴적물 분석	13
가. 퇴적물 조직 및 조립암편 함량	13
나. 퇴적물 색상	13
다. 퇴적상	16
라. 고해상 층서	25
마. 층서해석	29
바. 퇴적상 모델	31
2. SBP 자료 고해상 층서분석	35
가. 척치해저분지 평원	35
나. 척치해저분지 사면	37
다. 마카로프 해저분지 및 주변 사면	38
라. 척치해저분지와 마카로프해저분지의 층서 비교	40
제 4 장 연구개발 목표 달성도	41
제1절 연구 개발목표 및 달성도	41
제2절 연구수행 세부 내용 및 결과 요약	42
1. 세부목표 1	42
2. 세부목표 2	42
3. 세부목표 3	43
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	45
제1절 학술적 파급효과	45
제2절 경제적 파급효과	45
제 6 장 참고문헌	47
부 록	55

제 1 장 서 론

이 연구는 ‘서북극권 해역 가스하이드레이트 특성과 고해양환경변화 복원 연구’의 위탁과제(3년)로서, 최종 연구목표는 척치해 주변해역(그림 1) 해저퇴적층의 고해상 퇴적층서를 수립하고 고해양환경 변동에 따른 퇴적층서 형성 모델을 구축하는 것이다. 이를 위해 1차년도와 2차년도에는 해저지층탐사기(Sub-bottom Profiler: SBP) 자료에 대한 고해상 탄성파층서 분석을 실시하고 그 결과를 이용하여 서북극해(고해상) 광역 층서체계를 수립함으로써 과거 빙상의 분포 및 발달사 복원에 필요한 정보 도출하고, 아울러 중력 코어(gravity corer) 취득 퇴적물에 대해 cm-scale 조직 특성을 분석하고 퇴적작용 해석을 통하여 기후변화기록 정밀복원에 필요한 퇴적학적 프록시를 제공하게 된다. 그리고 이를 기초로 하여 최종적으로 3차년도에는 고해양변동 정보(코어분석 결과)와 고해상 퇴적층서 발달(SBP자료 분석 결과)과의 상관관계를 분석함으로써 고해양환경 변동에 따른 북극해 특유의 퇴적모델을 제시하는 것으로 계획되어 있다. 이 보고서는 위와 같은 연구내용 중에서 2차년도에 수행된 결과를 중심으로 작성되었다.



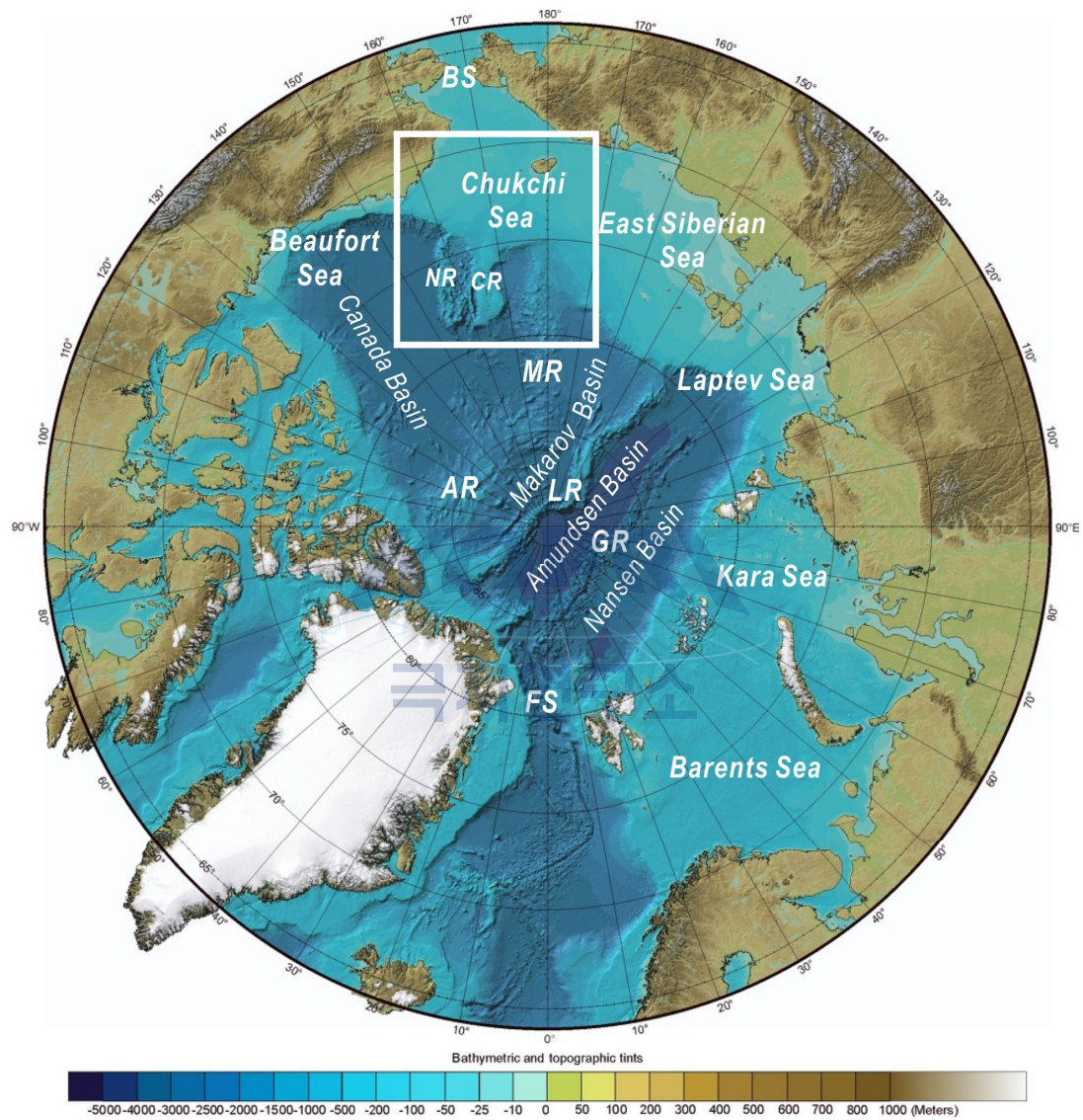


그림 1. 연구 지역 및 북극해 지형도(<http://www.ibcao.org>). BS, 베링 해협; FS, 프람 해협; GR, 가켈 해령; LR, 로모노소프 해령; AR, 알파 해령; MR, 멘델리프 해령.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

최근, 북극해는 전 세계적인 기후변동과 관련하여 자연환경이 가장 급변하는 지역으로 인식되면서, 기후변화연구의 핵심 지역으로서 관심이 집중되고 있다. 지난 30여 년간, 지질학 및 해양지질학 분야에서는 북극해의 고환경 변화를 해석하기 위한 다양한 주제의 연구가 수행되었는데, 해저 퇴적물에 포함된 유공충, 규조류, 방산충, 패각편 등에 대한 산소 동위원소를 이용한 고수온 분석과 탄소 동위원소를 이용한 연대 분석, 화분 화석을 이용한 대륙의 기온 분석, 해저 퇴적물에 포함된 빙하수송 쇄설물(ice-rafted debris, IRD)의 조성 변화를 통한 IRD의 근원지 파악과 빙산(iceberg)과 해빙(sea ice)의 수송 경로(표층 해류) 연구, 유기질 미화석을 이용한 해빙의 분포 연구, 탄성과 탐사와 시추코어 퇴적물을 이용한 빙상의 규모에 대한 연구 등 다양한 고환경 지시자(proxy)분석 연구들이 핵심 연구주제로 떠오르고 있다(Hopkins, 1965; Alekseev, 1997; Bischof and Darby, 1997; Poore et al., 1999; 김소영과 남승일, 2011; Nissen et al., 2013).

또한, 북극해에서 대륙빙하(빙상), 빙봉, 그리고 해빙과 같은 빙하의 발달과 감소는 지구 알베도의 변화, 심층수의 형성과 순환, 그리고 대기 순환에 상당한 영향을 미치기 때문에(Aagaard et al., 1985; Nissen et al., 2013), 빙하기 또는 빙하 최대기(Glacial Maximum) 동안에 발달된 빙하의 규모를 밝히는 것은 고환경 또는 고기후의 변화를 이해하는데 매우 중요하다. 따라서, 빙하기 또는 지난 빙하 최대발달기(Last Glacial Maximum) 동안에 발달된 북극해 주변지역의 빙상 규모를 밝히기 위해서, 육상 환경의 노두(outcrop) 조사, 산소 동위원소를 이용한 고수온 분석, 고해상 천부지층 탄성과 탐사, 다중빔 음향측심 탐사 등을 통한 많은 연구들이 수행되었다(Grosswald and Hughes, 2002; Ehler and Gibbard, 2007; Jakobsson et al., 2010; Stein et al., 2010; Nissen et al., 2013).

이들 연구에 따르면 북극해에 분포하는 빙상의 중심지는 그린란드에 위치하는 그린란드 빙상(Greenland Ice Sheet, GIS), 캐나다 부근에 위치하는 로렌타이드 빙상(Laurentide Ice Sheet, LIS), 그리고 유라시아에 분포하는 유라시아 빙상(Eurasia Ice Sheet, EAIS)으로 제안되고 있다. 그러나, 서북극에 위치하는 베링기아(Beringia) 지역에 대한 빙상의 존재 유무에는 아직까지도 이견이 존재한다. 특히, 베링기아 지역에서 빙상의 존재에 대해서는 LGM 시기에 빙상이 존재했다는 Grosswald and Hughes (2002)의 연구와 빙상이 존재하지 않았다는 Ehler and

Gibbard (2007)의 연구가 서로 상반된 결과를 제시하고 있다.

이러한 연구 결과들이 보고된 이후, 최근 수 년간 서북극 베링기아 지역에 대한 연구들이 수행되고 있으며, 측면주사 소나 및 12-kHz 음향 측심자료를 이용한 Polyak et al. (2007)의 연구와 Nissen et al. (2013)의 연구결과로부터 척치해 주변부를 포함한 베링기아 지역이 빙상 또는 빙붕이 영향을 받았던 것으로 추정되는 증거들이 보고되고 있다. 그러나 빙상 발달기의 정확한 연대에 대해서는 최근까지도 밝혀지지 않고 있다. 이는 빙하 혹은 빙상의 영향을 지시하는 증거로서 주로 대륙붕이나 상부대륙사면에 분포하는 침식흔이 분석되고 있는데, 역으로 빙하 침식으로 인한 결층과 지층대비의 어려움이 층서와 연대 설정에 장애요인이 되고 있다.

한편, 과거의 북극해에 대한 기후변화 양상을 규명하기 위해서 북극해에 집적되어 있는 퇴적층에 대한 지화학 및 고생물학적 기후변화 지시자(proxy)분석 연구도 국내외 연구진에 의해 활발하게 진행되고 있다(Hopkins, 1965; Alekseev, 1997; Bischof and Darby, 1997; Poore et al., 1999; 김소영과 남승일, 2011). 이러한 기후변화 연구에 활용되는 주요 시료인 해양 퇴적물은 일반적으로 반원양성 및 질량류 퇴적과 함께, 용빙수류, 빙산, 해저류 등 다양한 운반매체를 통해 수송·퇴적되므로, 퇴적물에 대한 기후변화 연구에 있어서 퇴적물의 기원과 퇴적환경에 대한 정보가 기본적으로 구축되어야만 기후변화를 이해하는데 보다 정확한 해석을 가능하게 할 것이다.

퇴적학 분야에서 보면, 중앙 북극해(Central Arctic)의 플라이스토세 퇴적물은 주로 세립질의 규질 쇄설성 니와 다양한 양의 모래와 자갈로 구성되며, 생물기원 입자는 매우 적으나 유공충과 코콜리스가 특정 구간에 일반적이다. 선행 연구결과 북극해 퇴적물은 갈색과 밝은 갈색 색상이 뚜렷하게 교호하는 특징을 보인다. Clark et al. (1980)는 퇴적학적 연구(X선 사진, 색상 암석조성을 통한 퇴적물 조직, 구조)를 통해 중앙북극해의 아메라시아 분지의 고지대에서 암상의 기준을 제시하였다(Units A to M). 이러한 암상은 새로 추가된 층단위를 통해 일부 수정되었다(Minicucci & Clark 1983; Mudie & Blasco 1985; Clark et al. 1990). 유공충과 망간이 풍부한 갈색층, 그리고 탄산염이 풍부한 분홍색-흰색과 흰색 층들이 아메라시아 분지 내 퇴적물 코어를 대비하기 위해 사용되어왔다(Phillips & Grantz 1997, 2001; Polyak et al. 2004; Norgaard-Pedersen et al. 2007b; Stein et al. 2010a, b).

Clark et al. (1980)이 암상 기준을 제시한 이래로, 퇴적물 코어에 대한 기술은 주로 퇴적물 조직과 구조를 해석하기 보다는 층서대비를 위한 기준 층단위를 확인

하기 위해 사용되어왔다. 따라서, 퇴적상에 대한 성인적 해석이 거의 불가능했으나, Darby et al. (1989)은 Clark의 암상기준과 관련하여 A-M 암상층단위를 가능한 성인적으로 연관지어 적어도 6개의 뚜렷한 퇴적 싸이클을 구분하였다. 이러한 싸이클은 사질 니(sandy lutite)로 접이되는 실트질 니(silty lutite)에서 상향조립화 하는 시퀀스로 구성된다. 이후, Phillips & Grantz (1997, 2001)는 노스윈드 해령의 퇴적물 코어에서 층단위 A-M 내에서 44개의 퇴적 싸이클을 구분하였다. 반복되는 기본적인 층서단위로는 강하게 산화된 갈색질의 사질-역질 니의 하부 층단위(간빙기)와 상부에 놓인 덜 산화된 녹회색 실트질 점토 층단위가 구분되었다.

북극해 시추코어 퇴적물에 대한 X-선 사진 분석은 퇴적물 조직을 해석하는데 유용한 수단이며 퇴적상을 해석하기 위해 그리고 북극과 아북극 퇴적물에 대한 코어 퇴적물 기재를 위해 많은 연구에서 수행되었다(Clark et al. 1980; Vorren et al. 1984; Mudie & Blasco 1985; Henrich et al. 1989; Hein et al. 1990; Dowdeswell et al. 1994; Andersen et al. 1996; Phillips & Grantz 1997, 2001; Knies et al. 2000; Ó Cofaigh et al. 2001; Evans et al. 2002; Svindland & Vorren 2002; Howe et al. 2008). X-선 사진 분석은 디지털 색상 스캐닝, XRF 및 물성에 대한 멀티 센서 코어 로깅과 대조적으로 코어 전체에 대한 지속적인 정보를 제공하는 비교적 손쉬운 분석법이다. 이러한 연구분석은 퇴적물 색상의 기원을 평가하기 위한 그리고 Darby et al. (1989), Phillips & Grantz (1997) 및 Polyak et al. (2009)에 의해 해석된 퇴적 싸이클과 암석학적 표식 지층들의 지역적인 특징을 평가하기 위한 북극해 퇴적물 코어분석에 널리 활용되고 있다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구 내용 및 방법

1. 연구 내용

이 연구에서는 기후변화기록 정밀복원에 필요한 퇴적학적 프록시 제공하기 위하여 척치해저분지(Chukchi Basin)에서 취득된 중력 코어(gravity corer) 퇴적물에 대해 조직, 암상, 퇴적상 등의 특성을 분석하였고 이를 기초로 고해상층서를 설정하고 고환경변화와의 상관성을 해석하였다. 아울러, 척치해저분지와 인근 심해저에서 취득된 Chirp 천부지층탐사(subbottom profiling: SBP) 자료에 대한 고해상 탄성파 층서 분석을 실시하였다.

2. 연구 방법

가. 코어자료

이 연구에서 분석된 시료는 2011년도에 획득된 16B 정점의 코어퇴적물이다(그림 2). 기존에 수행된 코어분석 결과를 보완하여 금년 2차년도에는 디지털 색상자료를 새로이 취득하고 퇴적상구분을 재실시 하였으며, 입도분석자료와 IRD 함량 측정자료를 일부 수정하여 종합해석에 활용하였다.

(1) 입도분석

입도분석을 위한 기존의 시료 채취는 Sedigraph 5000D 입도분석기의 특성에 맞추어 절개된 코어 퇴적물에서 약 5g 가량을 취하고 이에 따라 분석하였지만, 본 연구기간에 사용된 슬랩 견본의 시료는 이해 비해 양이 적고 분석할 시료의 개수가 비교적 많다는 점에서 한국지질자원연구원 해저코어센터에 비치된 Microtrac 입도분석기를 입도분석에 활용하였으며 분석기에 적합한 전처리를 수행하였다. 시료 채취는 X-선 사진에서 관찰된 층리(엽리) 구조를 포함한 다양한 퇴적구조를 기준으로 길게는 5 cm 간격에서 짧게는 1 cm 간격으로 시료를 채취하였으며 입도분석기의 특성에 따라 역질 내지 조립사질 퇴적물 구간은 채취구간에서 제외하였다.

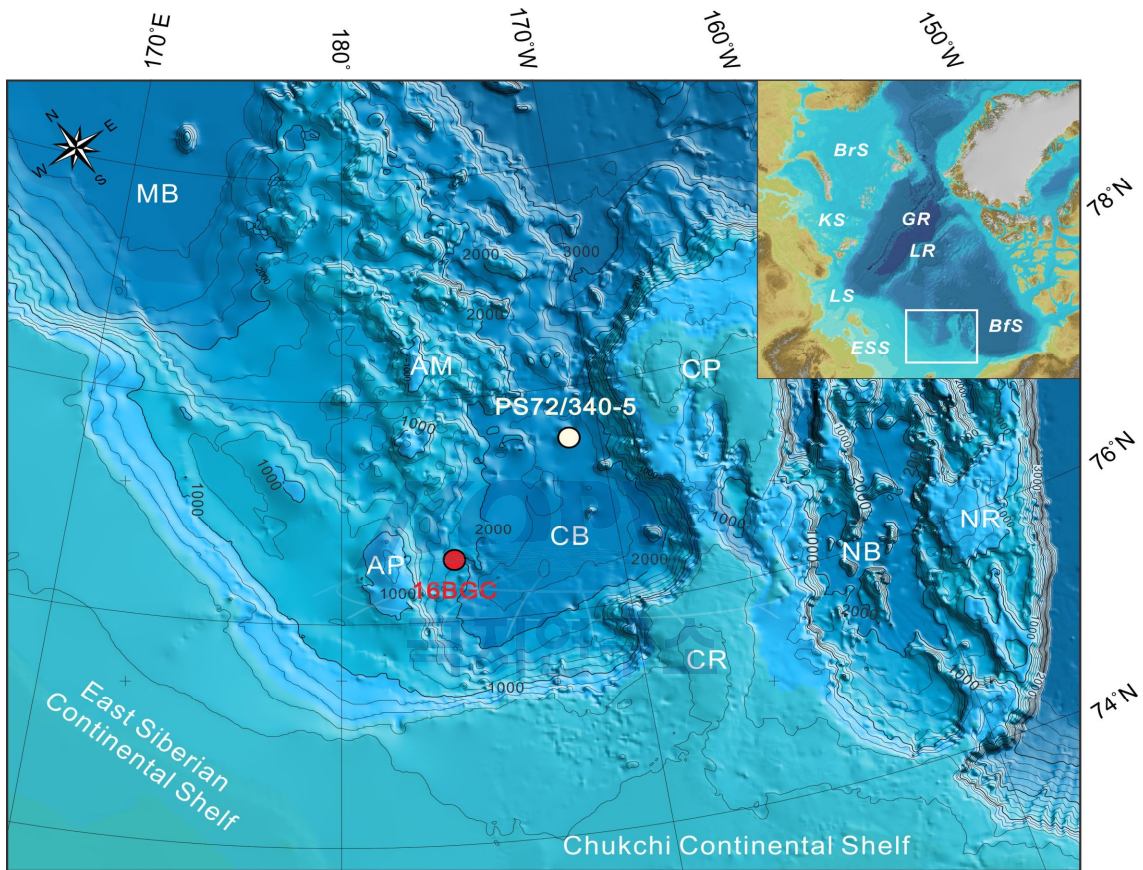


그림 2. 연구지역 지형도. 흰색과 적색 점은 각각 16BGC와 PS72/340-5 (from Matthiessen et al. 2010)의 위치를 표시함. AM, 알파-멘델리프 해령 복합체; AP, 아틀리스 대지; BfS, 보퍼트 해; BrS, 바렌츠 해; CB, 척치 분지; CP, 척치 대지; CR, Chukchi Rise; ESS, 동시베리아 해; GR, 가켈 해령; KS, 카라 해; LR, 로모노소프 해령; LS, 랍테프 해; MB, 마카로프 분지; NB, 노스윈드 분지; NR, 노스윈드 해령. 등수심선의 간격은 200m를 기준으로 함.

Microtrac 입도분석기는 레이저 회절방법으로 입도를 측정하기 때문에 다소 큰 입자가 우세하게 나타나는 점과 자갈 크기의 입자를 분석하기 어렵다는 단점이 존재하지만, 약 0.5g의 극소량의 시료만으로도 분석이 가능하며 사질과 니질 퇴적물을 분리하지 않고 동시에 분석할 수 있어 단기간에 많은 분석을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이에 따라 원활한 입도분석을 위한 전처리 과정으로써 기존과 동일하게 과산화수소를 시료에 반응시켜 유기물을 제거하였으며 Microtrac 입도분석기의 특성에 따라 $-1 \phi(2 \text{ mm})$ 이상의 역질 입자(주로 IRD)가 존재하는 경우에는 물체질로 분리하여 처리하였다. 추가적으로 탄산염 입자는 암석질 입자보다 크기에 비해 가볍기 때문에 부정확한 입도분석결과가 나올 수 있으므로 염산으로 처리하여 제거하였다.

Sedigraph 입도자료와 Microtrac 입도자료를 비교해본 결과, 세립질 mud fraction에서의 편차가 기기별로 다르게 산출되었다. 일반적으로 Microtrac 자료가 Sedigraph 자료에 비해 조립하게 측정되는 경향이 강한 것으로 나타난다. 향후 이 부분은 상관관계 분석 등을 통해 보정치를 산출하여 보완할 계획이다.

(2) IRD 함량

심해 퇴적물에서 빙하 수송의 영향을 파악하기 위한 기본적인 방법 중 하나는 입도의 분포 양상을 확인하는 것이다(Stein, 2008). 빙산과 해빙을 포함한 빙하에 의해 수송된 쇄설물(IRD, ice-rafted debris)은 주로 빙하기에서 간빙기로 넘어가는 시기에 퇴적되기 때문에 기후 변화를 예측하는데 있어 중요한 지시자(proxy)로 사용된다. IRD의 영향을 파악하기 위한 입자 크기의 구분 기준과 방법은 연구자마다 다소 차이가 있으나 일반적으로 모래 크기($>4\phi$) 이상의 입자의 분포 양상을 파악한다. Grobe(1987)의 연구는 IRD의 분포를 파악하는 방법으로서 단위 부피당 무게 함량(%)을 비교하는 방법도 존재하지만, X-선 이미지에서 확인할 수 있는 IRD의 개수를 동정하는 방법이 상당히 정확하며 간단하다고 제안한 바 있다.

본 연구의 IRD 함량 측정은 X-선 이미지 상에 구분되는 약 1 mm 이상의 직경을 갖는 IRD를 1 cm 간격으로 개수를 동정했으며 심도에 따른 IRD 함량 변화는 꺾은 선 그래프로 제작하여 도식화된다.

(3) 색상 분석

코어 퇴적물의 기본 색상에 대한 육안기재는 미국지질학회(Geological Society of America)에서 배포한 1984년도 색상기준표(rock color chart)를 기준으로 코어질

개 시에 이루어졌다. 이에 더하여, 보다 객관적인 색상 정보를 얻기 위해서 코어슬랩 퇴적물시료에서 Konica-Minolta사의 표색계(Spectrophotometer CM-2500d)를 이용하여 코어심도 기준 1cm 간격으로 색상측정을 실시하였다. 측정결과는 L*(명도)와 a*(적-녹색)의 값으로 산출된다.

(4) 퇴적상 분석

퇴적상(sedimentary facies)은 입도와 퇴적구조에 의해 구분되어지는 퇴적물의 특지으로서, 퇴적시의 수리역학적인 상태를 반영한다. 퇴적상 분석을 위해서는 먼저 시추퇴적물을 입도별로 구분하고 각 구간에서 나타나는 특징적인 1차 퇴적구조 및 2차 변형 및 생물교란 구조를 기술한다. 이 두 특성(퇴적물 조직 및 퇴적구조)을 조합하여 퇴적상 분류 기준표(facies classification scheme)를 작성한 후, 각 시추정점별로 주상도를 작성하고 타 정점과 대비시킨다. 한편 분류된 퇴적상은 기존 연구결과 및 타 분석결과와 비교하여 형성 메커니즘을 해석하며, 시추정점 간의 대비를 통해 형성 메커니즘의 영향 범위를 파악하여 도시한다. 2차년도 연구에서는 코어기재를 재실시하였으며, 이를 기초로 기존 퇴적상 구분에 수정작업을 하였다.

나. 고해상도 천부지층탐사 자료

천부지층 연구를 위한 고해상도 천부탄성파탐사(high resolution subbottom profiling)는 고주파수 대역(2~12 kHz)을 사용하는 Chirp SBP(subbottom profiler)를 이용하여 수행되었다. Chirp SBP 탐사는 고주파수 대역에서 발생할 수 있는 각종 잡음들을 포함한 문제점들이 존재하지만(김영준 등, 2011), 단일 고주파수를 이용한 천부탄성파 단면에 비해 보다 좋은 해상도를 갖는 자료를 획득할 수 있다(Kuhn and Weber, 1993; Lee et al., 2002).

퇴적학적 관점에서 고해상도 천부탄성파탐사는 천부지층의 퇴적물 특성, 내부구조, 층서 등을 광역적으로 연구하기 위한 유용한 수단이다(Damuth, 1975, 1980; Damuth and Hayes, 1977). 고해상도 천부탄성파 단면에서 반사면들은 천부지층을 구성하는 퇴적물의 밀도와 음파속도에 연유하며 퇴적물의 조직적 특성, 표층 지형(bottom topography)과 심층의 기하학적 구조(subbottom geometry)를 반영한다(Damuth, 1975, 1980; Damuth and Hayes, 1977; Lee et al., 2002). 또한 표층과 심층 반사면으로부터 획득된 정보는 일반적으로 제 4기 후기동안 형성된 퇴적물의 특성, 형태 및 퇴적작용을 이해하는데 중요한 기초자료로 이용될 수 있다(Damuth, 1975; Lee et al., 2002).

(1) 자료 취득

Chirp 방식의 장비는 2~10 kHz의 음파대역을 동시에 내보내고 해저에서 반사된 음파 중 2~10 kHz의 음파대역만을 필터링해서 수신한다. 이러한 방식은 기존의 3.5 kHz의 음파를 이용하는 방식보다 음파의 투과깊이를 증가시키고 해상도를 향상시킨다. 고해상도 탄성과 탐사 장비는 장착하는 방식에 따라 선체 기저에 장착하는 마운트(mount) 형태와 윈치 등을 이용해 음파의 송·수신기를 선체의 후갑판 쪽에 매달아 견인하는(towing) 방식으로 구분된다. 견인 방식은 선체 후부에서 끌려감에 따라 파도의 영향을 많이 받기 때문에, 선체 기저에 장착하는 마운트 방식이 선호되며 보다 양질의 탄성과 자료를 획득할 수 있다.

본 연구의 천부 탄성과 자료는 2011년과 2012년도에 수행된 아라온 북극 탐사동안 획득되었다(그림 3). 쇄빙연구선 아라온(R/V ARAON)의 고해상도 탄성과탐사 장비는 마운트 방식으로 “SBP120 Sub-bottom profiler”가 장착되어 있다. SBP120 장비는 2.5~7 kHz의 주파수 대역을 사용하며 획득된 자료는 TOPAS raw data로 기록되고 SEG-Y 형태로 저장할 수 있다.

(2) 고해상도 층서 분석

일반적으로 고주파음원을 사용하는 SBP탐사의 경우 천해에서는 투과깊이가 비교적 얇기 때문에 반사파의 수평적 변화특성에 따라 탄성과상 분석이 주로 이루어진다. 그러나 척치해에서 취득된 기존의 SBP자료에서는 수심이 깊은 심해저환경으로 갈수록 음원의 투과깊이가 100m 정도까지 증가하여 서로 다른 탄성과상을 보이는 퇴적체가 수직적으로 구분되며, 강한 반사면이 매우 양호한 수평연장성을 갖고 분포하는 경우, 지층의 대비가 가능하게 된다. 따라서 SBP자료의 질이 양호할 경우 수 m 간격을 갖는 고해상도층서의 구분이 가능할 것으로 예상된다. 탄성과층서를 구분하는 경계는 (1) 수직적인 탄성과상의 급격한 변화가 나타나는 면, (2) 불규칙한 표면형태를 보이는 침식면, (3) 반사강도가 크고 수평연장성이 양호한 면 등을 기준으로 설정하고자 한다. 이러한 층서 경계면은 퇴적층의 구성입자 및 퇴적작용의 변화가 나타나는 면으로서 주변 퇴적환경 혹은 고해양환경의 변화에 직접적인 영향을 받을 것으로 보이기 때문에, 고환경변화 복원에 중요한 인자가 될 것으로 기대된다.

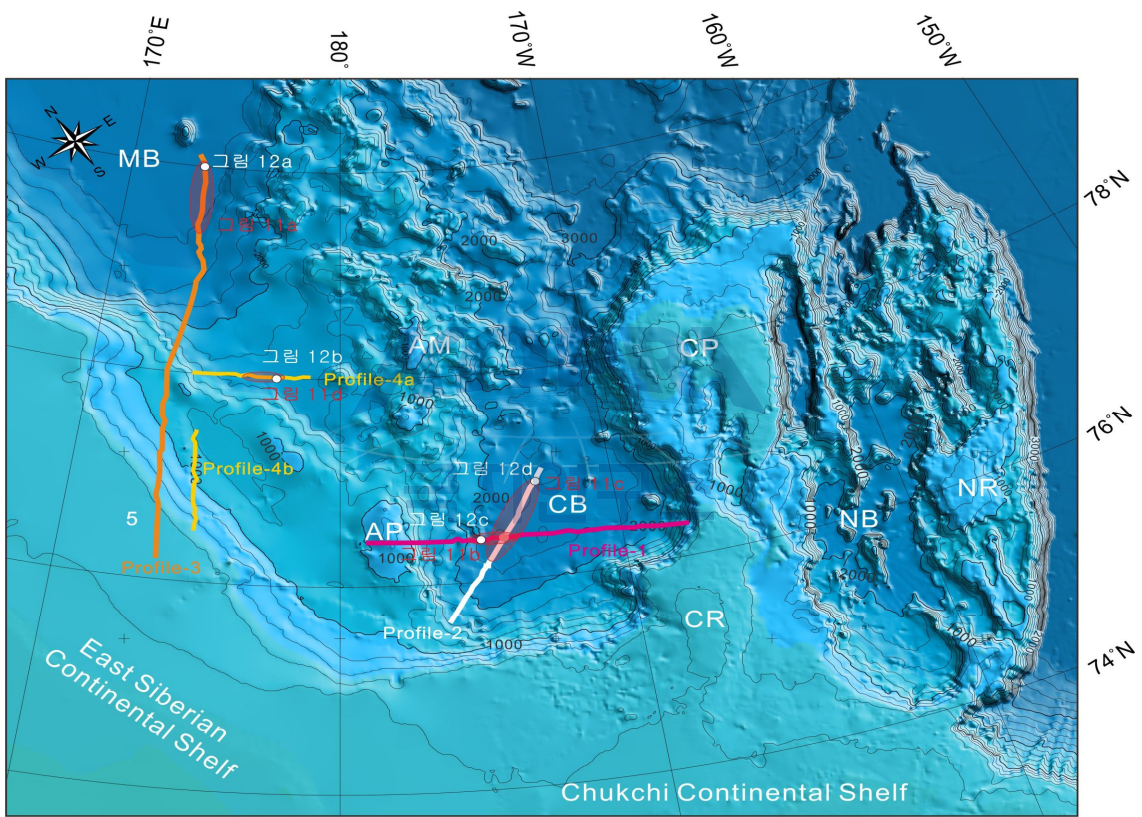


그림 3. 연구지역 지형도와 SBP 자료 트랙라인. SBP 단면-1, -2, -3 및 -4(a, b)자료는 부록에 첨부.

제 2 절 연구 결과

1. 코어퇴적물 분석

이 연구에서 분석된 코어 16BGC(총회수 길이 378cm)는 한2011년 북극탐사 동안에 아라온호의 중력시추기(구경 12cm)를 이용하여 획득되었다. 시추가 이루어진 정점(북위 76°24.5', 서경 175°58.0')은 척치분지 남서쪽 주변부에 위치한 아틀리스 대지(Arlis Plateau)의 사면말단(수심 1,821 m)에 위치한다(그림 2). 주변 해저 지형은 사면부에서 암설류 퇴적체가 수차례 발달되어 있다. 전반적으로 완만한 굴곡을 보이지만, 표면은 지형기복이 거의 없이 매끈하게 나타난다(그림 4). 특히, 코어가 취득된 정점은 경사가 매우 완만하며 거의 평탄한 해저면의 특징을 보인다.

가. 퇴적물 조직 및 조립암편(IRD) 함량

Sedigraph 5000D를 이용한 입도분석 결과에 따르면, 16BGC 코어 퇴적물은 거의 전 구간에서 점토입자가 우세한 세립질 니로 구성되어 있다(그림 5). 평균적으로 점토 약 81.6%, 실트 14.7%, 모래 3.5%의 함량비를 보이며, 자갈 크기의 입자는 특정 층수에 극히 제한적으로 나타난다. 자갈과 모래를 합한 조립입자들은 코어 표층 약 10 cm 구간, 65~110 cm, 280~310 cm 및 340~350 cm 구간에서 평균 이상의 함량분포를 보인다. 분급도는 코어 전구간이 1.2 Φ 이상으로 불량한 분급을 보이며, 자갈과 모래 등 조립입자의 함량이 높은 구간에서는 분급도가 더 불량해지는 경향이 있다.

IRD입자를 대표하는 직경 1 mm 이상의 조립암편은 원마도가 불량하며, 평균 직경은 2~3 mm로 특정 층수에 집중적으로 나타난다(그림 5). 특히 표층 0~8 cm, 62~74 cm, 90~116 cm, 255~281 cm, 305~314 cm, 356~370cm 등 6개의 코어구간에서는 1 cm 당 5개에서 수십 개까지로 분포하며, 그 외의 구간에서는 거의 나타나지 않는다.

나. 퇴적물 색상

코어퇴적물의 색상에 대한 육안관찰에서는 모두 12개의 색상이 인지된다(표 1, 그림 6). 단일 색상의 퇴적층 두께는 3~58 cm로 다양하게 구성된다. 표 1에서 처럼, 갈색 계열(brownish)과 회색 계열(grayish)의 색상은 각각 6개와 4개의 색상으

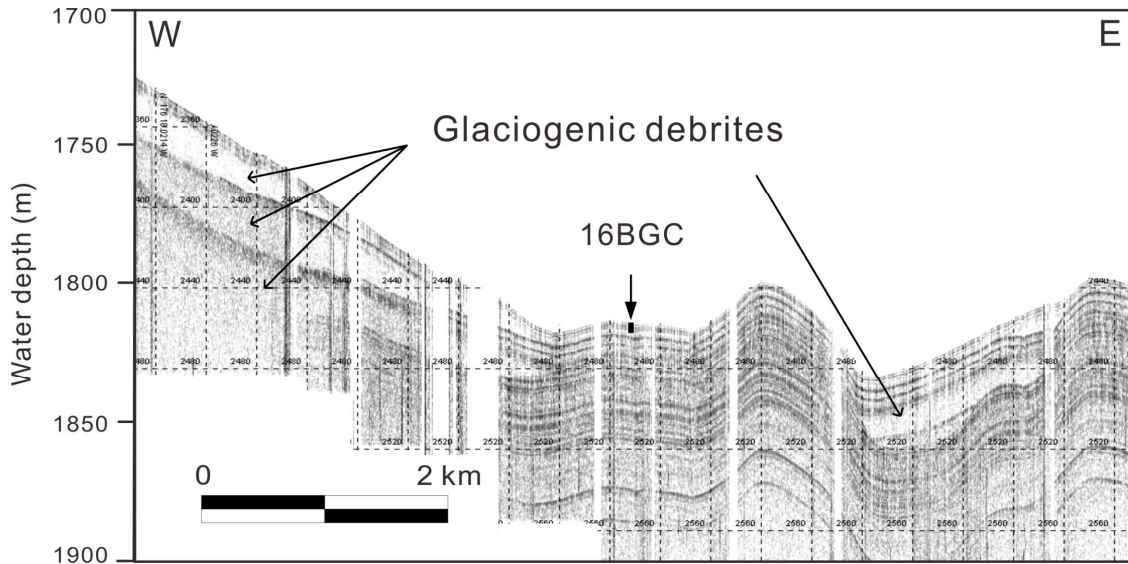


그림 4. 16BGC 정점 주변의 SBP 단면. 정점의 위치를 확인하기 위해서 그림 2를 보시오.

표 1. 16BGC 코어에 대한 색상 정보. 층단위 분류는 퇴적물 색상, 조직, IRD 함량 및 퇴적상을 기준으로 적용. 층단위 V 상부(U), 중부(M) 및 하부(L) 구간은 각각 252~282 cm, 282~302 cm 및 302~319 cm 범위로 구분.

Color tone	Name	Code	Occurrence (units)	ratio (%)	Total (%)
Brownish	Grayish brown	5YR 3/2	III	2.39	35.5
	Moderate brown	5YR 3/4	I, III, V (L), VII	6.63	
	Dark yellowish brown	10YR 4/2	III, V (U)	10.08	
	Moderate yellowish brown	10YR 5/4	III	4.77	
	Moderate olive brown	5Y 4/4	V (U)	1.86	
	Light olive brown	5Y 5/6	V (U, L), VII	9.81	
Grayish	Light olive gray	5Y 5/2	II, V (M), VI	36.34	64.5
	Grayish olive	10Y 4/2	IV, V (M)	17.24	
	Olive gray	5Y 3/2	IV	7.96	
	Dusky yellow green	5GY 5/2	IV	2.92	
Pinkish (spots)	Grayish pink	5R 8/2	V (U)	*	
	Grayish orange pink	5YR 7/2	V (U)	*	

* 분홍색 계열의 색상은 불규칙적으로 산재하는 점-형태로 인지되어 분포 비율에서 제외함.

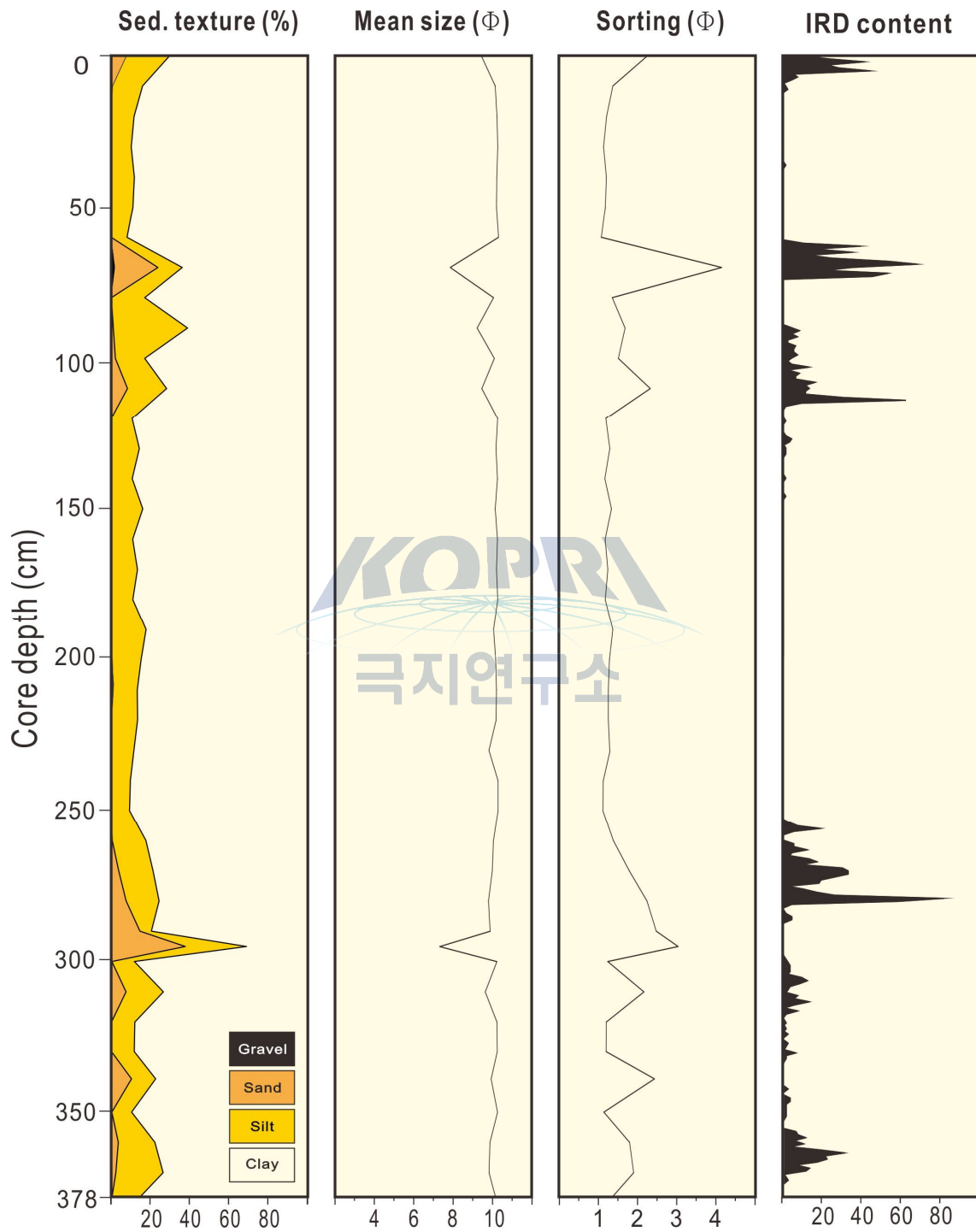


그림 5. 16BGC 코어에 대한 퇴적물 조직과 IRD 함량.

로 구분되며 퇴적층 내에 총 분포비율은 회색 계열의 색상이 상대적으로 우세하게 나타난다. 갈색 계열의 색상은 짙은 황갈색(dark yellowish brown)과 담녹갈색(light olive brown)이 가장 우세하며 분홍색 계열(grayish pink, 5R 8/2; grayish orange pink, 5YR 7/2)의 색상이 갈색 계열의 일부 퇴적층에서 부분적으로 인지된다. 회색 계열의 색상은 담녹회색(light olive gray)이 가장 우세하다.

이러한 육안관찰 색상에 따른 코어퇴적물의 분대는 표색계를 이용한 측정 결과에서도 유사하게 나타난다(그림 6). a^* 값을 이용하여 평균치보다 높은 갈색 구간과 평균치보다 낮은 회색 계열로 색상군을 단순화할 경우, 코어 전 구간은 모두 7개의 색상대(color zone)로 구분할수 있는데, 각 구간의 두께는 5~120 cm의 범위를 보인다. 갈색 계열은 평균적으로 낮은 L^* (37.5)와 높은 a^* (16.9) 값을 보이며 두 수치 값은 심도에 따라서 서로 반대되는 변화양상이 나타난다. 회색 혹은 녹회색 계열은 상대적으로 높은 L^* (39.2)와 낮은 a^* (1.2) 수치 값을 보이지만, 두 수치값의 관계에서는 심도에 따라서 비교적 유사한 변화양상이 나타난다(그림 6).

다. 퇴적상

코어 퇴적물의 퇴적상은 입도분석을 통하여 퇴적물의 조직특성과 X-선 사진에서 관찰되는 층리, 생교란 구조 등 주요 퇴적구조의 특성을 조합하여 다음과 같이 5개의 퇴적상으로 구분하였다(표 2, 그림 7).

(1) 생교란 사질 니(Bsm: bioturbated sandy mud)

① 특징

생교란 사질 니는 16BGC 코어 퇴적물에서 가장 우세하게 나타나는 퇴적상으로서, 뚜렷한 1차 퇴적구조가 나타나지 않고 전반적으로 광범위한 생물 서식구조(burrow)를 포함하고 있다. 생교란 사질 니는 주로 점토 혹은 실트 입자로 구성되며 자갈(pebble)과 모래 크기의 조립암편이 포함되어 있어서 매우 불량한 분급을 보인다. 이 퇴적상의 색상은 대체로 갈색 계열을 이루며, 각 층의 두께는 다양하게 나타난다. 상경계면은 입도와 퇴적물 색깔 변화에 의해 구분되지만 대부분 점이적인 경계부를 이룬다.

② 해석

생교란 구조는 일반적으로 수층이나 대기 중을 통하여 운반되거나 부유되어 있던 육성기원 퇴적물 또는 자생적 퇴적물이 수층을 통해 수직적으로 침전되어 쌓인 반

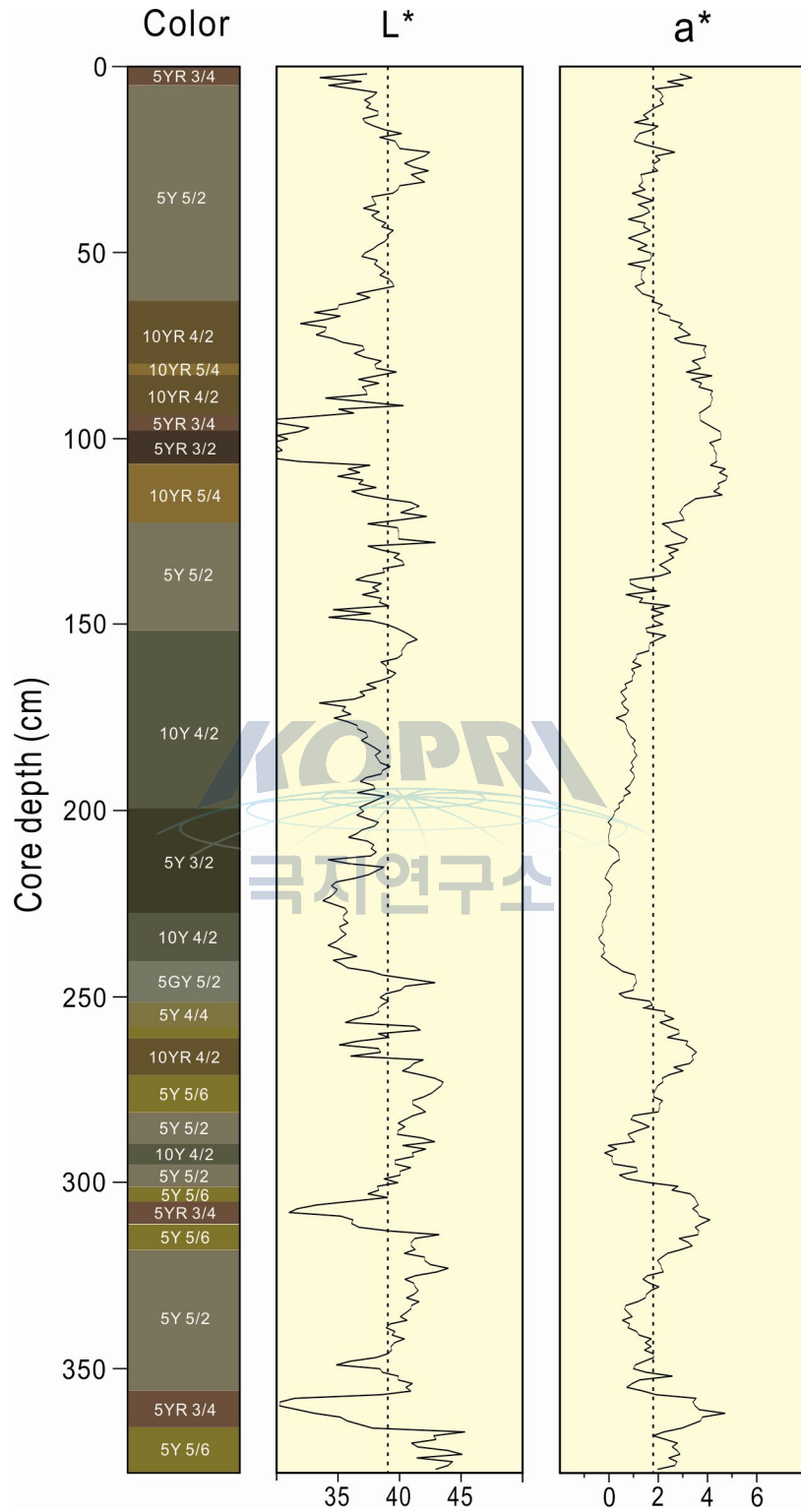


그림 6. 색상기준표와 표색계를 통한 코어퇴적물의 색상정보.

표 2. 16BGC 코어 퇴적물에 대한 퇴적상 요약.

Facies (code)	Description	Depositional process
Bioturbated sandy mud (Bsm)	Generally brownish; pinkish clasts rarely occurred; very poorly sorted; intensely bioturbated; coarse-grained angular clasts randomly scattered in fine matrix without internal organization	Hemipelagic sedimentation affected by floating ice (Stanley and maldonado, 1981; Chough et al. 1984; Polyak et al. 2004; Stein et al. 2010b)
Bioturbated mud (Bm)	Olive and grayish; Poorly sorted mud disturbed by bioturbation; rare or absence of coarse grains; primary structure absent except for diffuse laminae; facies thickness variable; facies boundaries poorly defined and irregular	Hemipelagic sedimentation; weak contour current (Stow and holdbrook, 1984; Matthiessen et al. 2010)
Indistinctly-laminated mud (ILm)	Olive and grayish; poorly sorted mud; indistinct or crudely laminated; no systematic vertical variation in texture and laminae thickness; bioturbation common; facies boundaries generally gradational	Contour current (Stow and Holbrook, 1984; Yoon and Chough, 1993) or meltwater plume (Hesse et al., 1997, 1999) Downslope bottom current with high sediment fallout rate (Stow and holdbrook 1984; Yoon et al., 1991)
Couplet of Thinly-laminated mud/muddy sand and homogeneous mud (TLm/TLs & Hm)	Olive and grayish; couplet of a thin mud (silt-rich)/muddy sand lamina and the overlying homogeneous mud lamina; lower silt-rich (sandy) laminae showing thin parallel lamination, ranging in thickness from a few mm to more than a decimeters; lamination recognized by alternation of thin silt-rich/sandy and clay-rich mud laminae and occasionally normally graded by upward decrease in silt content; sharp and distinct lower boundaries; common bioturbation especially in the upper homogeneous laminae	Fine-grained turbidity current (Piper, 1978; Chough, 1984; Hill, 1984 Yoon et al. 1991)

원양성 퇴적이나 약한 해저류(bottom current)에 의해 형성된 것으로 해석된다(Stanley and Maldonado 1981; Chough et al. 1984; Chough and Hesse 1984). 불규칙적으로 산재하는 조립암편은 간빙기동안 서북극해 표층순환류를 따라 이동하는 빙산의 용빙으로부터 기인한 IRD(Ice-rafted debris)로 해석된다(Darby et al. 2001; Polyak et al. 2004; Matthiessen et al. 2010; Stein et al. 2010b). 심해지에서 이러한 퇴적작용은 간빙기 동안 수층의 순환이 양호하고 영양염류 공급이 풍부한 서식조건을 지시한다(Stein et al. 2010b).

(2) 생교란 니(Bm: bioturbated mud)

① 특징

생교란 니 퇴적상은 생교란 사질 니 퇴적상에 비해 상당히 낮은 빈도로 나타난다. 생교란 니는 IRD와 같은 조립입자가 거의 없이 실트와 점토로 구성되며 보통 내지 불량한 분급을 보인다. 이 퇴적상은 주로 녹회색 계열을 띠며 층리가 일부 인지되기는 하나, 생교란 구조가 지배적이다. 이 퇴적상은 갈색의 Bsm 퇴적상의 상부에 발달되거나 희미한 층리 니(ILm) 퇴적상 내에 부분적으로 인지된다.

② 해석

생교란 구조는 위에서 언급하였듯이, 수층의 원활한 순환과 풍부한 영양염류가 공급되는 서식조건에 우세하게 형성된다. 다만, 생교란 니 퇴적상은 희미한 층리 니 퇴적상 내에 협재하거나 상부에 위치하는데, 이는 원활한 해양순환의 영향보다는 상대적인 해저류의 영향과 퇴적율의 변화를 반영하는 것으로 해석된다(Stow and Holdbrook, 1984; Matthiessen et al. 2010). 따라서, 저서생물의 활동이 억제될 높은 퇴적율과 비교적 강한 해저류의 영향을 받게 된다면 생교란 구조는 드물게 나타나거나 확인되지 않을 것이며, 반대로 약화된 해저류의 영향과 낮은 퇴적율을 보이는 환경에서는 생교란 구조가 우세하게 나타날 것이다.

(3) 희미한 엽층리 니(ILm: indistinctly-laminated mud)

① 특징

희미한 엽층리를 보이는 퇴적상은 두께가 보통 수 십 cm 이하이며 생교란 니에 이어서 두 번째로 우세하게 나타난다. 조직은 세립질로 다른 퇴적상에 비해 상대적으로 분급이 덜 불량한 특성을 보인다. 층리는 대부분 점토질 켜와 실트질 켜가 교호하여 이루어지는데, 경계가 점이적이고 두께가 일정하지 않으며 수직적으로 층리

의 간격이나 두께도 불규칙하게 나타난다. 층리의 형태는 대부분 평탄하고 준평행하게 발달되어 나타난다. 퇴적상 전반에 걸쳐 심하지는 않지만 다양한 생교란 흔적이 관찰되며 회색 내지 녹회색 계열의 색상이 우세하게 관찰된다.

② 해석

일반적으로 불규칙적이고 불연속적이며 뚜렷하지 않은 층리는 퇴적층 내에 광범위하게 하게 퍼져있는 생교란 구조와 함께 나타날 경우 비교적 장기간 동안 지속적으로 작용하는 해저류(bottom current)의 영향 하에 발달될 수 있다(Stow 1979; Chough and Hesse 1984; Stow and Holbrook 1984; Yoon and Chough 1993). 또한, 심해저 저층수에서는 세립질의 뜬짐 퇴적물의 영향으로 혼탁한 수층(nepheloid layer)이 발달될 수 있는데, 이러한 혼탁층이 해저면을 따라 이동하는 과정 중에 세립질 퇴적물을 침전시키며 희미한 층리가 발달된 퇴적층이 형성되기도 한다(Stow and holdbrook 1984; Yoon et al. 1991). 전반적인 생교란에도 불구하고 층리가 보존되는 것은 퇴적물이 반원양성 퇴적상(생교란 니)에 비해 상대적으로 높았던 것으로 추정된다. 아울러 극지역에서는 빙하가 후퇴함에 따라서 빙하말단에서 발생한 혼탁한 용빙수류(turbid meltwater plume)를 통해 운반된 세립질 부유성 입자가 침전되는 경우, 용빙수류 내의 퇴적물 농도와 입도구성에 따라 반복적으로 발달되는 희미한 층리가 형성될 수 있다는 보고도 있다(Hesse et al. 1997, 1999).

(4) 박층리 니/사(TLm/TLs: thinly-laminated mud/muddy sand)

① 특징

박층리 퇴적상에서는 수 mm 이하의 얇은 실트질(또는 사질) 켜와 점토질 켜로 분리되는 비교적 규칙적이고 선명한 평행 박층리가 관찰된다. 생교란은 거의 나타나지 않거나 퇴적상의 상부에 집중되는 경향이 있고, 하부 경계면은 비교적 선명하며, 침식면을 보이기도 한다. 개별 퇴적상의 두께는 5 cm 이하로 비교적 얇으며, 구성 퇴적물은 니 또는 니질 사로서, 여타 퇴적상에 비해 전반적으로 조립입자의 함량이 높다.

② 해석

얇고 규칙적이며 생교란이 미약하며 뚜렷한 층리, 명확한 상 경계면 등은 일반적으로 세립질 퇴적물로 구성된 저탁류 퇴적층에서 일반적으로 보고되고 있는 특징들이다(Piper 1978; Chough 1984; Hill 1984). 심해저의 저탁류는 주로 대륙사면 혹은

은 분지사면에서 유발될 수 있는데, 퇴적물의 급격한 집적에 따른 퇴적체 사면증가, 해수면하강에 따른 공극압의 감소나 폭풍파에 의한 교란 등에 의해 사면퇴적물이 붕괴되면서 저탁류가 발생하거나 또는 슬럼프/슬라이드, 암설류의 형태로 시작된 후 저탁류로 전이될 수도 있다(Yoon et al. 1991; Lee et al. 2002; Ó Cofaigh et al. 2003).

(5) 균질 니(Hm: homogeneous mud)

① 특징

균질 니는 내부 퇴적구조와 생물교란 구조가 거의 관찰되지 않는 퇴적상으로서, X-선 사진 상에서도 비교적 밝고 균질한 명암도를 보이며 퇴적상 경계부는 하부에서는 비교적 뚜렷하지만 상부에서 점이적이거나 불분명하게 나타난다. 두께는 대부분 2~3 cm로 얇게 나타난다. 평균 입도는 $7.0\sim 8.6\phi$ 로 비교적 세립질이며 X-선 사진 상에서도 음영의 차이를 확실하게 보여준다.

② 해석

균질 니 퇴적상은 뜬짐으로 이동되던 세립의 입자들이 저에너지 조건에서 침전되어 형성된 것으로 보인다. 특히, 생물에 의해 교란된 구조가 전반적으로 나타나지 않는 것으로 보아 세립질 저탁류(fine-grained turbidity current)에 의해 고농도 상태로 이동되다가 급격히 퇴적된 것으로 해석된다(Piper 1978; Stow and Shanmugam 1980).

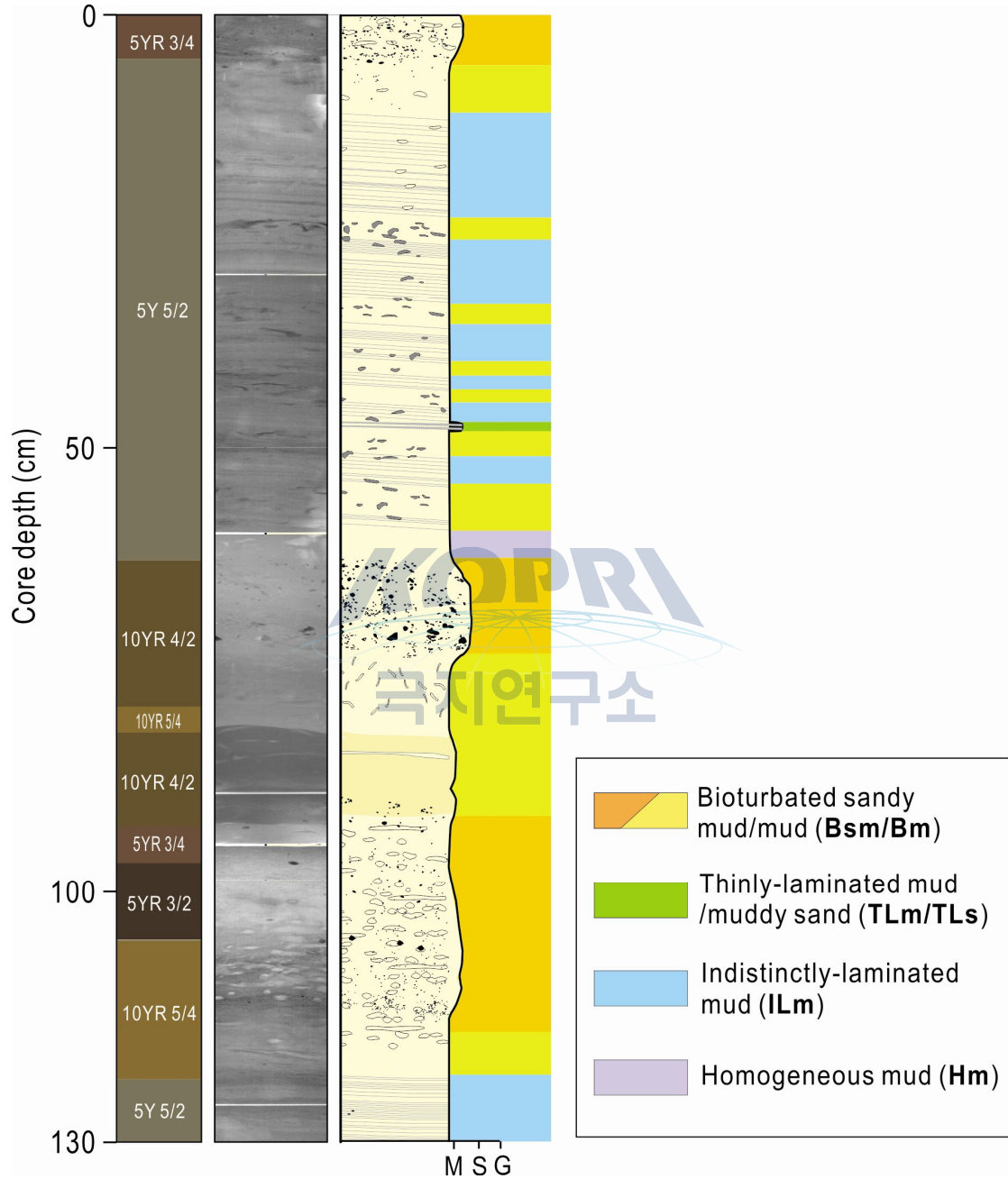


그림 7. 퇴적상이 구분된 주상도와 X-선 사진자료.

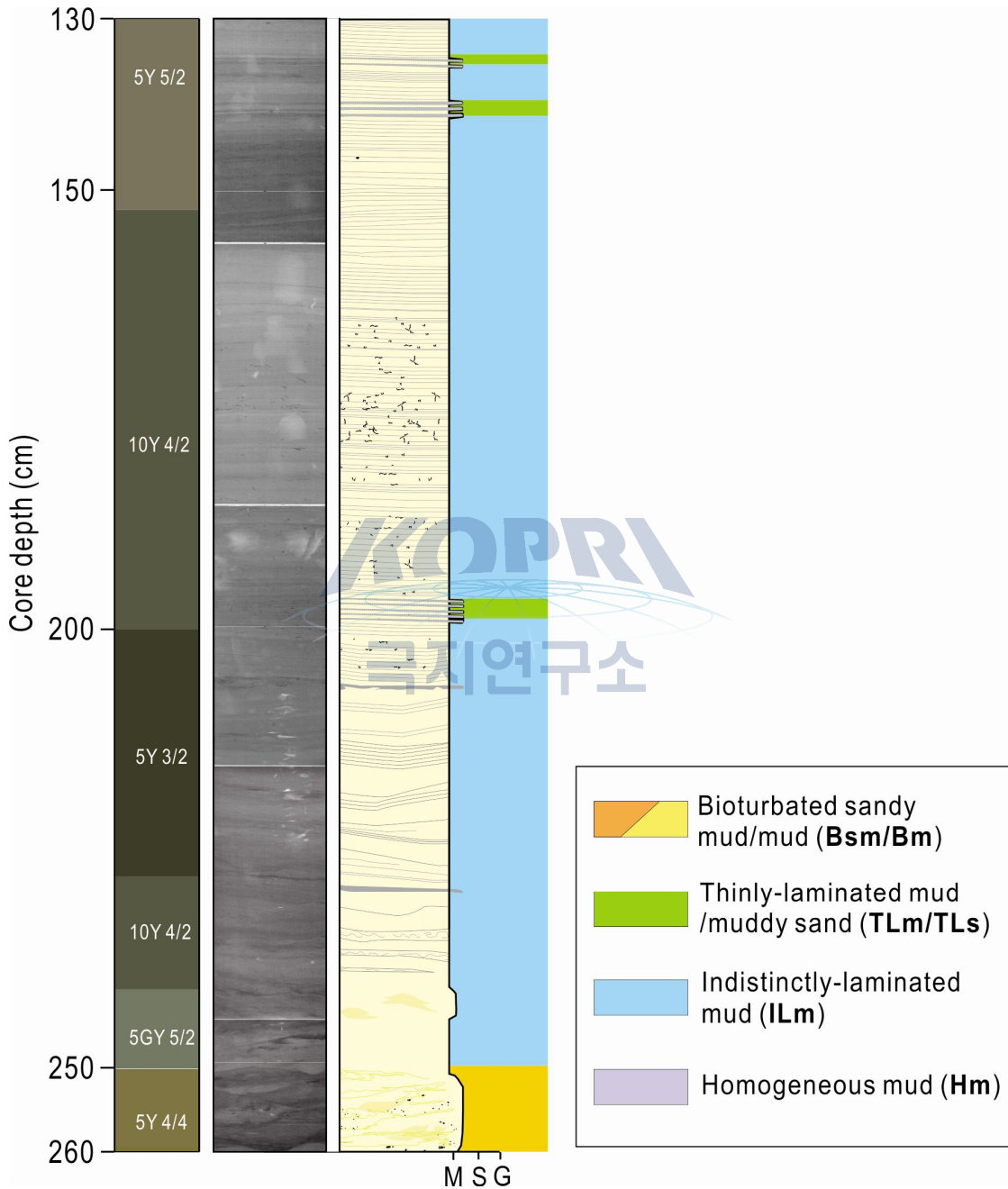


그림 7. 계속.

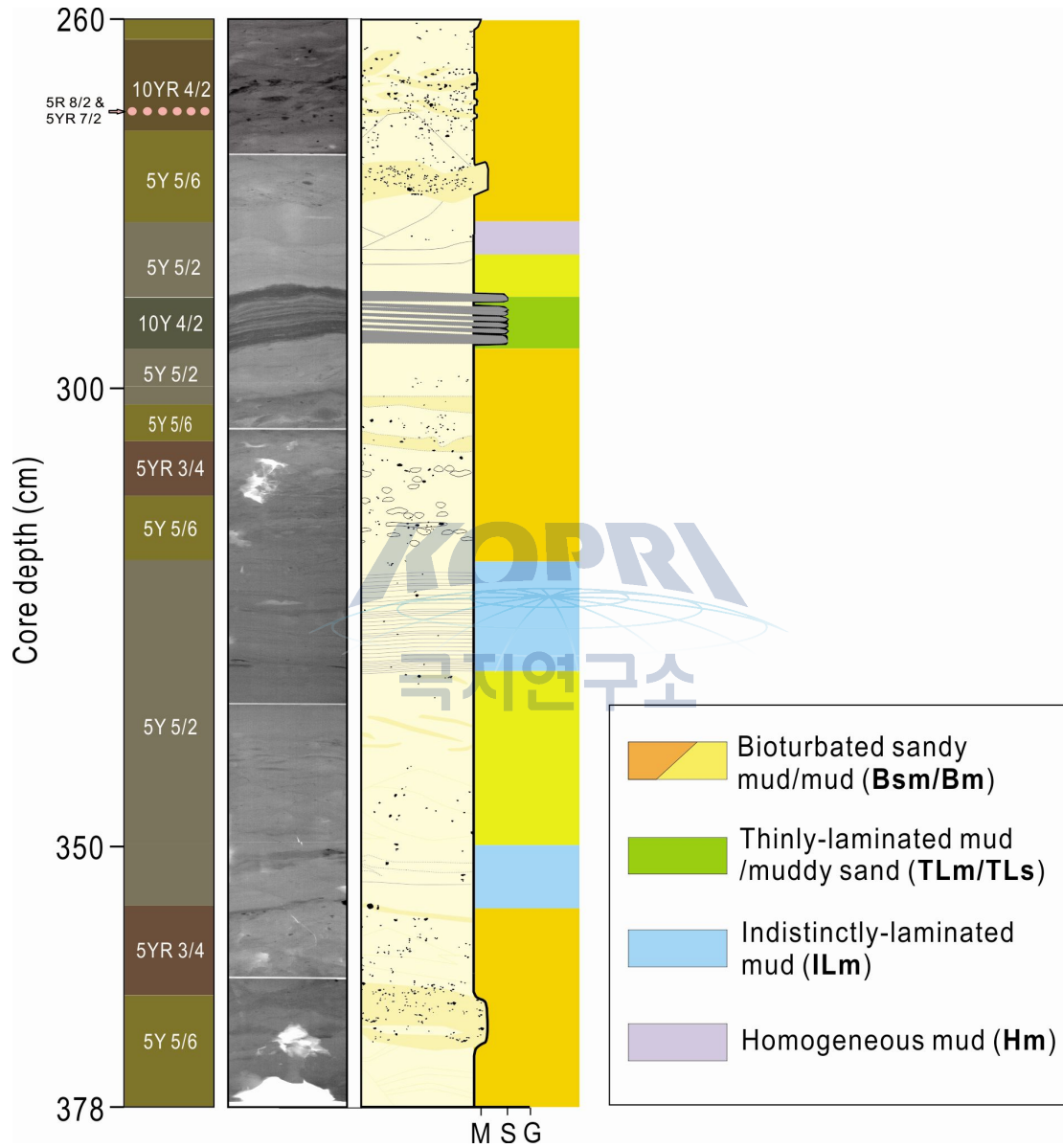


그림 7. 계속.

라. 고해상 층서

시추코어에서 분석된 색상, 조직, IRD함량 및 퇴적상 등의 특징을 종합해보면 378cm의 코어구간은 다음과 같이 7개의 층단위로 구분할 수 있다(그림 8).

(1) Unit I (0~5 cm)

코어 최상부 0~5 cm 구간은 갈색(moderate brown: 5YR 3/4)의 색상을 띤다. 평균 입도는 8.9 Φ 로 점토가 우세한 니질 퇴적물이나 모래와 실트의 함량이 타 구간에 비해 비교적 높다. 평균적인 분급도는 2.25 Φ 로 매우 불량한 분급을 보인다. 층단위 I은 IRD로 해석된 조립암편들이 산재하는 Bsm 퇴적상으로 구성된다. 생교란 구조의 크기는 1~6 mm로 다양한 두께와 길이를 보여주며 뚜렷한 방향성없이 무작위로 발달되어 나타나 얼룩덜룩한(mottled) 형태를 보여준다. 특히, 이 구간에서는 2~3 mm의 비교적 세립하고 다소 원마도가 불량한 암편들이 불규칙적으로 분포(1 cm 당 평균 30개 정도)하고 있어 분급도가 불량하게 나타난다.

(2) Unit II (5~63 cm)

이 층단위는 전반적으로 담녹회색(light olive gray: 5Y 5/2)의 회색계열 색상으로 구성되며 부분적으로 주황색과 짙은 올리브 색상이 띠를 이룬다. 구성 퇴적물의 평균 입도는 9.8 Φ 로 소량의 실트와 점토가 우세한 니질 퇴적물이며 분급도의 경우에는 평균 1.1 Φ 로 불량한 분급을 보인다. 전체적으로 층단위 II는 조립질 암편(IRD)이 없는 IIm 퇴적상이 가장 우세하며 Bm 퇴적상이 부분적으로 협재되어 나타난다. 각 엽층들은 준 평행하고 비교적 평탄하게 발달되어 있으며 층의 경계가 희미하다. Bm 퇴적상은 주로 수평적으로 발달된 생물서식구조(burrow)에 의해 교란되어 있으며 생교란이 집중된 구간에 한해서 다소 주황색을 띠기도 한다. 코어 심도 48 cm 부근에는 IIm과 Bm 퇴적상 사이에 대략 2 cm 두께로 TIm 퇴적상이 협재하기도 한다. 이 퇴적상은 약 1 mm의 층후와 비교적 뚜렷한 경계를 보이는데 Hm 퇴적상과 쌍을 이루어 반복되는 양상을 보인다. 단일 퇴적상으로서 Hm 퇴적상이 나타나는 경우는 층단위 II의 최하부 약 3 cm 구간에서만 제한적으로 인지된다.

(3) Unit III (63~123cm)

층단위 III의 퇴적물 색상은 대체로 갈색계열이 우세하게 나타나는데, 대략 심도 63 cm에서 심도 83 cm 구간까지는 짙은 황갈색(dark yellowish brown: 10YR4/2)이 하부로 가면서 점진적으로 밝아지며, 그 하부(약 심도 94 cm까지)는 비교적 선

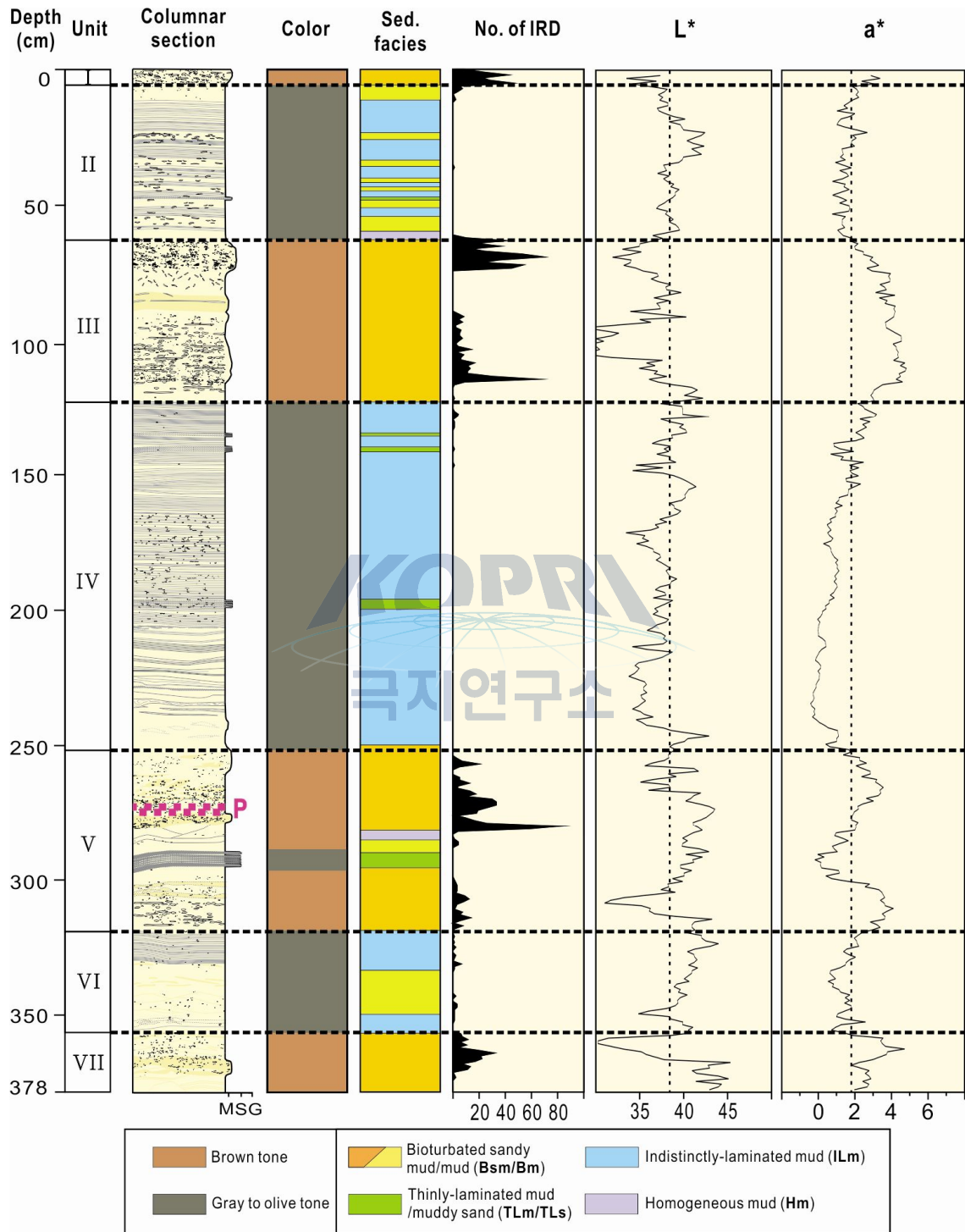


그림 8. 16BGC 코어 퇴적물에 대한 층단위 구분.

명한 경계와 함께 다시 짙은 황갈색을 띤다. 심도 94 cm 이하로는 갈색(moderate brown)과 회갈색(grayish brown: 5YR3/2)의 색상이 순차적으로 나타나며, 107~123 cm 구간은 황갈색(moderate yellowish brown: 10YR 5/4)색의 기질에 회갈색(grayish brown)의 색상이 산재하여 나타난다. 층단위 III을 구성하는 퇴적물은 8.7 Φ 의 평균 입도와 불량 내지 매우 불량한 분급도(1.1~4.1 Φ)를 보이는데, 점토가 우세한 니질 퇴적물과 함께 모래와 자갈이 최대 20% 이상 포함되어 나타난다. IRD 입자는 80~93 cm 구간을 제외한 대부분의 구간에서 최대 8 mm 크기로 나타나는데, 상부구간에서는 1 cm 당 평균 30~40개 가량 분포하며, 하부구간에서는 비교적 적은 양의 IRD가 산출된다. 다만, 심도 114 cm 부근에서는 세립질 IRD 입자 30~60개가 집중적으로 나타난다. 층단위 III을 구성하는 퇴적상은 층단위 I과 같이 Bsm 퇴적상이 전 구간에 걸쳐 우세하게 나타난다. 특히 73~80 cm 구간과 93~116 cm 구간에서 생교란이 집중되는 특징을 보인다. 생교란 구조는 주로 저서 생물의 서식구조(burrow)에 의한 것인데, 육안으로 판별 가능한 것들은 대부분 5 mm 이하의 두께를 갖는 수평 튜브형이 우세하다.

(4) Unit IV (123~252 cm)

층단위 IV의 색상은 전반적으로 회색 내지 올리브색 계열이 우세한데, 123~239 cm 구간에서는 녹회색(olive gray: 5Y 3/2)과 회녹색(grayish olive: 10Y 4/2)이 교호하며, 최하부 239~252cm 구간에서만 황녹색(dusky yellow green: 5GY5/2)이 협재한다. 한 색상에서 다른 색상의 변화는 대체로 점이적으로 나타난다. 층단위 IV를 구성하는 퇴적물은 평균 입도가 9.7 Φ 내외인 점토가 풍부한 니질 퇴적물로서 층단위 내에서의 입도변화는 그다지 크지 않다. 분급도는 비교적 낮은 모래와 실트 함량으로 인하여 상부 층단위 III에 비해 상대적으로 양호한 편이다. 이 층단위에서 IRD는 거의 관찰되지 않는다. 층단위 IV 또한 층단위 II와 유사하게 주로 ILm 퇴적상으로 구성되지만, 층리가 없는 Bm 퇴적상은 거의 인지되지 않는다. TLm 퇴적상은 1~4 cm 두께로 희미한 층리나 퇴적상 사이에 세 번에 걸쳐 협재되어 나타나는데, 구조적 특징은 층단위 II의 퇴적상과 유사하나 일부는 2~3 mm의 층후를 보이기도 한다. 특히 층후가 비교적 두껍게 나타나는 박층리 니는 선명한 하부 경계를 보이며, 상부 경계는 점이적이거나 생물서식구조에 의해 교란되어 나타난다.

(5) Unit V (252~319 cm)

층단위 V에서는 주로 녹갈색(light to moderate olive brown: 5Y 5/6~5Y 4/4),

황갈색, 갈색 등 갈색계열 색상이 우세하며 점이적인 색상 변화를 보인다. 다만, 약 270 cm 구간에서는 갈색계열의 퇴적구간 내에 분홍색 계열(grayish pink: 5R 8/2; grayish orange pink: 5YR 7/2)의 쇄설성 입자들이 부분적으로 관찰되며 289~296 cm 구간의 박층리 니에서 녹회색(olive gray)과 회녹색(grayish olive)이 교호하며 나타난다. 층단위 V는 9.4 Φ 의 평균입도를 보이는 소량의 모래와 실트 함량이 비교적 높은 니질 퇴적물로 구성되며 분급은 1.7~2.4 Φ 로 불량 내지 매우 불량하다. 예외적으로 TLs 퇴적상이 협재된 구간에서는 모래와 실트함량이 65%가 넘는 사질 니로 구성되며 분급 또한 매우 불량하게 나타난다. 이 층단위는 퇴적상과 색상을 기준으로 상부(252~282 cm), 중부(282~302 cm) 및 하부(302~319 cm)로 구분이 가능하다. 층단위 V의 상부와 하부는 Bsm 퇴적상이 매우 우세하다. 두 구간은 주로 녹갈색(olive brown), 황갈색(yellowish brown) 등의 갈색 계열을 띠며 생물 서식구조(burrow)와 IRD가 집중되는 양상을 보인다. 층단위 V 중부의 기저에는 담녹색의 단일 Bm 퇴적상이 분포하며, 그 상부에는 약 1~2 mm 간격의 사질 켜와 니질 켜가 서로 교호하는 TLs와 Hm 퇴적상이 회녹색을 띤다. TLs와 Hm 퇴적상의 상부에서는 담녹회색(light olive gray)의 단일 Bm 퇴적상과 Hm 퇴적상이 순차적으로 수 cm의 두께로 발달되어 있다.

(6) Unit VI (319~357 cm) 극지연구소

층단위 VI에서는 담녹회색(light olive gray)이 전 구간에 걸쳐 우세하게 나타난다. 이 구간에 대표적인 퇴적상은 IIm과 Bm 퇴적상으로서 산출 비중은 비슷하다. IIm 퇴적상 구간은 9.9 Φ 의 평균입도와 1.2 Φ 의 불량한 분급을 보이는 점토가 우세한 니질 퇴적물로 구성되며 타 구간의 IIm 퇴적상에 비해 층리가 더욱 희미하며 생교란도가 높게 나타난다. Bm 퇴적상은 10% 이상의 모래 함량을 보이는 구간 일부 인지되지만, 대체로 세립질 퇴적물로 구성된다. 아울러 1 mm 정도 크기의 IRD 입자가 매우 드물게 나타나기도 한다.

(7) Unit VII (357~378 cm)

최하부 층단위 VII은 366 cm 심도를 기준으로 상부구간은 갈색(moderate brown)의 색상을 띠며 하부로 가면서 담녹갈색(light olive brown)의 색상으로 점진적인 변화를 보인다. 이 구간의 평균입도는 9.4~9.8 Φ 로 측정되며 점토 내지 사질 니로 구성된다. 사질 니의 경우에는 대부분 점토로 구성되지만, 직경 2 mm의 조립암편(IRD)의 함량에 따라서 퇴적물 유형에 영향을 준 것으로 생각된다. 분급도

또한 1.2~1.9 Φ 로 불량한 편이며 IRD의 함량의 증가와 함께 더욱 불량해진다. 이 구간의 퇴적 구조는 뚜렷한 층리는 발달되지 않고 대부분 다양한 크기와 형태를 갖는 생물서식구조에 의해 교란(Bsm)되어 있다. 특히, 갈색(moderate brown)의 색상을 띠는 상부 구간이 심하게 교란되며 하부로 갈수록 교란도가 감소하는 양상을 보인다. 조립암편(IRD)의 분포 양상은 357~373 cm 구간에서 2 mm 직경의 세립질 입자가 1 cm 간격으로 평균 10~20개 가량 분포하며 대략 2 cm의 직경을 갖는 조립질 입자도 일부 나타난다.

마. 층서 해석

중기 및 후기 플라이스토세 동안 서북극해에 집적된 해양퇴적층은 간빙기와 빙하기의 기후조건에 따라 그 특성이 다르게 나타나는 것으로 보고되고 있다(Phillips and Grantz 1997; Jakobsson et al. 2000; Polyak et al. 2004; Wang et al. 2010; Matthiessen et al. 2010; Stein et al. 2010b). 간빙기와 해빙기 후기에는 전반적으로 풍부한 망간과 유공충 함량 및 낮은 명도 등의 특징을 보이는 갈색의 퇴적층(brown layer, B)이 집적되며 암상 표식지층(lithological marker beds)으로 알려진 분홍 및 흰색의 다이아미톤(diamicton)이 부분적으로 발달된다. 반면, 빙하기에는 드문 미세화석(microfossils)과 세립질 퇴적물로 구성된 비교적 밝은 명도(회색, 밝은 갈색, 노란색 등)의 퇴적층이 집적된다. 따라서 서북극해에 집적된 해양퇴적층은 이러한 특징들이 기후조건의 변화에 따라서 반복적으로 나타난다.

Stein et al. (2010b)은 중앙북극해(Central Arctic Ocean)의 동시기적인 기후변화 양상을 이해하기 위한 목적으로 간빙기에 발달되는 갈색 층과 분홍 및 흰색의 다이아미톤 층에 대한 모델을 제안하였다. 이 모델은 현재(간빙기)를 시작으로 과거에 반복적으로 나타나는 갈색 층에 순차적으로 번호를 첨(B1, B2 등)하고 뚜렷하게 구분되는 분홍 및 흰색의 다이아미톤 층에 번호를 붙여 타 퇴적물 코어들과 비교함으로써 코어대비에 사용된다. 16BGC 코어 퇴적물의 갈색 계열 층단위 I, III, V의 상·하부 및 VII은 자갈 및 모래 크기의 IRD 함량이 높게 산출되며, 낮은 명도와 높은 a^* 값 및 생교란 구조가 집중되는 양상을 보인다(그림 5). 이러한 층단위 내에는 비교적 어두운 명도를 보이는 갈색 층이 발달되어 있으며 Stein et al. (2010)의 모델을 적용할 경우, 각 층단위는 B1~5까지를 포함한다. 16B 정점의 주변지역에서 획득된 PS72/340-5(수심 2349 m) 퇴적물 코어(그림 2)에서도 간빙기와 해빙기 후기로 해석된 갈색 층과 그 주변구간에 이와 유사한 색상과 암상의 특징들이 관찰됨으로써 층단위 I, III, V의 상·하부 및 VII와 대비된다(그림 9). 또한,

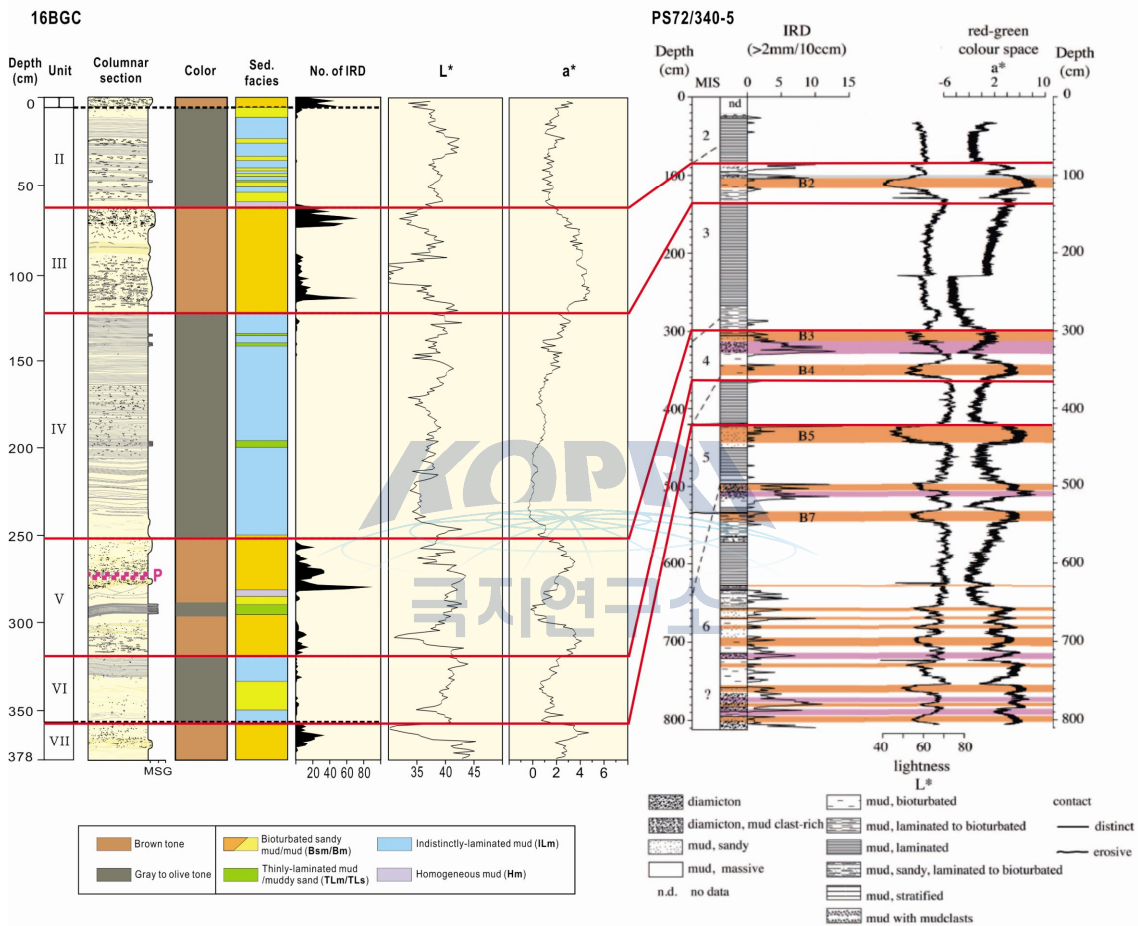


그림 9. 16BGC와 PS72/340-5 퇴적물 코어 간에 대비.

층단위 V 상부를 구성하는 갈색 층의 하부에는 분홍색의 쇠설성 입자가 부분적으로 관찰되는데 이는 캐나다 및 북미 기원의 탄산염 쇠설물이 풍부한 암상 표식지층으로서 PS72/340-5 코어의 B3 하부에 나타나는 분홍색 층 일치한다(그림 9). 빙하기와 해빙기를 지시하는 PS72/340-5 퇴적물 코어의 엽층리가 발달된 회색 또는 녹회색 퇴적층은 16BGC 퇴적물 코어의 층단위 II, IV, V의 중부 및 VI에 발달된 박층리 니/사(TLm/TLs)와 희미한 엽층리 니(ILm) 퇴적상의 분포와 유사함을 보여 준다.

결론적으로, 간빙기를 지시하는 갈색 층, IRD 함량, 색상 및 퇴적상(또는 암상) 변화에 따른 16BGC와 PS72/340-5 퇴적물 코어의 대비에 근거하여, 16BGC 퇴적물 코어에서 갈색 계열의 층단위 I, III, V의 상·하부 및 VII는 해빙기 후기를 포함한 간빙기 퇴적층으로서, 회색 계열의 층단위 II, IV, V의 중부 및 VI는 빙하기를 포함한 해빙기 퇴적층으로서 해석된다. 좀더 자세히 보면, 층단위 I은 MIS 1과, 층단위 II와 III은 MIS 3, 층단위 V는 MIS 4, 층단위 VI와 VII는 MIS 5와 대비되는 것으로 보인다(그림 9). 아울러 향후 정확한 연대에 대한 추가확인이 필요하지만, 잠정적으로 16BGC 최하부 퇴적물은 MIS 5(약 7~13만년전)에 해당하는 연대를 갖는 것으로 해석된다.

바. 퇴적상 모델

코어 퇴적물의 층서와 퇴적상 분석결과를 종합하여, 척치해저분지에서는 빙하기에서 간빙기로 해양환경이 변화함에 따라 집적되는 퇴적물의 특성이 함께 변화하며, 이를 요약하여 그림 10과 같은 퇴적상 모델을 제시할 수 있다. 즉, 간빙기 동안에는 갈색 계열의 색상을 띠며 자갈(pebble)과 모래 크기의 IRD가 산재하는 Bsm 퇴적상이 집적된다. 간빙기 퇴적층 하부는 빙하기와 해빙기에 발달된 ILm 퇴적상이 Bm 퇴적상으로 전이되고 최종적으로 IRD가 산재하는 Bsm 퇴적상이 집적되어 점이적인 하부 경계를 보인다. 빙하기와 해빙기에는 IRD 없이 회색 내지 올리브색을 띠는 퇴적층이 발달되는데, 전반적으로 ILm 퇴적상이 지배적이며 TLm/TLs, Hm 및 Bm 퇴적상이 부분적으로 협제한다. 간빙기에서 빙하기로의 전이기간에는 저탁류에 의해 발달되는 TLs 퇴적상에 의해 뚜렷한 하부 경계를 보이기도 하지만, 전반적으로 생물교란의 영향을 받은 ILm 또는 Bm 퇴적상의 발달로 인하여 점이적인 경계를 보인다.

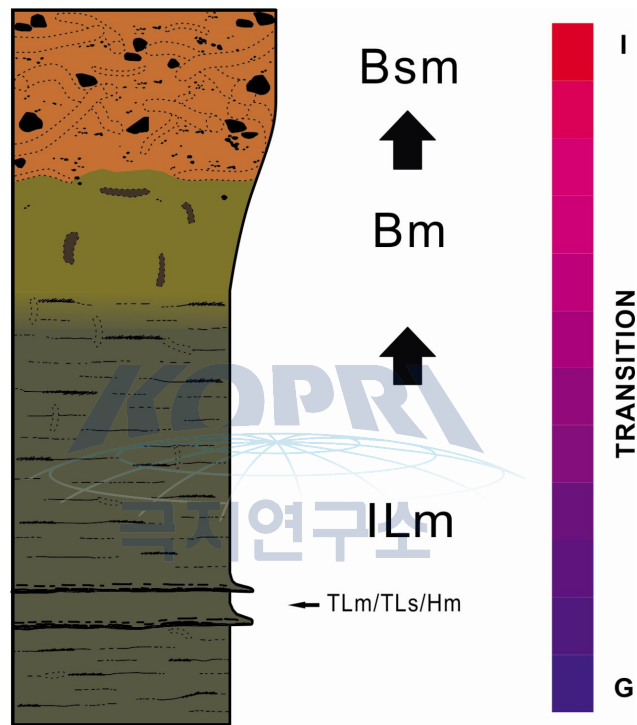


그림 10. 빙하기-간빙기 전이기간을 지시하는 심해저 퇴적물(척치 분지)에 대한 퇴적상 모델.

간빙기에서 빙하기로 전이되는 기간 동안, Bm과 IIm 퇴적상 분포에 의한 점이적인 하부 경계부는 생물교란 없이 엽층리가 발달된 암상(F1)에 의한 선명한 하부 경계부를 보이는 PS72/340-5 코어 퇴적물과 차이를 보인다(Matthiessen et al. 2010). PS72/340-5 코어 퇴적물과 달리, 16BGC 코어 퇴적물의 점이적이며 생물교란된 하부 경계부의 발달은 비교적 얇은 수심에 위치하는 해저(16B 정점)에서 저서생물의 활동이 더욱 강하게 작용했던 것으로 추정된다(Polyak et al. 2004; Matthiessen et al. 2010).

빙하기와 해빙기동안 발달되는 층단위에서 전반적으로 빙산 퇴적작용을 지시하는 IRD가 분포하지 않는다는 것은 해빙의 발달로 인하여 표층순환류가 약화되어 빙산의 유동이 억제되었음을 지시한다. 특히, 지배적인 IIm 퇴적상의 발달은 이 지역이 장기간에 걸쳐 지속적으로 작용하는 해저류(bottom current)와 계절적 혹은 장주기적인 해빙의 융빙과 재결빙으로 세립질 퇴적물이 공급되는 환경이 우세했던 것으로 해석된다(Stow 1979; Chough and Hesse 1984; Stow and Holbrook 1984; Yoon and Chough 1993; Matthiessen et al. 2010). IIm 퇴적상이 발달된 퇴적구간에는 Bm 퇴적상이 부분적으로 협재하는데, Bm 퇴적상의 부분적인 분포 양상은 원활한 해양 순환과 산화환경의 영향 보다 빙하기와 해빙기 동안 반복되는 해빙의 융빙과 재결빙에 따른 퇴적물의 변화를 반영할 것이다. 따라서 상대적으로 퇴적물이 낮았던 환경에서는 비교적 강한 저서생물의 활동으로 인하여 IIm 퇴적상이 Bm 퇴적상으로 전이된 것으로 추정된다.

또한, 간헐적으로 발달된 TLm/TLs와 Hm 퇴적상의 교호는 멘델리프 해령 남동부 지역이 빙하기와 해빙기 동안 저탁류의 영향을 받았음을 지시한다(Piper 1978; Chough 1984; Hill 1984). 심해저 저탁류는 일반적으로 고위도 지역에서 대륙빙하와 빙붕의 확장에 의해 대륙붕단 혹은 상부 대륙사면으로 퇴적물이 다량 공급되어 발생하는 것으로 알려져 있다. 비록 SBP 자료에서 코어정점의 상부 사면에 발달된 암설류 퇴적체가 저탁류로 전이되었는지는 확인되지 못하지만(그림 4), 암설류 퇴적체의 외해 구간에도 환경사의 하부사면이 발달하기 때문에 저탁류로 전이되었을 가능성이 충분히 있다고 할 수 있다.

해빙기에서 간빙기로 전이되는 기간 동안, IIm-Bm-Bsm 퇴적상 변화는 일차 퇴적구조가 보존되지 않을 정도로 집중된 생교란에 기인하는 것으로 해석된다. 특히, 간빙기에 발달된 Bsm 퇴적상에서 특징적인 다량의 IRD 집적은 해빙의 감소에 따라 서북극해 표층순환류(Beaufort Gyre)가 원활해짐으로써 서북극해 주변부 기원의 빙산이 원활하게 유동하였음을 지시한다(Darby et al. 2001; Polyak et al.

2004; Matthiessen et al. 2010; Stein et al. 2010b). 특히, 갈색 계열의 간빙기 퇴적층은 강화된 용빙수와 강류 등의 유입에 의한 시베리아 기원의 망간산화물 함량 증가와 연관성을 보이는 것으로 알려져 있다(Jakobsson et al. 2000; Polyak et al. 2004; Adler et al. 2009; März et al 2011). 따라서, 해빙기에서 간빙기로 전이되는 동안 집중되는 생교란의 영향은 해빙이 감소함에 따라 해저로의 보다 많은 영양염류 공급과 원활한 수층의 순환이 이루어졌음을 지시한다(Chough et al. 1984; Chough and Hesse 1984; Stein et al. 2010b).



2. SBP 자료 고해상 층서분석

2011년과 2012년에 획득된 척치 해저분지(Chukchi Basin) 및 인근 마카로프해저분지(Makarov Basin)에서 취득된 고해상도 탄성과자료(high resolution sub-bottom profile, SBP)를 이용하여 지층구간 반사상(reflection configuration)의 경계를 이루는 비교적 뚜렷한 4개의 건층면(R1, R2, R3, R4)을 구분하였다(그림 11). 아울러, 이들 건층면을 경계로 하는 5개의 층단위(SU1, SU2, SU3, SU4, SU5)로 구성된 층서체계를 설정하였다(그림 12). 각각의 층단위들은 서로 다른 음향학적 특징들을 보이며, 분지와 분지 주변에 걸쳐 비교적 양호하게 대비된다.

가. 척치해저분지 평원

척치분지는 남쪽으로 척치대륙붕-대륙사면, 동쪽으로는 척치대지(Chukchi Plateau), 서쪽과 북쪽은 알파-멘델레프 해령시스템(Alpha-Mendelev Ridge System)으로 둘러싸인 해저분지로서, 최대 수심은 2,300m 내외이며, 동서방향 길이가 약 240km, 남북방향으로는 약 270km에 달한다. 척치해저분지의 심해저평원은 수심 2,200~2,300m의 평탄하고 매끈한 해저면을 보이며 중앙부에 낙차 약 50m의 단사구조 발달한다.

최상부의 탄성과 층단위 SU1은 분지 중심부에서 약 12m 내외의 비교적 일정한 두께를 가지며, 분지 주변 사면쪽으로 가면서 두께가 다소 감소하는 경향을 보인다. 이 층단위 내에는 탄성과적으로 평탄하고 평행한 층리가 수평연장성이 양호한 상태로 뚜렷하게 발달하는데, 내부에 2개의 고진폭의 강한 반사면(R1a, R1b)이 구분되며 분지 전 지역에 걸쳐 대비가 가능할 정도로 매우 양호한 수평연장성을 보인다. 이들 강한 반사면 사이의 구간은 비교적 약한 진폭과 분산된(fuzzy) 반사 특성을 보이며, 수평연장성도 매우 불량하게 나타난다. 척치분지에서 취득된 16BGC 코어는 회수길이가 3.8m로서 탄성과 층단위 SU1의 최상부에 대비된다(그림 2).

SU1과 SU2 사이의 경계(R1)는 다소 분산되어 두껍지만 매우 강한 반사면으로서 분지 서부지역에서는 비교적 양호한 수평연장성을 보이지만, 동부로 가면서 반사강도가 약해지고 연장성이 감소하는 경향을 보인다. 탄성과 층단위 SU2의 두께는 30~40m 범위이며, 전반적인 반사면의 배열 양상(평탄, 평행)은 상부 지층에서와 유사하지만, 반사강도는 상부구간과 하부구간에서 서로 다르게 나타난다. 즉, 층단위 상부구간은 SU1에서보다도 더 강한 반사면의 특성을 보이는 반면, 하부구간에서는 반사강도가 약화되어 저진폭의 반사면이 우세하고 수평연장성이 상부구간에 비해

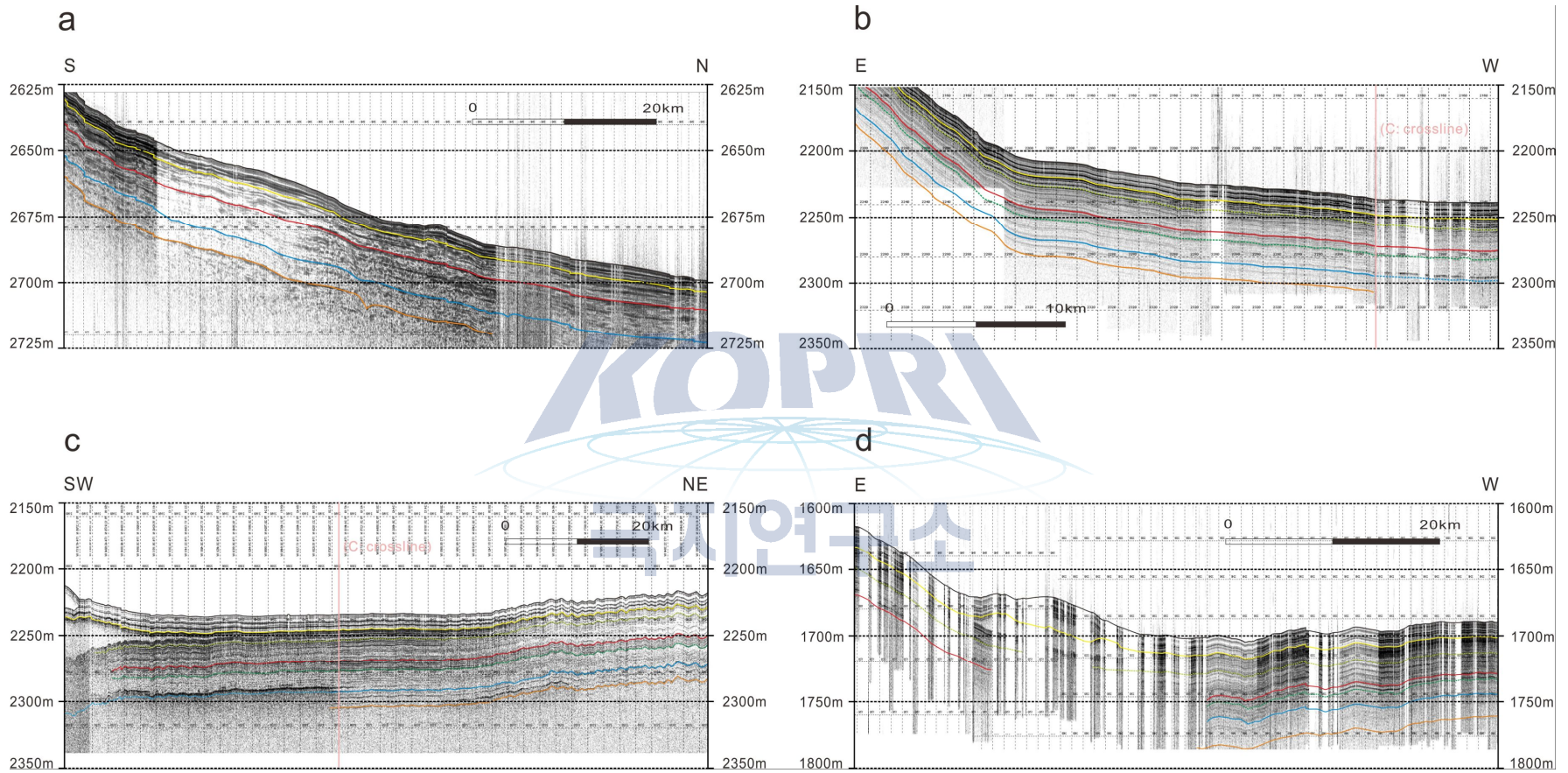


그림 11. 동시베리아 주변부에 인접한 심해저 분지의 건층면 구분: 노란색, 적색, 청색 및 주황색은 각각 건층면 R1, R2, R3 및 R4를 지시함. 각 구간에 대한 위치를 확인하기 위해서 그림 3를 보시오.

전반적으로 불량하게 나타난다. 분지의 남쪽 사면과 인접해서는 탄성파적으로 투명한 반사상을 갖는 암설류 퇴적체가 SU2의 상부경계면(R1) 직하부에서 나타난다. 암설류 퇴적체의 두께는 최대 약 50m이며 탄성파단면에서 인지되는 폭은 30km 이상으로 당시 대규모 해저사태에 의해 유발된 암설류에 의해 집적된 것으로 추정된다.

고진폭의 강한 반사면 R2와 R3 사이의 탄성파 층단위 SU3는 30m 내외로 비교적 일정한 두께로 분지 전반에 걸쳐 나타난다. 탄성파적 반사형태는 대체로 상부 층단위와 유사하게 평탄하고 평행한 다수의 반사면들의 교호를 특징으로 하지만, 반사면들의 전반적인 반사강도는 상위의 층단위에 비해 약하게 나타난다. 또한 SU2와 유사하게 강한 반사특성을 보이는 상부구간(두께 10m 내외)과 상대적으로 작은 진폭과 불량한 수평연장성을 갖는 반사면들로 구성된 하부구간으로 구분되며, 분지 동부지역으로 갈수록 반사강도가 전반적으로 감소하는 경향을 보인다.

탄성파 층단위 SU4는 분지 전반에 걸쳐 20m 내외의 비교적 일정한 두께를 보이며, 중간 정도의 반사강도와 수평연장성을 갖는 2-3개의 내부 반사면들로 구성되어 있다. 특히 분지의 중심부에서는 층단위 전체 구간이 탄성파적으로 균질 혹은 투명하게 나타나는데, 경계부의 형태가 거의 수직에 가까워서 암설류 퇴적체와는 다른 양상을 보인다. 이와 같은 특성은 지층 내에 포함된 가스 혹은 기타 유체물질로 인해 탄성파 신호가 변형된 결과로 추정된다.

최하부의 탄성파 층단위인 SU5는 내부에 구분되어지는 반사면이 나타나지 않은 음향기저(acoustic basement)에 해당된다. 일반적으로 음향기저는 고기의 고화된 암반층으로 해석되는 경우가 많지만, 척치분지의 경우 층단위 상부경계면인 R4가 해저면 하 약 80m 내외의 깊이로 나타나기 때문에 SU5 역시 미고화 내지 반고화 상태의 퇴적층으로 추정된다. 층단위 상부경계면에서 특별한 침식의 증거는 발견되지 않는다.

나. 척치해저분지 사면

척치해저분지에서 구분된 5개의 층서는 척치해저분지를 둘러싸고 있는 동, 서, 남쪽의 분지사면에서도 비교적 잘 연장(대비)되어 나타난다. 분지 서쪽사면에서 퇴적층의 두께는 사면말단에서 상부사면으로 가면서 다소 감소하는 경향을 보인다. 그리고 각 층단위의 탄성파적 특성(반사상)도 비교적 큰 변화없이 유사하게 나타난다. 그러나 분지 동쪽 사면에서는 서쪽이나 남쪽 사면과는 달리 대규모 암설류 퇴적체가 거의 나타나지 않으며, 두께 20m 이하의 소규모 암설류 퇴적체만이 탄성파 층단

위 SU2와 SU3(?) 하부구간에서 인지된다.

한편, 척치해저분지 서남쪽 사면에서는 5개의 탄성과 층서가 하부 사면까지는 잘 연장되며, 각 층단위의 두께는 분지평원에서와 거의 같거나 지역에 따라 국지적으로 더 두꺼워지는 곳도 있다. 층단위의 탄성과적 특성은 분지평원에서 기술한 바와 거의 유사하게 나타난다. 다만 분지평원에서 2개의 세부구간(반사강도가 전반적으로 강한 상부구간과 상대적으로 약한 하부구간)으로 구분되는 층단위 SU2은 분지의 서쪽 사면으로 가면서 하부구간에서의 반사강도가 증가하며, 그 결과 상부구간의 반사특성과 거의 유사하게 나타난다. 암설류 퇴적체는 층단위 SU1, SU2에서 대규모로 척치해저분지 서쪽 사면에서도 최소 3매 이상의 암설류 퇴적체가 분포하며, 남서쪽 사면의 경우에는 최대 두께가 30m를 넘는 것도 발견된다. 특히, 층단위 SU1에는 3개의 층준에 대하여 대형 암설류체가 협재되어 있는데, 이 중 2개의 암설류 퇴적체는 SU1에서 세부적으로 구분한 두 개의 강한 반사면(R1a, R1b) 직상부와 대비된다.

다. 마카로프 해저분지 및 주변 사면

이 지역은 남북으로 취득된 탄성과단면에서 분지의 사면은 사면부의 중간, 수심 약 1,100m 깊이에 평탄한 대지가 발달하여, 전체적으로 계단형태의 지형단면을 보인다. 마카로프 해저분지는 로모노소프 해령에 의해 척치분지와 분리되어 있지만, 탄성과 자료에서 구분되는 층서는 두 분지가 서로 유사하게 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 척치분지에서 구분된 5개의 층단위의 반사강도 특성과 퇴적층 내의 출현 순서 등을 기준으로 할 때 비교적 높은 신뢰도를 갖고 대비된다(그림 11, 12). 다만, 분지평원에서는 탄성과 자료의 질이 불량하여, SU1~SU3 사이의 층단위만이 명확하게 인지되며, 사면에서는 5개의 탄성과 층단위가 모두 구분 가능하다. 분지평원에서 층단위들의 개별 반사특성은 앞서 기술한 척치분지에서의 층단위 반사특성과 전반적으로 유사한 것으로 보이며, 층단위들의 두께도 척치분지의 것과 거의 비슷하게 나타난다. 다만, 탄성과단면을 따라 분지사면에서 분지평원으로 가면서 대비되는 층단위들의 두께는 전체적으로 감소하는 경향을 보인다.

한편, 마카로프 해저분지의 중부 사면에 발달된 평지에서는 층단위 SU2와 그 하부의 지층이 모두 구조적인 변형을 받아 배사구조의 형태로 나타난다. 반면에 그 상부에 놓여있는 SU1은 거의 평탄하게 나타나며, SU1과 SU2의 경계는 경사부정합의 형태를 보인다(부록그림 3).

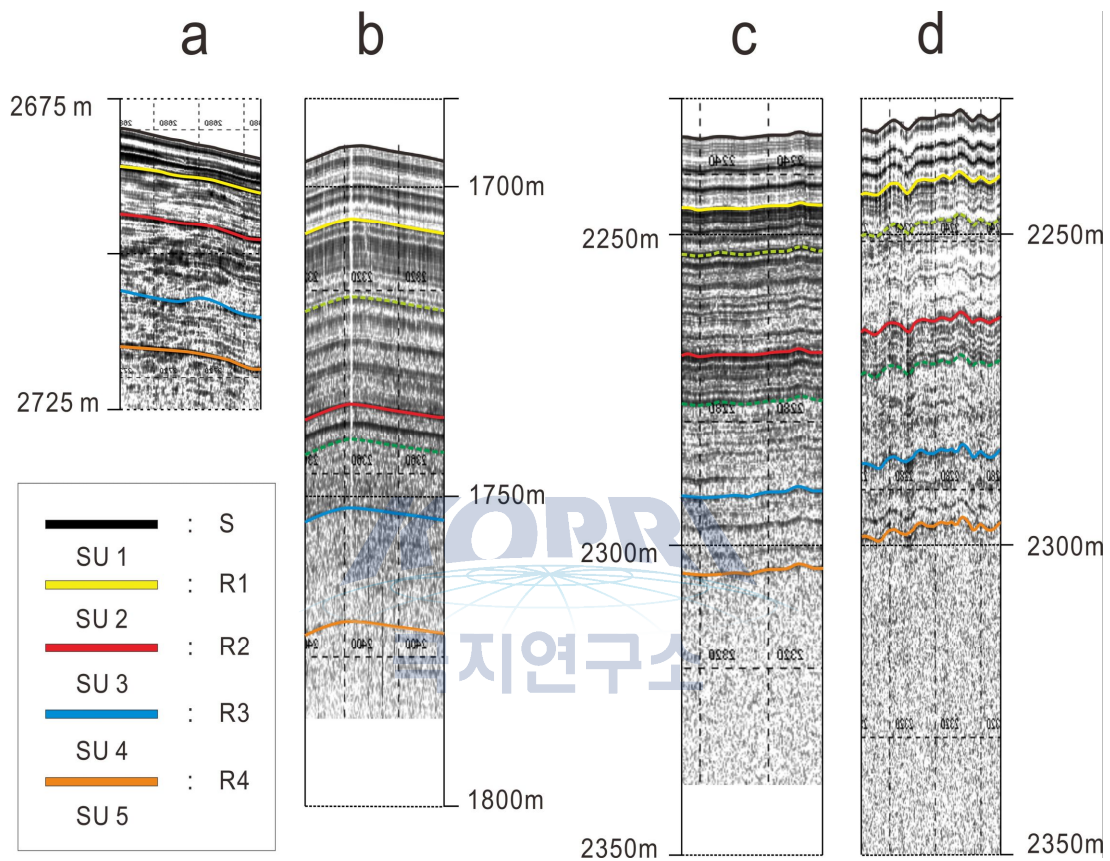


그림 12. 분지 별 구분된 건층면에 따른 층단위 비교.

라. 척치해저분지와 마카로프해저분지의 층서 비교

앞서 살펴본 각 해저분지의 층서특성에서, 서로 분리되어 있는 척치해저분지와 로모노소프해저분지의 탄성파층서 및 층단위의 반사상이 비교적 유사하게 나타남을 확인할 수 있다(그림 12). 이는 두 분지의 퇴적층이 지역적으로(분리된 분지별로) 공급원을 달리하는 육성기원 퇴적물보다는 표층 내지 중층 수괴의 특성을 반영하는 원양성 혹은 반원양성 퇴적물로 구성되어 있음을 반영하는 것으로 해석된다. 나아가, 두 해저분지 해역에서의 고환경변화(빙하기 및 간빙기)는 비교적 유사한 양상으로 진행되었으며, 이는 동일한 수괴 및 빙상(혹은 빙하)의 영향 하에 있었을 가능성이 높음을 지시한다.

한편, 주기적으로 나타난다고 볼 수 있는 층단위 및 층단위 내의 세부지층을 구분하는 강한 반사면들은 북극해 전체적으로 영향을 미쳤던 빙하기와 간빙기의 고해양환경 변화와 밀접하게 관련되어 있을 것으로 추정된다. 즉, 각 층단위의 경계부 및 내부의 세부 반사면들은 빙하기와 간빙기 퇴적물의 지화학 및 퇴적학적 특성 차이에 의해 야기된 물성(음향임피던스 등)의 차이를 반영하는 것으로 해석할 여지가 있다. 향후, SBP 자료의 해상도에 대비될 수 있는 수 십 m 길이의 Jumbo Piston Corer 시료가 확보된다면, 탄성파자료-시추자료 대비를 통해 강한 반사면의 성인과 고환경변화와의 연계성을 규명하고, 이를 기초로 SBP자료 획득이 가능한 대부분의 북극해 해역에서의 고환경변화사를 재구성할 수 있을 것으로 기대된다.

제 4 장 연구개발 목표 달성도

제 1 절 연구 개발목표 및 달성도

세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1-1	SBP 자료에 대한 고해상 층서 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 척치해 심해저 지역 퇴적층에서 강한 반사면을 경계로 하는 5개의 층단위를 구분 - 분지사면에는 빙하발달기에 일어난 암설류 기원의 대규모 퇴적체가 다수의 층준에 분포 - 시추코어 분석결과와 대비해볼 때, 대규모 암설류는 주로 10만년전 이전에 일어난 것으로 추정 	100%
1-2	코어 시료에 대한 조직특성 및 퇴적작용 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 코어 퇴적물의 색상, IRD함량, 퇴적상 특성의 변화에 대한 주기성 - 코어 퇴적물의 주기적 변화양상과 빙하기-간빙기의 대비 - 빙하주기에 따른 퇴적환경 변화 해석 	100%
1-3	서북극해 고해상 층서체계 수립	<ul style="list-style-type: none"> - 척치해 심해저에서 코어 퇴적물의 색상, IRD함량, 퇴적상에 따른 고해상 층서 수립 - 4번의 간빙기와 3번의 빙하기에 해당(10만~20만년 기간으로 추정) 	100%

제 2 절 연구수행 세부 내용 및 결과 요약

1. 세부목표 1-1: SBP 자료에 대한 고해상 층서분석

연구 내용	연구 결과
SBP 자료에 대한 주요 반사면 설정 및 반사면 대비를 통한 고해상 층서 분석	- 척치해 심해저 지역에서 4개의 주요 반사면 (고진폭의 측면연장성 양호)을 경계로 하는 5개의 탄성과 층단위를 구분
암설류 퇴적층의 분포 및 탄성과상 분석	- 척치분지 사면 및 분지평원 지역에서 두께 20~30 m, 축선상 최대 폭(길이) 30km 내외의 빙하기원 암설류 퇴적체 (glaciogenic debris flow deposits)의 분포 확인 - SBP 자료에서 인지되는 대규모 암설류 퇴적체는 코어와의 층서대비로 볼 때, 대부분 10만년전 이전에 발생한 것 - 암설류 퇴적체와 일반 반원양성 퇴적층의 탄성과적 특성 제시

2. 세부목표 1-2: 코어시료에 대한 조직특성 및 퇴적작용 분석

연구 내용	연구 결과
코어 시료에 대한 조직특성 분석	- 정밀 입도분석을 통해, 전년도 과제에서 제시된 퇴적상 별 입도조성의 차이 설명 - 코어퇴적물의 디지털색상 측정을 통해 갈색과 회색 계열 색상이 서로 교호함을 확인
코어 퇴적물에 대한 퇴적작용 분석	- 퇴적상 분석과 층서해석을 통해 시추퇴적물의 퇴적기원 해석하고 고환경변화에 따른 퇴적상모델 제시

3. 세부목표 1-3: 서북극해 고해상 층서체계 수립

연구 내용	연구 결과
코어 16BGC에 대한 층단위 구분	<ul style="list-style-type: none"> - 코어퇴적물의 색상, IRD함량, 퇴적상 등을 기준으로 하여 7개의 층단위를 구분 - 각 층단위는 간빙기(홀수 층단위)와 빙하기(짝수 층단위)의 반복적인 주기성을 반영하는 것으로 해석 - MIS와의 대비를 통해 코어 16BGC 퇴적물은 잠정적으로 지난 10만년 동안에 쌓인 것으로 추정





제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 학술적 파급효과

- 플라이스토세 말기 및 홀로세 동안의 북극해의 고해양 환경의 변화(LGM 동안의 대륙빙상의 분포 포함)를 규명함으로써 향후 지구 기후계의 변동 양상을 가늠하는 데 중요한 자료로 활용
- 기존 북극해 및 인접 지역에 나타난 고기후 변화 기록과 비교를 통해 퇴적학적 프록시를 개발함으로써 고해양환경 연구에 편의성과 정확성을 높이는데 기여
- 빙하기원 퇴적체에 대한 퇴적모델을 제시함으로써 북극해 다른 지역 해저퇴적층의 해석에 활용할 수 있으며, 특히 남극지역과 차별화된 빙해양퇴적모델과 그 원인을 규명함으로써 다양한 빙해양조건(환경)에서의 퇴적과정에 대한 이해를 제고



제 2 절 경제적 파급효과

- 향후 북극해 가스하이드레이트 등 해저자원탐사 및 북극항로탐사에 기본 자료로 활용



제 6 장 참고문헌

- 김소영, 남승일, 2011, 유기질 미화석을 이용한 서북극해 고해양환경 변화 연구에 대한 고찰. 대한지질학회지, 47: 547-560.
- Aagaard, K., Swift, J. H., Carmack, E. C., 1985, Thermohaline circulation in the Arctic Mediterranean seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 90. C3, 4833-4846.
- Adler, R.E., Polyak, L., Ortiz, J.D., Kaufman, D.S., Channel, J.E., Xuan, C., Grottoli, A.G., Sellén, E. and Crawford, K.A., 2009, Sediment record from the western Arctic Ocean with an improved Late Quaternary age resolution: HOTRAX core HLY0503-8JPC, Mendeleev Ridge. *Global and Planetary Change*, 68. 1: 18-29.
- Alekseev, M. N., 1997, Paleogeography and geochronology in the Russian Eastern Arctic during the second half of the Quaternary. *Quaternary International*, 41: 11-15.
- Andersen, E. S., Dokken, T. M., Elverhøi, A., Solheim, A. and Fossen, I., 1996, Late Quaternary sedimentation and glacial history of the western Svalbard continental margin. *Marine Geology*, 133. 3: 123-156.
- Backman, J., Fornaciari, E. and Rio, D., 2009, Biochronology and paleoceanography of late Pleistocene and Holocene calcareous nannofossil abundances across the Arctic Basin. *Marine Micropaleontology*, 72. 1: 86-98.
- Bischof, J.F. and Darby, D.A., 1997, Mid- to late Pleistocene Ice Drift in the Western Arctic Ocean: Evidence for a Difference Circulation in the Past. *Science*, 277. 5322: 74-78.
- Chough, S.K., 1984, Fine-grained turbidites and associated mass-flow deposits in the Ulleung (Tsushima) Back-arc Basin, East Sea (Sea of Japan). In: Stow, D.A.V, and Piper, D.J.W. (eds.), *Fine-Grained Sediments: Deep-Water Processes and Products*. Geol. Soc. London Spec. Publ., 15:

185–196.

- Chough, S.K. and Hesse, R., 1984, Contourites from Eirik Ridge, south of Greenland. In: Hesse, R. (ed.), *Sedimentology of Siltstone and Mudstone*. *Sedimentary Geology*, 41: 185–199.
- Chough, S.K., Lee, G.H., Park, B.K. and Kim, S.W., 1984, Fine structures of turbidite and associated muds in the Ulleung (Tsushima) Basin, East Sea (Sea of Japan). *Journal of Sedimentary Research*, 54: 1212–1220.
- Clark, D.L., Whitman, R.R., Morgan, K.A. and Mackey, S.D., 1980, Stratigraphy and glacial–marine sediments of the Amerasian Basin, Central Arctic Ocean. *Geological Society of America Special Papers*, 181: 1–65.
- Clark, D. L., Chern, L. A., Hogler, J. A., Mennicke, C. M. and Atkins, E. D., 1990, Late Neogene climate evolution of the central Arctic Ocean. *Marine Geology*, 93: 69–94.
- Damuth, J.E., 1975, Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Marine Geology*, 18: 17–45.
- Damuth, J.E., 1980, Use of high–frequency (3.5–12 kHz) echograms in the study of near–bottom sedimentation processes in the deep–sea: a review. *Mar. Geol.*, 38: 51–75.
- Damuth, J.E. and Hayes, D.E., 1977, Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Mar. Geol.*, 24: 73–95.
- Darby, D.A., Naidu, A.S., Mowatt, T.C. and Jones, G., 1989, Sediment composition and sedimentary processes in the Arctic Ocean. In: *The Arctic Seas*. Springer US, p. 657–720
- Darby, D.A., Bischof, J.F., Cutter, G., Vernal, A., Hillaire–Marcel, C., Dwyer, G., McManus, J., Osterman, L., Polyak, L., Poore, R., 2001, New record shows pronounced changes in Arctic Ocean circulation and climate. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82. 49: 601–607.
- Dowdeswell, J.A., Whittington, R.J. and Marienfeld, P., 1994, The origin of massive diamicton facies by iceberg rafting and scouring, Scoresby Sund, East Greenland. *Sedimentology*, 41. 1: 21–35.
- Ehlers, J., and Gibbard, P. L., 2007, The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quaternary International*, 164, 6–20.
- Evans, J., Dowdeswell, J.A., Grobe, H., Niessen, F., Stein, R., Hubberten,

- H.W. and Whittington, R., 2002, Late Quaternary sedimentation in Keiser Franz Joseph Fjord and the continental margin of east Greenland. Geological Society, London, Special Publications, 203: 149–179.
- Grobe, H., 1987, A simple method for the determination of ice-rafted debris in sediment cores. *Polarforschung*, 57. 3: 123–126.
- Grosswald, M. G., & Hughes, T. J., 2002, The Russian component of an Arctic ice sheet during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 21. 1: 121–146.
- Hein, F.J., van Wagoner, N.A. and Mudie, P.J., 1990, Sedimentary facies and processes of deposition: Ice Island cores, Axel Heiberg shelf, Canadian polar continental margin. *Marine Geology*, 93: 243–265.
- Henrich, R., Kassens, H., Vogelsang, E. and Thiede, J., 1989, Sedimentary facies of glacial-interglacial cycles in the Norwegian Sea during the last 350 ka. *Marine Geology*, 86. 4: 283–319.
- Hesse, R., Khodabakhsh, S., Klaucke, I., Ryan, W.B.F., 1997, Asymmetrical turbid surface-plume deposition near ice-outlets of the Pleistocene Laurentide ice sheet in the Labrador Sea. *Geo-Marine Letters*, 17. 3: 179–187.
- Hesse, R., Klaucke, I., Khodabakhsh, S., Piper, D., 1999, Continental slope sedimentation adjacent to an ice margin. III. The upper Labrador Slope. *Marine Geology*, 155. 3: 249–276.
- Hill, P.R., 1984, Sedimentary facies of the Nova Scotian upper and middle continental slope, offshore eastern Canada. *Sedimentology*, 31: 293–309.
- Hopkins, D.M., Macneil, F.S., Merklin, R.L., Petrov, O.M., 1965, Quaternary Correlations across Bering Strait Recent Soviet and American studies cast new light on the history of the Bering land bridge. *Science*, 147. 3663: 1107–1114.
- Howe, J.A., Shimmield, T.M., Harland, R.E.X. and Eyles, N., 2008, Late Quaternary contourites and glaciomarine sedimentation in the Fram Strait. *Sedimentology*, 55. 1: 179–200.
- Jakobsson, M., Løvlie, R., Al-Hanbali, H., Arnold, E., Backman, J. and Mörth, M., 2000, Manganese and color cycles in Arctic Ocean sediments constrain Pleistocene chronology. *Geology*, 28. 1: 23–26.
- Jakobsson, M., Nilsson, J., O'Regan, M., Backman, J., Löwemark, L.,

- Dowdeswell, J.A., Mayer, L., Polyak, L., Colleoni, F., Anderson, L.G., Björk, G., Darby, D.A., Eriksson, B., Hanslik, D. Hell, L.G., Marcussen, C., Sellén, E., Wallin, Å., 2010, An Arctic Ocean ice shelf during MIS 6 constrained by new geophysical and geological data. *Quaternary Science Reviews*, 29. 25: 3505–3517.
- Knies, J., Nowaczyk, N., Müller, C., Vogt, C. and Stein, R., 2000, A multiproxy approach to reconstruct the environmental changes along the Eurasian continental margin over the last 150 000 years. *Marine Geology*, 163. 1: 317–344.
- Kuhn, G., and Weber, M.E., 1993, Acoustical characterization of sediments by Parasound and 3.5 kHz systems: Related sedimentary processes on the southeastern Weddell Sea continental slope, Antarctica. *Marine geology*, 11. 3: 201–217.
- Lee, S.H., S.K. Chough, G.G. Back and Y.B. Kim, 2002, Chirp (2–7 kHz) echo characters of the South Korea Plateau: styles of mass movement and sediment gravity flow, *Mar. Geol.*, 184: 227–247.
- Matthiessen, J., Nissen, F., Stein, R. and Naafs, D.B., 2010, Pleistocene glacial marine sedimentary environments at the eastern Mendeleev Ridge, Arctic Ocean. *Polarforschung*, 79: 123–137.
- März, C., Stratmann, A., Matthiessen, A.K., Eckert, S., Schnetger, B. and Brumsack, H.J., 2011, Manganese-rich brown layers in Arctic Ocean sediments: composition, formation mechanisms, and diagenetic overprint. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 75. 23: 7668–7687.
- Minicucci, D.A. and Clark, D.L., 1983, A Late Cenozoic stratigraphy for glacial-marine sediments of the eastern Alpha Cordillera, central Arctic Ocean. In: *Glacial-marine sedimentation*, Springer US, p. 331–365.
- Mudie, P.J. and Blasco, S.M., 1985, Lithostratigraphy of the CESAR cores. Initial Geological Report on CESAR—the Canadian Expedition to Study the Alpha Ridge, Arctic Ocean, 59–99.
- Niessen, F., Hong, J. K., Hegewald, A., Matthiessen, J., Stein, R., Kim, H., Kim, S., Jensen, L., Jokat, W., Nam, S.I., Kang, S. H., 2013, Repeated Pleistocene glaciation of the East Siberian continental margin. *Nature*

- Geoscience, 6. 10: 842–846.
- Nørgaard-Pedersen, N., Mikkelsen, N., Lassen, S.J., Kristoffersen, Y. and Sheldon, E., 2007, Reduced sea ice concentrations in the Arctic Ocean during the last interglacial period revealed by sediment cores off northern Greenland. *Paleoceanography*, 22. 1.
- Ó Cofaigh, Taylor, J., Dowdeswell, J.A. and Pudsey, C.J., 2003, Palaeo-ice streams, trough mouth fans and high-latitude continental slope sedimentation. *Boreas*, 32. 1: 37–55.
- Ó Cofaigh, Julian, A., Dowdeswell, J.A. and Grobe, H., 2001, Holocene glacimarine sedimentation, inner Scoresby Sund, East Greenland: the influence of fast-flowing ice-sheet outlet glaciers. *Marine Geology*, 175. 1: 103–129.
- Phillips, R.L. and Grantz, A., 1997, Quaternary history of sea ice and paleoclimate in the Amerasia basin, Arctic Ocean, as recorded in the cyclical strata of Northwind Ridge. *Geological Society of America Bulletin*, 109. 9: 1101–1115.
- Phillips, R.L. and Grantz, A., 2001, Regional variations in provenance and abundance of ice-rafted clasts in Arctic Ocean sediments: implications for the configuration of late Quaternary oceanic and atmospheric circulation in the Arctic. *Marine Geology*, 172. 1: 91–115.
- Piper, D.J.W., 1978, Turbidite muds and silts in deep-sea fans and abyssal plains. In: Stanley, D.J. and Kelling, G. (eds.), *Sedimentation in Submarine Fans, Canyons, and Trenches*. Dowden Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Penn., p.163–176.
- Polyak, L., Curry, W. B., Darby, D. A., Bischof, J., Cronin, T. M., 2004, Contrasting glacial/interglacial regimes in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Mendeleev Ridge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 203. 1: 73–93.
- Polyak, L., Darby, D.A., Bischof, J.F., Jakobsson, M. ,2007, Stratigraphic constraints on late Pleistocene glacial erosion and deglaciation of the Chukchi margin, Arctic Ocean. *Quaternary Research*, 67. 2: 234–245.
- Polyak, L., Bischof, J., Ortiz, J.D., Darby, D.A., Channell, J.E.T., Xuan, C., Kaufman, D.S., Løvlie, R., Schneider, D.A., Eberl, D.D., Adler, R.E. and Council, E.A., 2009, Late Quaternary stratigraphy and sedimentation patterns in the western Arctic Ocean. *Global and Planetary Change*, 68.

1: 5–17.

- Poore, R.Z., Osterman, L., Curry, W.B., Phillips, R.L., 1999, Late Pleistocene and Holocene meltwater events in the western Arctic Ocean. *Geology*, 27. 8: 759–762.
- Stanley, D.J. and Maldonado, A., 1981, Depositional models for fine-grained sediment in the western Hellenic Trench, Eastern Mediterranean. *Sedimentology*, 28: 273–290.
- Stein, R., 2008, Arctic Ocean Sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. *Developments in Marine Geology 2*, Elsevier, 592p.
- Stein, R., Matthiessen, J. and Niessen, F., 2010a, Re-coring at Ice Island T3 site of key core FL-224 (Nautilus Basin, Amerasian Arctic): sediment characteristics and stratigraphic framework. *Polarforschung*, 79. 2: 81–96.
- Stein, R., Matthiessen, J., Niessen, F., Krylov, A., Nam, S. I., Bazhenova, E., 2010b, Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean). *Polarforschung*, 79. 2: 97–121.
- Stow, D.A.V., 1979, Distinguishing between fine-grained turbidites and contourites on the Nova Scotian deep water margin. *Sedimentology*, 26: 371–387.
- Stow, D.A.V. and Holbrook, J.A., 1984, North Atlantic contourites: an overview. In: Stow D.A.V. and Piper, D.J.W. (eds.), *Fine-Grained Sediments: Deep-Water Processes and Products*. Geological Society, London, Special Publications, 15: 245–256.
- Stow, D.A.V. and Shanmugam, G., 1980, Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments. *Sedimentary Geology*, 25: 23–42.
- Svindland, K.T. and Vorren, T.O., 2002, Late Cenozoic sedimentary environments in the Amundsen Basin, Arctic ocean. *Marine geology*, 186. 3: 541–555.
- Vorren, T.O., Hald, M. and Thomsen, E., 1984, Quaternary sediments and environments on the continental shelf off northern Norway. *Marine geology*, 57. 1: 229–257.
- Wang, R., Xiao, W., Li, W. and Sun, Y., 2010, Late Quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean. *Chinese*

Bulletin, 55. 4-5): 432-440.

Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1993, Sedimentary characteristics of Late Pleistocene bottom-current deposits, Barents Sea slope off northern Norway. Sed. Geol., 82: 33-45.

Yoon, S.H., Chough, S.K., Thiede, J. and Werner, F., 1991. Late Pleistocene sedimentation on the Norwegian continental slope between 67°N and 71°N. Marine Geology, 99: 187-207.



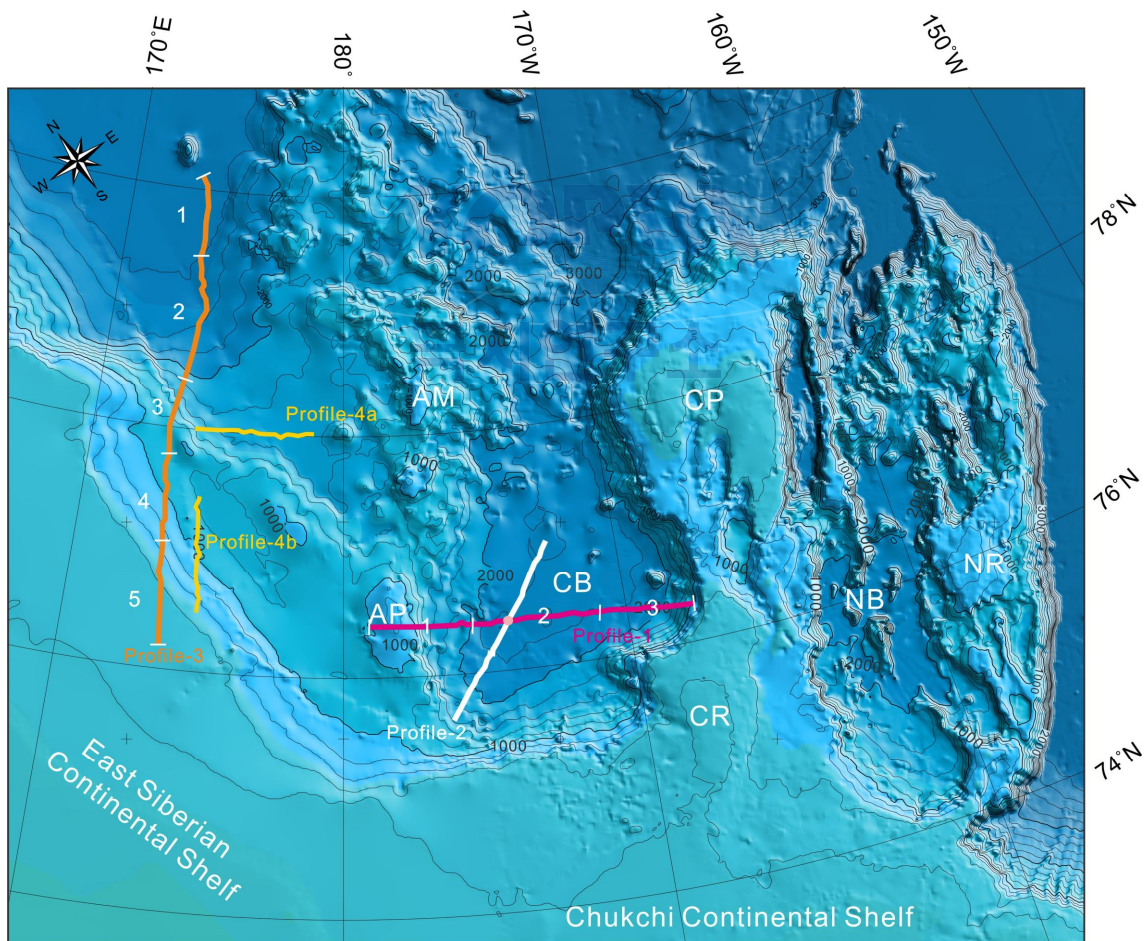


부 록

SBP 건층면 해석도

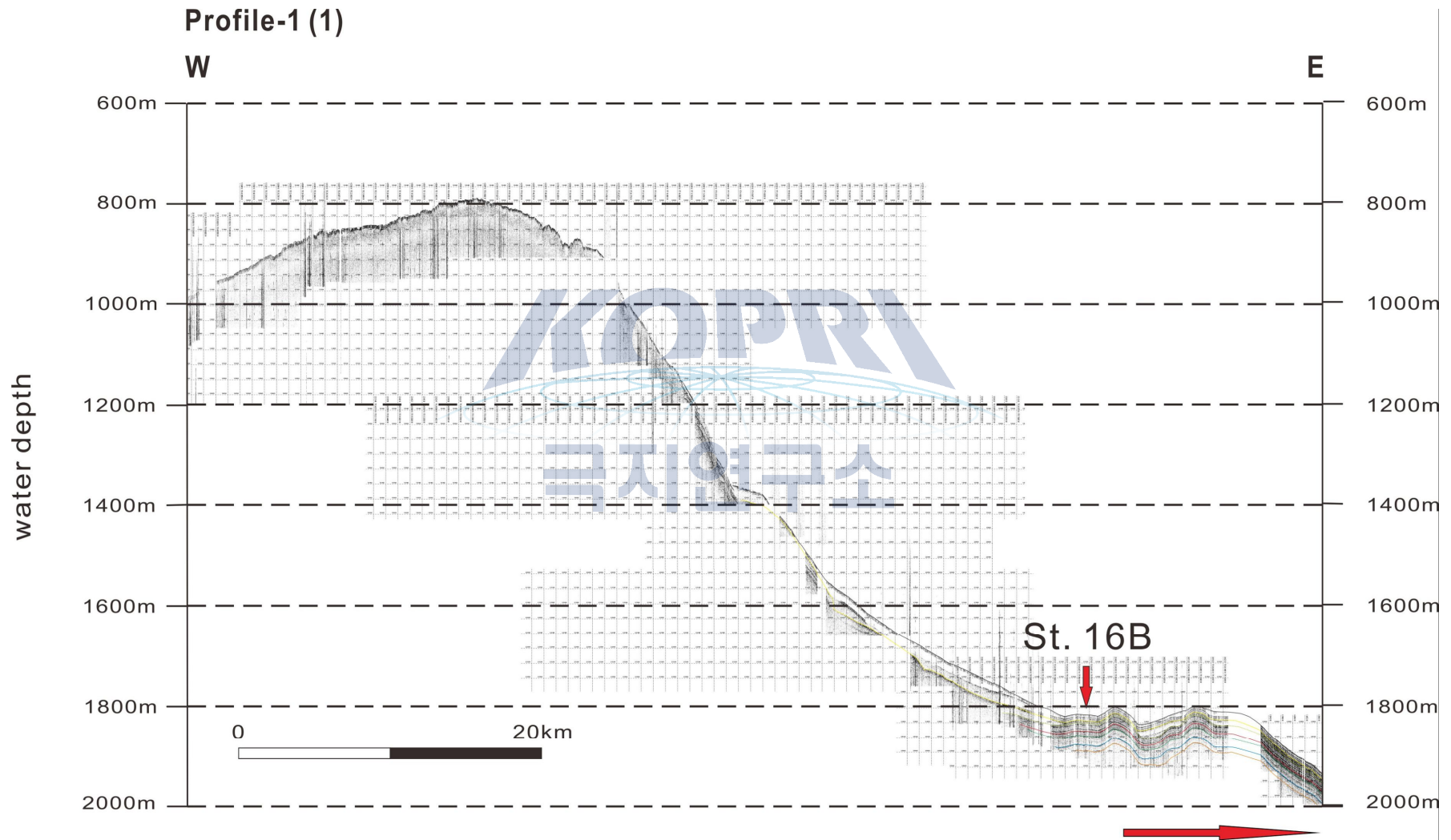


연구지역 지형도 및 천부지층 탐사라인



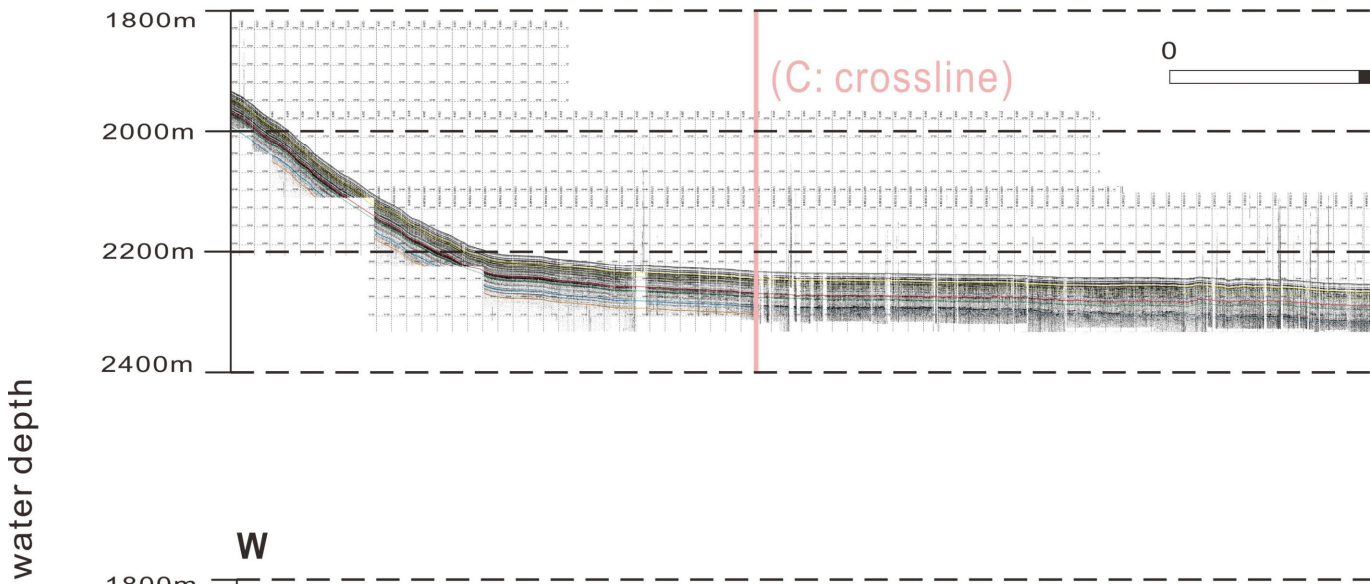
1. Profile-1 SBP 단면(W-E)



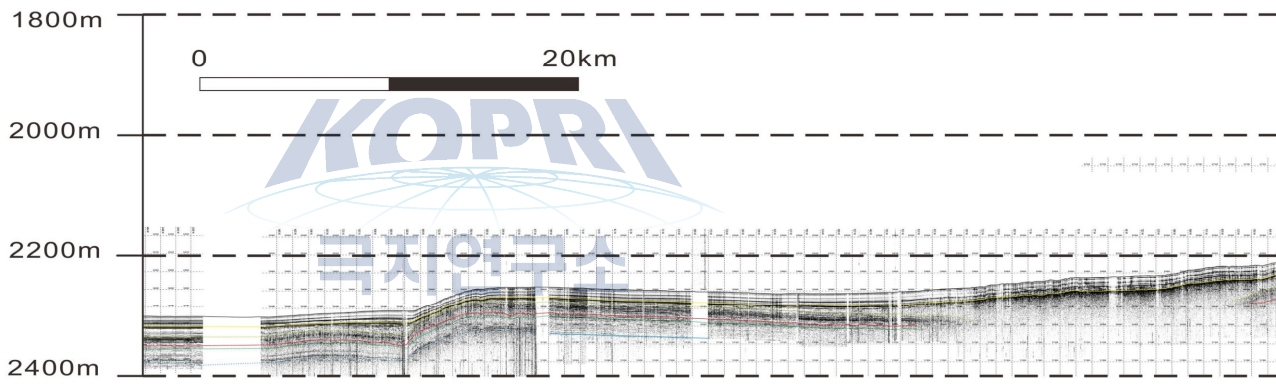


Profile-1 (2)

W

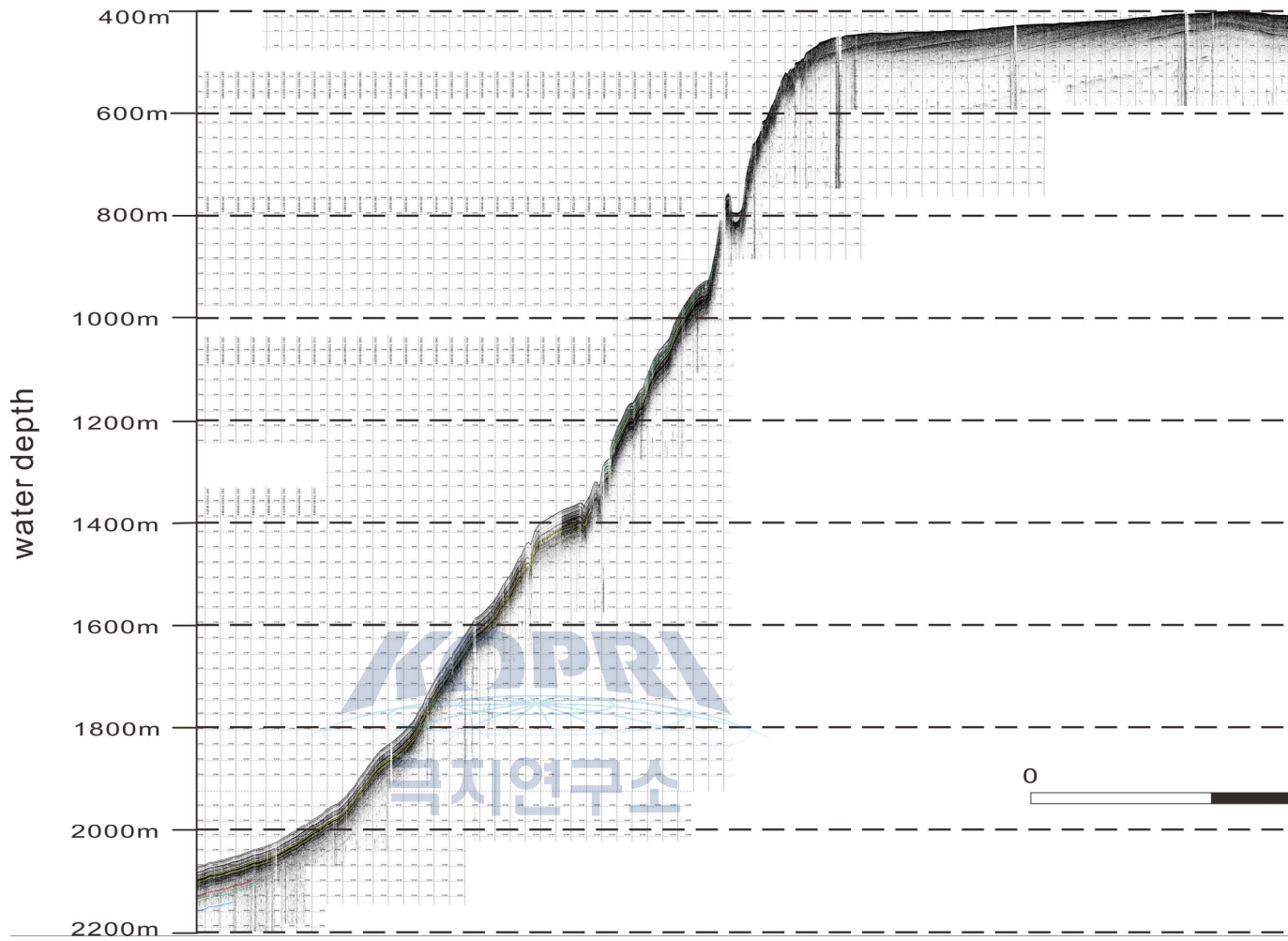


W



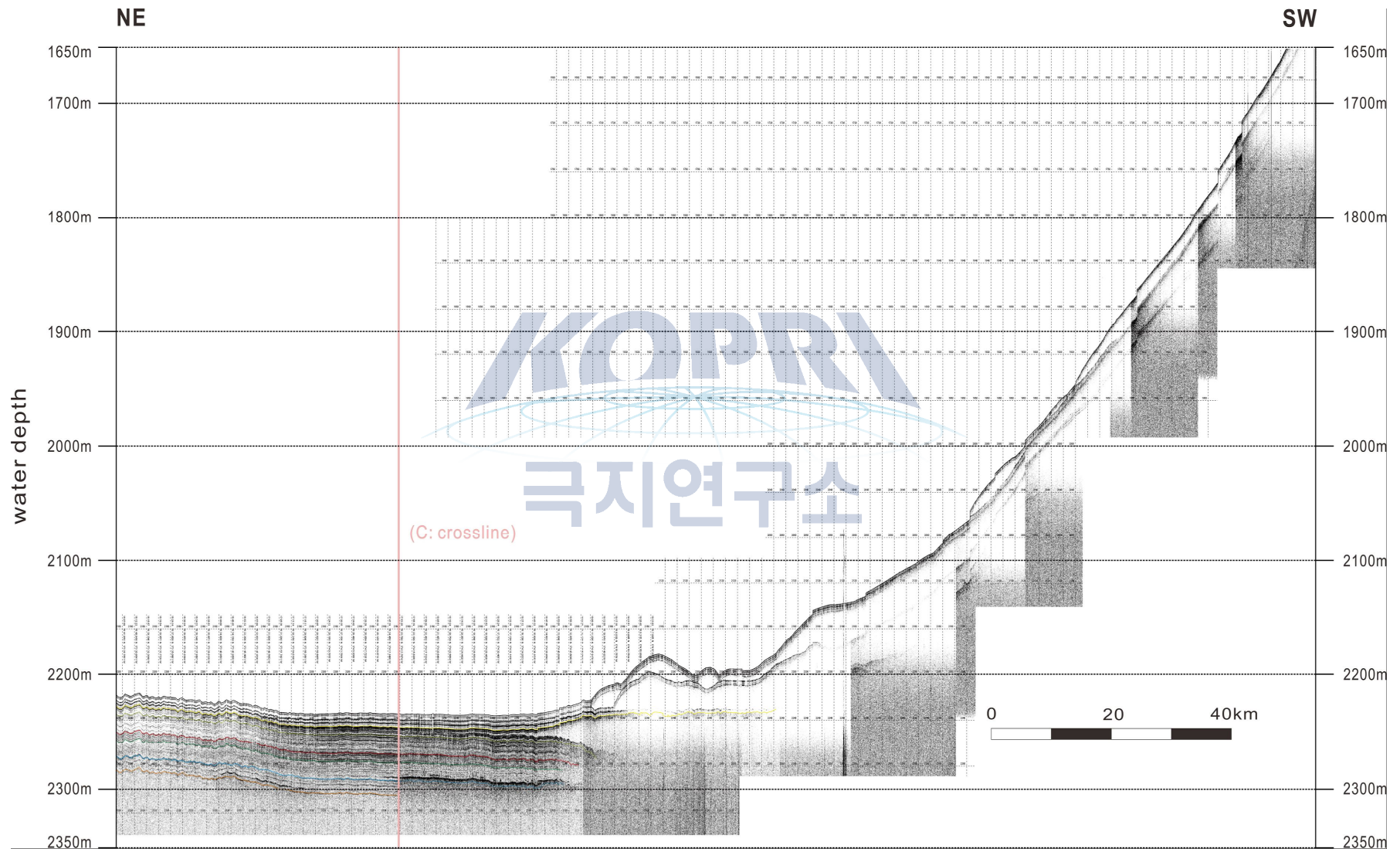
Profile-1 (3)

W



2. Profile-2 SBP 단면(SW-NE)





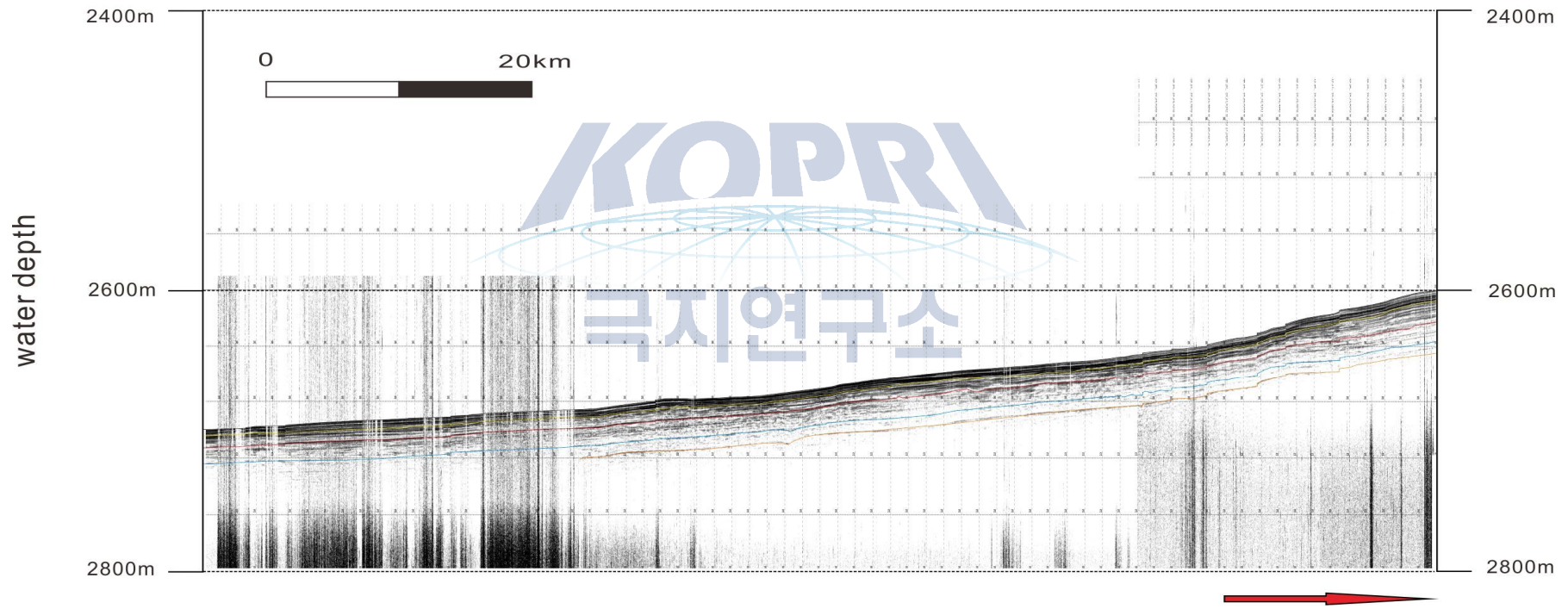
3. Profile-3 SBP 단면(N-S)



Profile-3 (1)

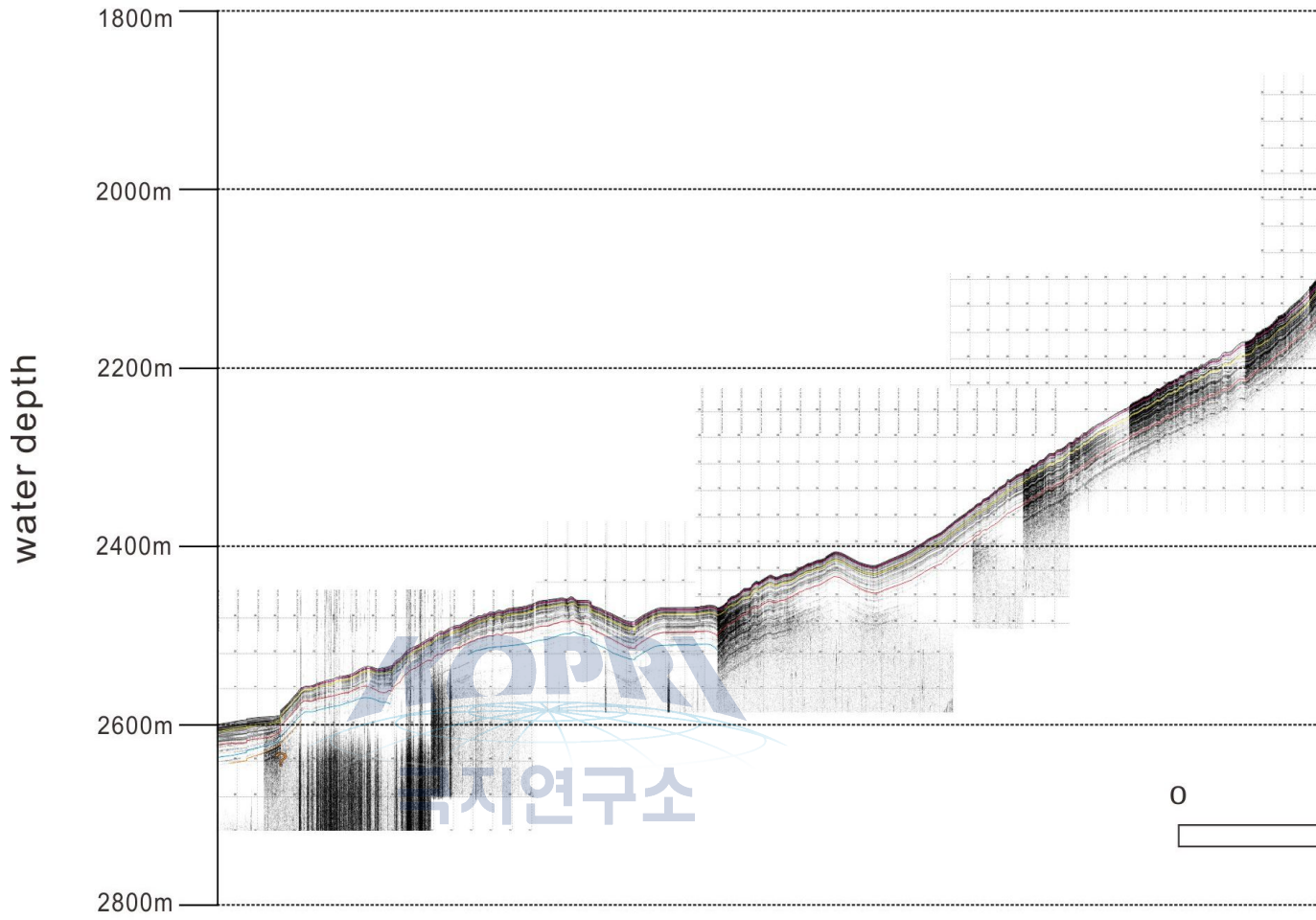
N

S



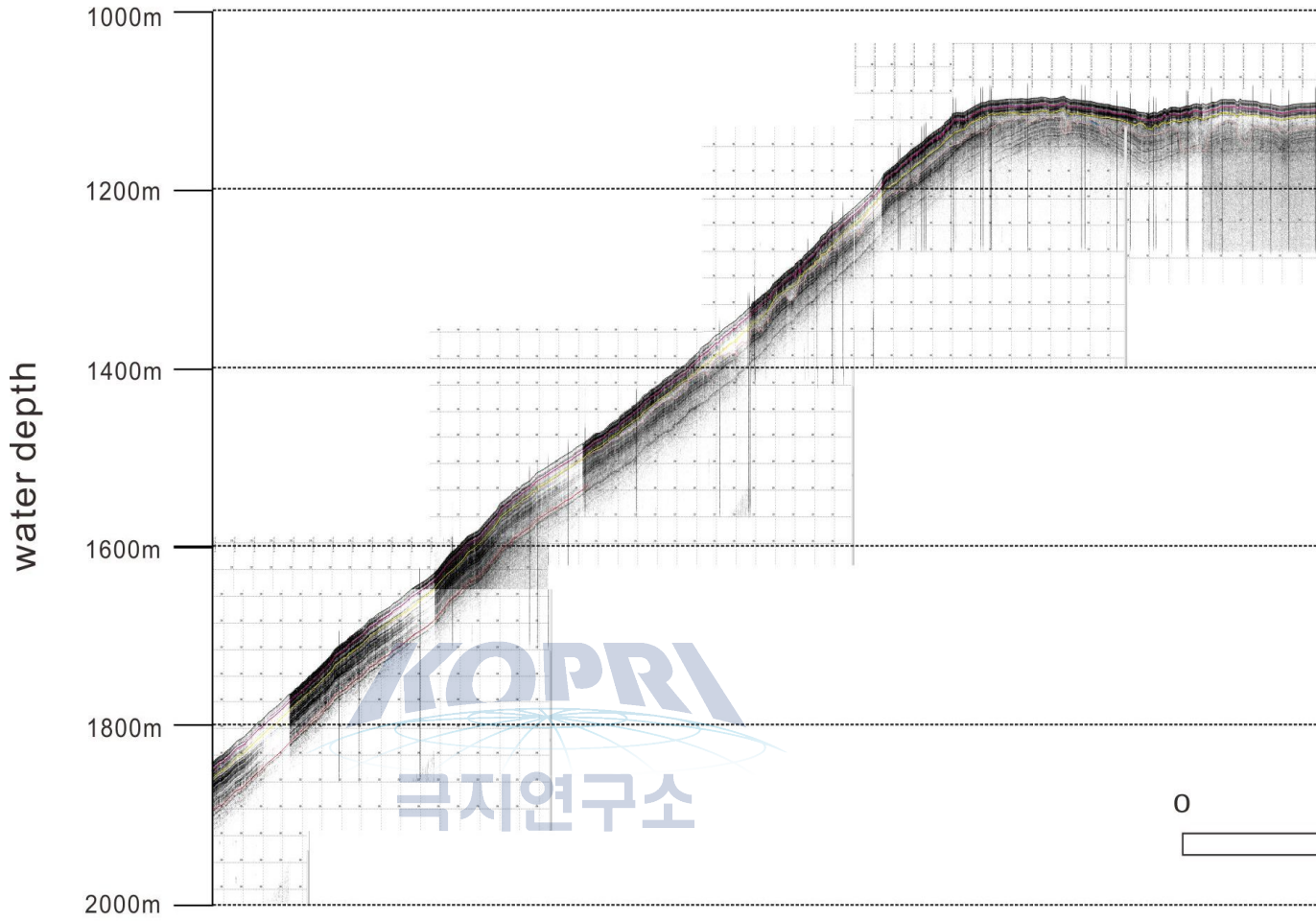
Profile-3 (2)

N



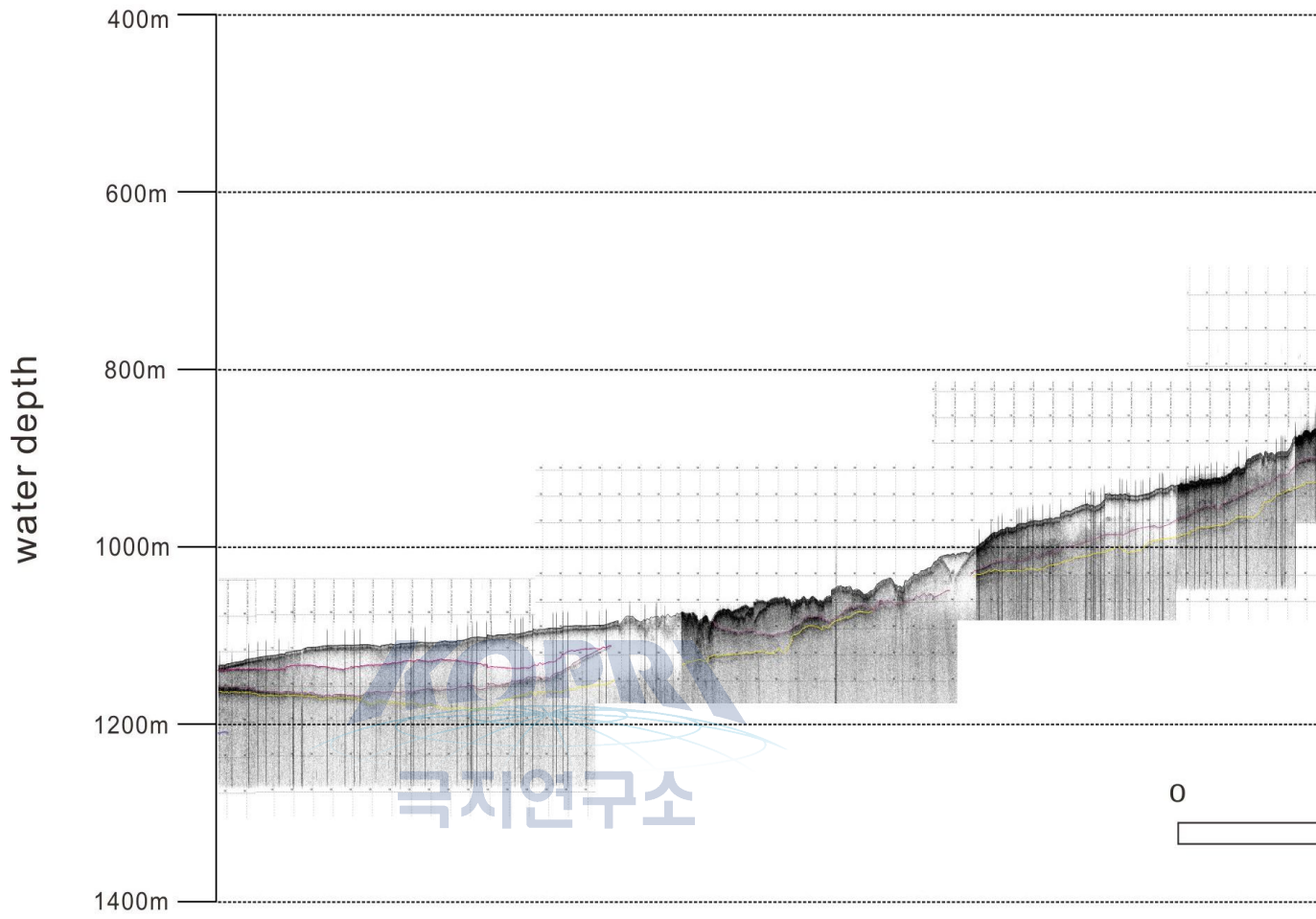
Profile-3 (3)

N



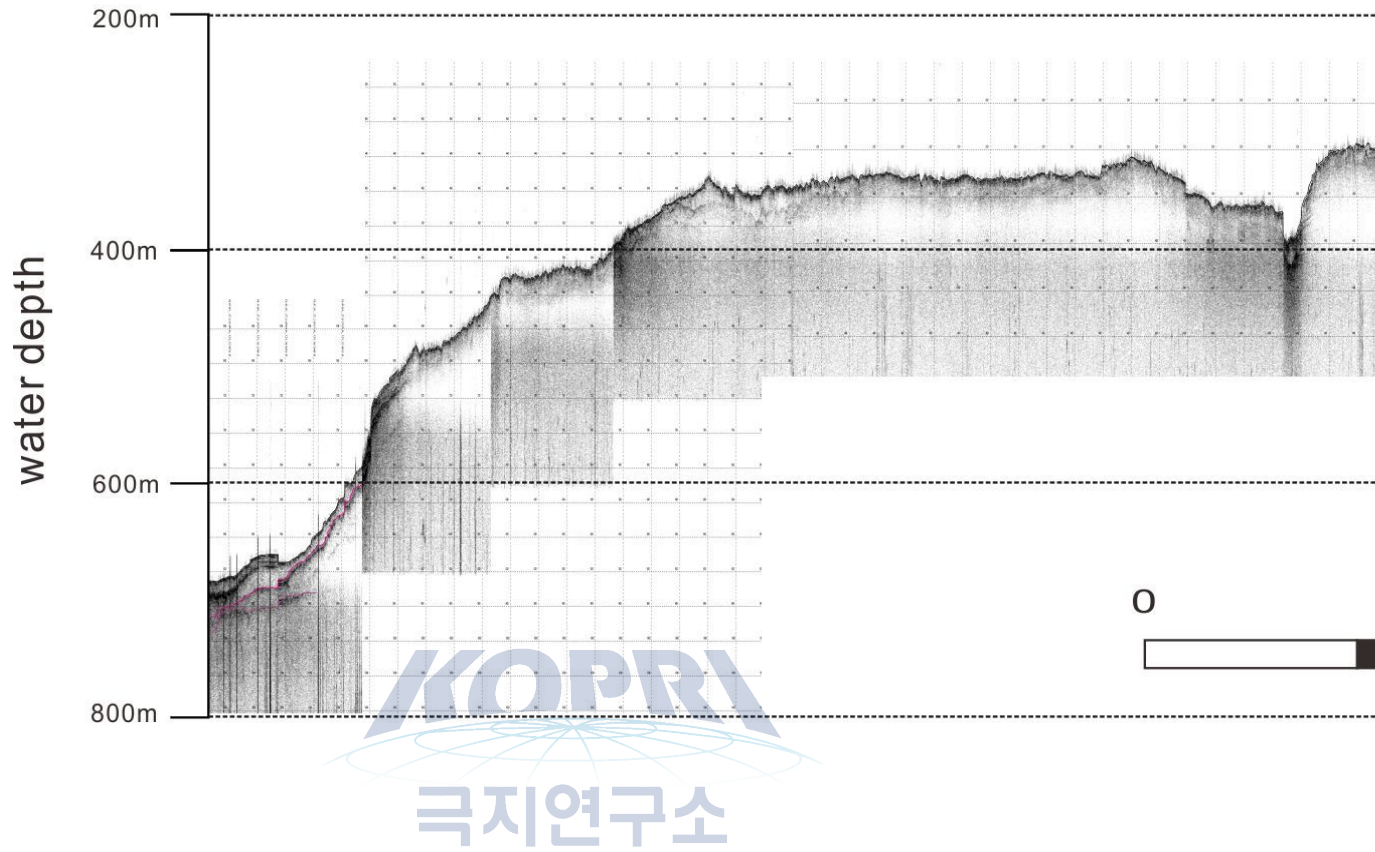
Profile-3 (4)

N



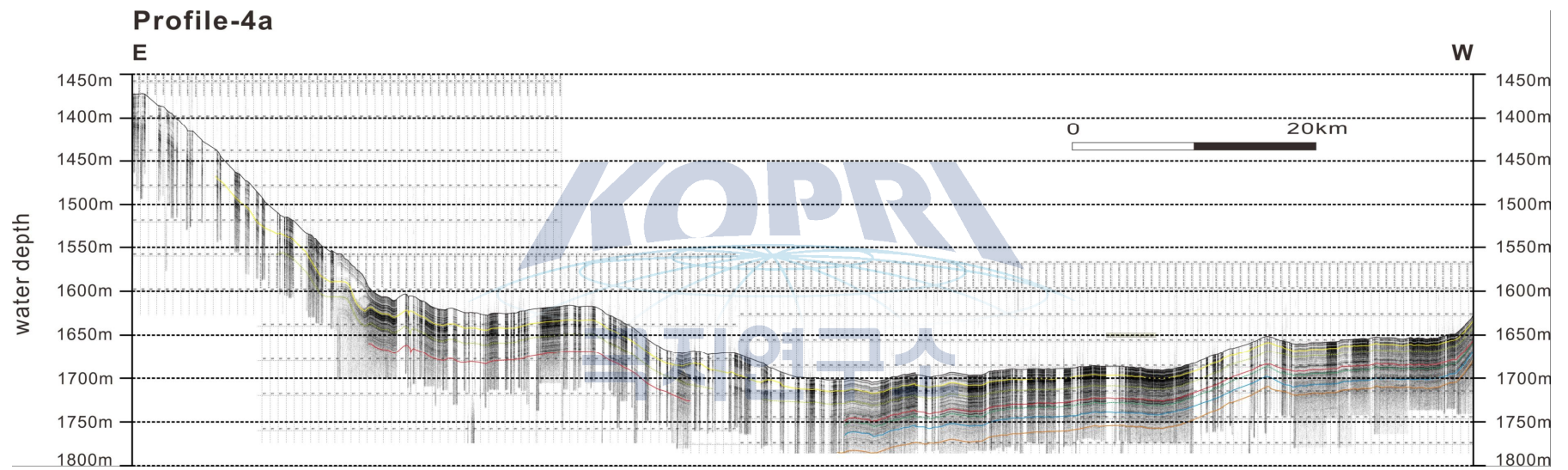
Profile-3 (5)

N

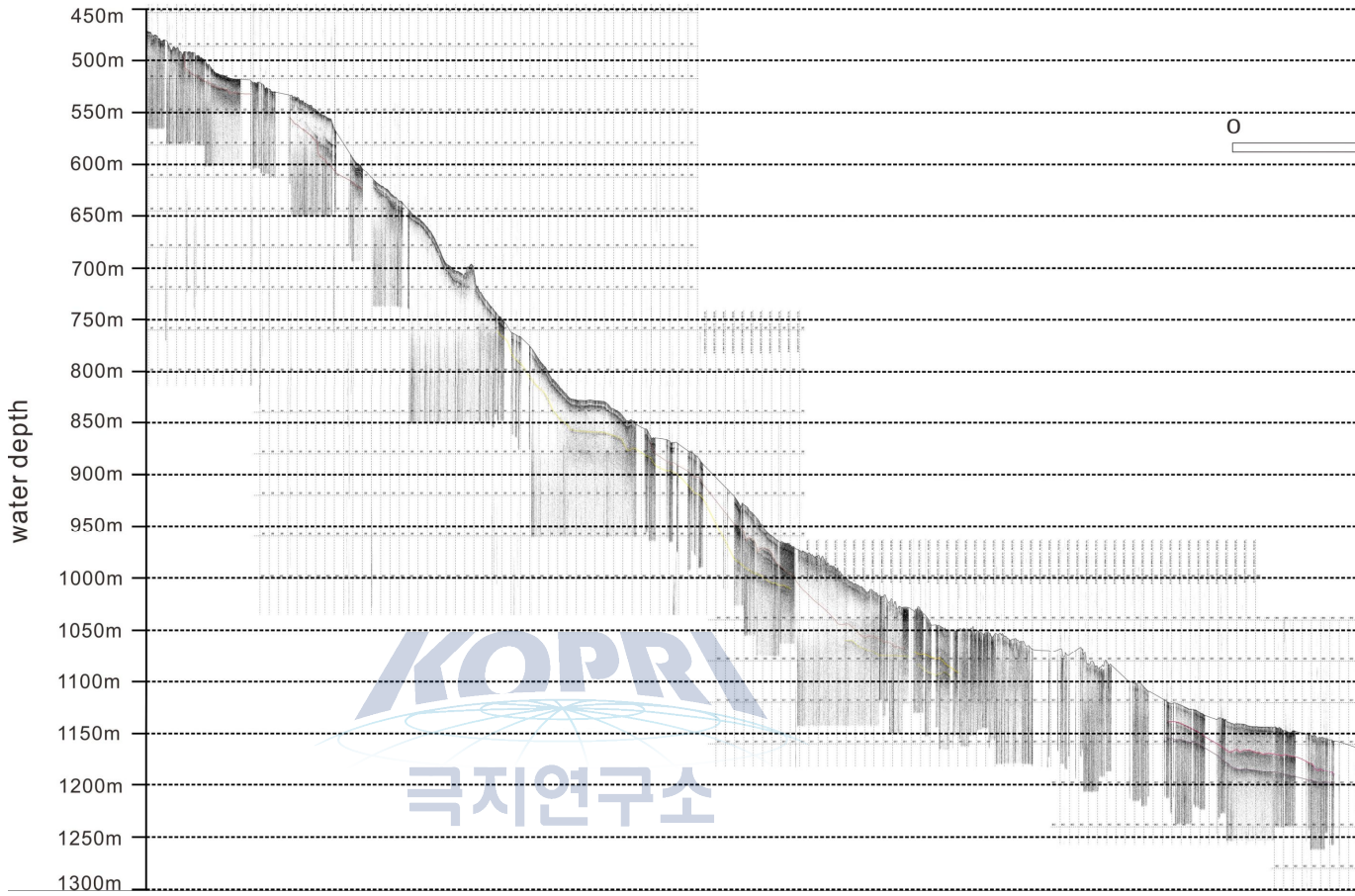


4. Profile-4a, b SBP 단면(E-W, S-N)





Profile-4b
S





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