

북극해 해저자원의 광물학적 특성 연구

Mineralogical characteristics for Arctic
submarine resources



경상국립대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 해저자원환경 탐사 및 해저메탄방출현상 연구” 과제의
위탁연구 “북극해 해저자원의 광물학적 특성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니
다.

(본과제) 총괄연구책임자	: 진영근
위탁연구기관명	: 경상국립대학교 산학협력단
위탁연구책임자	: 조현구
위탁참여연구원	: 구효진

보고서 초록

위탁연구과제명	북극해 해저자원의 광물학적 특성 연구				
위탁연구책임자	조 현 구	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	50,000,000
연구기관명 및 소속부서명	경상대학교 지질과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)			보고서 면수	109	

I. 목적

- 북극 망간단괴의 특성과 형성과정을 규명
- 해저자원 탐사를 위한 기초자료로서 퇴적물의 광물학적 특성을 파악

II. 결과

- 동시베리아해 망간단괴는 수심 200 m 내외의 얕은 대류봉에서 주로 3 cm 이하의 구형으로 산출됨.
- 망간단괴는 토도로카이트, 베네사이트, 부서라이트, 베나다이트 등 산화망간광물과 석영, 장석 등 규산염광물로 구성됨.
- 동시베리아해 망간단괴는 Mn/Fe ratio가 매우 높으며, 주로 속성기원에 의해 형성된 것으로 판단됨.
- 탐사 해역의 광물 조성은 석영, 장석, 휘석, 각섬석, 운모류, 점토광물로 구성됨. 점토광물은 일라이트가, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 풍부함.
- 일부 퇴적물에서 자생 석고가 확인되며, 이는 메탄 하이드레이트의 해리에 의해 형성된 것으로 판단됨.

III. 활용계획

- 과학기술 및 산업계에서 북극의 망간단괴 및 고해양환경 변화 연구에 활용
- 북극해 해양자원 개발과 관련된 국가 정책 결정에 과학적 기초자료 제공

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 동시베리아해, 척치해, 망간단괴, 광물 조성
	영 어	Arctic Ocean, East Siberian Sea, Chukchi Sea, Manganese nodule, Mineral composition

요약문

I. 제목

북극해 해저자원의 광물학적 특성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 북극 동시베리아해의 망간단괴 탐사를 통해 북극 망간단괴 부존 지역을 새롭게 발견하고, 북극 망간단괴의 특성과 형성과정을 규명
2. 북극해 해저자원 탐사를 위한 기초자료 획득을 위해 해양 퇴적물의 광물학적 특성을 파악. 코어 퇴적물 내 광물 조성 변화를 통해 퇴적물의 기원지 및 고환경 변화를 추적

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 동시베리아해에서 새로운 망간단괴 부존 지역을 발견하고, 8개 정점에서 2천여 개의 망간단괴를 획득함. 망간단괴에 대한 광물학적, 지화학적 분석을 실시하여 동시베리아해 망간단괴의 특성과 형성과정을 규명
2. 동시베리아해, 척치해, 보페트해 탐사를 통해 20개의 정점에서 코어 퇴적물을 확보함. 벌크 퇴적물, 점토 분리 퇴적물 및 빙설쇄설물의 광물 조성을 분석하여, 연구지역 전반의 광물 조성을 알아봄
3. 코어 퇴적물 내 광물 조성 변화를 분석하여 마지막 최대 빙하기 이후, 퇴적물의 기원지 변화를 추적하고 고환경 변화를 해석함

IV. 연구개발결과

1. 동시베리아해 망간단괴는 수심 200 m 내외의 얕은 대륙붕에서 주로 3 cm 이

하의 구형으로 산출된다. 망간단괴의 광물 조성은 토도로카이트, 베네사이트, 부서라이트, 베나다이트 등 산화망간광물과 석영, 장석 등 규산염광물로 구성된다. 동시베리아해 망간단괴는 Mn/Fe ratio가 매우 높으며, 주로 속성기원에 의해 형성된 것으로 판단된다.

2. 동시베리아해, 척치해, 보퍼트해 해양 퇴적물은 주로 석영, 장석, 휘석, 각섬석, 운모류, 점토광물들로 구성된다. 점토광물은 일반적으로 일라이트가 가장 풍부하며, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 구성된다. 일부 퇴적물들에서 자생 석고가 확인되었으며, 이들은 메탄 하이드레이트의 해리에 의해 형성된 것으로 판단된다.
3. 척치해와 동시베리아해 퇴적물의 퇴적 시기는 유닛 3 (마지막 최대 빙하기), 유닛 2 (퇴빙기), 유닛 1 (간빙기)로 구분되었다. 유닛 3 퇴적물은 동시베리아해로 유입되는 콜리마 강과 인디기르카 강 퇴적물들이 해빙이나 해류에 의해 유입된 것으로 보인다. 유닛 2 퇴적물은 콜리마 강, 인디기르카 강, 보퍼트해로 유입되는 맥켄지강과 캐나다 군도로부터 함께 공급된 것으로 보이며, 로렌타이드 빙상의 융해에 의하여 다량의 빙운쇄설물들이 유입되었다. 유닛 1의 경우, 세립질 퇴적물들은 캐나다 북부와 동시베리아해로부터 해빙과 해류에 의해 공급되었으며, 조립질 퇴적물들은 캐나다 군도로부터 해빙에 의해 유입된 것으로 여겨진다.

극지연구소

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 과학기술 분야 활용

- 북극 망간단괴 및 고해양환경 변화 연구에 활용

2. 산업계 활용

- 북극해 해양자원 개발에 중요한 기초자료로 활용

3. 국가정책 결정에 활용

- 북극해 해양자원 개발과 관련된 국가 정책 결정에 과학적 기초자료 제공

S U M M A R Y

(영문 요약문)

I. Title

Mineralogical characteristics for Arctic submarine resources

II. Purpose and Necessity of R&D

1. New discovery of manganese nodule deposit in the Arctic Ocean through expeditions in the East Siberian Sea, and to investigate the characteristics and formation processes of manganese nodules
2. Understanding the mineralogical characteristics of marine sediments to obtain basic data for expedition of submarine resources in the Arctic Ocean. Investigation of changes in the provenance and paleo-environment in the Arctic through the vertical variations in mineral compositions in the core sediments

III. Contents and Extent of R&D

1. Discovered an area where a new manganese nodule deposit in the East Siberian Sea, and acquired about 2,000 manganese nodules at eight station sites. The characteristics and formation process of manganese nodule in the East Siberian Sea were investigated by analyzing mineralogical and geochemical features of manganese nodules.
2. Core sediments were acquired at 20 station sites through expedition in the East Siberian Sea, the Chukchi Sea, and the Beaufort Sea. Analyzing the mineral composition of bulk sediment, clay-separated sediment, and ice rafted debris to find out the mineral composition of the research area
3. Analyzing the change in mineral composition in the core sediment, investigating the changes in the sediment provenance after the last

glacial maximum, and interpreting the paleo-environment

IV. R&D Results

1. Manganese nodules in the East Siberian Sea mainly occur in a spherical shape of less than 3 cm in shallow continental shelves with a depth of 200 m or less. The mineral composition of manganese nodules is composed of manganese oxide minerals such as todorokite, birnessite, buserite, and vernadite, and silica minerals such as quartz and feldspar. Manganese nodules in the East Siberian Sea have a very high Mn/Fe ratio, and are believed to have been formed by diagenetic process.
2. Marine sediment in the East Siberian Sea, the Chukchi Sea, and the Beaufort Sea are mainly composed of quartz, feldspar, pyroxene, amphibole, mica and clay minerals. Clay minerals are generally the most abundant in illite, and are composed of chlorite, kaolinite, and smectite in that order. Some sediments contain gypsum, which is believed to be formed by the dissociation of methane hydrate
3. The sedimentation period of core sediment in the Chukchi Sea and East Siberian Sea was divided into Unit 3 (last glacial maximum), Unit 2 (deglacial), and Unit 1 (interglacial). Unit 3 sediments were transported by sea ice and currents from the Kolyma and Indigirka Rivers. Unit 2 sediments were from the Kolyma and Indigirka Rivers flowing into the East Siberian Sea as well as from the Mackenzie River and the Canadian Archipelago flowing into the Beaufort Sea. Unit 1 sediments were transported by sea ice and currents from Northern Canada and the East Siberian Sea, but coarse-grained sediments were derived by sea ice from the Canadian Archipelago.

V. Application Plans of R&D Results

1. Use in the areas of Science and Technology

- Used for research on the Arctic manganese nodule and paleo-environment change in the Arctic

2. Use in the areas of industry
 - Used as important basic data for the development of marine resources in the Arctic Ocean

3. Use in the areas of the decision of policies
 - Provide scientific basic data for national policy related to the development of marine resources in the Arctic Ocean



목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국내 기술개발 현황	5
제 2 절 국외 기술개발 현황	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절 연구 지역	9
제 2 절 시료 채취	13
제 3 절 연구 방법	21
제 4 절 분석 결과	28
제 5 절 요약	88
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	90
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	92
제 6 장 참고문헌	93

제 1 장 서론

북극해는 세계 대양 중에서 가장 면적이 작고, 대륙붕이 전체 표면적의 52.7 %를 차지하는 독특한 해역이다(Jakobsson et al., 2003; Jakobsson et al., 2004; Stein, 2019). 북극해는 유라시아 대륙과 북아메리카 대륙으로 둘러싸여 있으며, 로모노소프 해령(Lomonosov Ridge)을 기준으로 유럽을 포함하는 해역은 동북극해, 캐나다를 포함하는 해역은 서북극해로 나누어진다. 2016년부터 2019년까지 아라온호를 활용하여 수행된 4회의 탐사는 서북극해의 척치해(Chukchi Sea), 동시베리아해(East Siberian Sea), 보퍼트해(Beaufort Sea)에서 수행되었으며, 2020년에는 전 세계적으로 유행한 코로나 바이러스 감염증-19 (COVID-19)에 의해 북극해 탐사가 취소되었다.

최근 급속한 지구 온난화로 인해 북극 자원개발 및 수송 여건이 크게 개선되었으며, 북극해 연안국들은 국가적 차원에서 북극의 자원개발과 인프라 건설 사업을 활발히 추진하고 있다. 북극에는 지금까지 발견되지 않은 가스와 석유의 약 22%가 매장되어 있을 것으로 추산되었으며, 망간단괴를 비롯한 광물자원 또한 세계 매장량의 16%가 북극에 있을 것으로 추산된다(USGS, 2008).

망간단괴는 일반적으로 수심 4,000-6,000m의 심해저에서 침전에 의해 형성된 금속 덩어리를 말하며, 철과 망간 뿐만 아니라 구리, 니켈, 코발트, 희토류 금속 등 경제적 가치가 있는 원소들을 다량 포함하기 때문에 미래광물자원으로 평가되고 있다. 북극해의 망간단괴는 1868년 카라해에서 최초로 발견되었으며(Murray and Renard, 1891), 카라해와 바렌츠해의 넓은 대륙붕에서 주로 발견되고 척치해와 동시베리아해의 일부 해역에서 발견된 바 있다(Nordenskjold, 1881; Baturin and Dubinchuk, 2011; Baturin et al., 2016). 북극해 망간단괴는 심해저 망간단괴와 달리 수심 200 m 내외의 대륙붕 환경에 주로 분포하고 있으며, 심해저 망간단괴와는 다른 특징과 형성 메커니즘을 가질 것으로 예상된다. 그러나, 현재까지 북극해 망간단괴에 대한 연구는 수 개의 단괴들에 대한 화학조성 분석만이 수행되었을 뿐(Baturin and Dubinchuk, 2011; Baturin et al., 2016), 단괴의 형태, 광물학적 분석 및 주변 퇴적물에 대한 분석 결과는 보고된 바 없다. 우리나라는 아라온호를 활용한 2012년 ARA03B Expedition 기간 동안 북극 동시베리아해에서 생물 시료 채취를 위한 드래지(dredge) 작업 중 우연히 망간단괴를 발견하였다. 이번 과제에서는

지난 ARA03B Expedition에서 발견된 동시베리아해 망간단괴의 분포 범위를 확장하고 다량의 망간단괴 시료를 채취하기 위해 2016년(ARA07C Expedition), 2018년(ARA09C Expedition), 2019년(ARA10C Expedition) 세 차례의 동시베리아해 탐사에서 드랫지를 실시하고 박스코어를 획득하였다. 탐사를 통해 획득한 2,000여 개의 망간단괴에 대하여 형태학적 · 광물학적 · 지화학적 분석을 실시하였으며, 그 특성을 면밀하게 파악한 후 동시베리아해에서 산출되는 망간단괴의 성인을 규명하였다. 또한, 박스코어 퇴적물의 특성을 분석하여 망간단괴의 형성환경을 알아보고자 하였다.

북극해는 베링해협(Bering Strait)과 프람해협(Fram Strait)을 통해 태평양수와 대서양수가 유입되며, 해빙 덮개(ice cover)와 열 염분 순환을 조절하는 심충수의 형성을 통해 전지구 기후에 영향을 미친다(Callaghan et al., 2011). 북극해의 기후 변화는 전지구적 기후 변화에 대한 증폭된 신호를 나타내며, 따라서 미래 기후 변화를 예측하기 위해서는 북극해의 고기후 및 고해양을 연구하는 것이 필수적이다. 북극의 해양퇴적물은 과거 기후 변화에 대한 기록을 포함하고 있으며, 퇴적물 내에 포함되어 있는 광물조성, 지화학 조성, 유기물, 생물기원 탄산염 등 다양한 프록시(proxy)를 이용한 연구들이 수행되었다(Naidu and Mowatt, 1983; Rachold, 1999; Wahsner et al., 1999; Vogt et al., 2001; Viscosi-Shirley et al. 2003a). 북극해는 많은 양의 육성 기원 퇴적물들이 매년 주변 대륙의 하천(227×10^6 t/y)과 연안 침식 ($\sim 430 \times 10^6$ t/y)에 의해 공급되고 있으며, 기후에 따른 해빙과 빙산의 분포 면적 변화는 퇴적 환경에 직접적인 영향을 준다(Phillips and Grantz, 2001; Backman et al., 2004; Darby et al., 2006; Stein et al., 2010; Polyak and Jakobsson, 2011; Park et al., 2017). 북극해의 육성 기원 퇴적물들은 주변 대륙으로부터 유입되어 표층 해류, 해빙 및 빙산에 의해 이동된다. 북극 표층 해양 순환은 보퍼트해에 위치하는 시계 방향으로 회전하는 보퍼트 환류(Beaufort Gyre; BG)와 북극횡단류(TransPolar Drift; TPD)의 두 가지 순환 시스템이 있다(Fig. 1a) (Tremblay et al., 1997; Darby and Bischof, 2004). 척치해 대륙붕에는 베링해협(Bering Strait)을 통해 태평양수가 유입되며, 유입된 태평양수의 일부는 보퍼트해 연안으로 흐르는 알래스카 연안류(Alaska coastal current)와 시베리아 연안을 따라 흐르는 동시베리아 연안류(East Siberian coastal current)를 형성한다(Naidu and Mowatt, 1983; Royer and Emery, 1987; Weingartner et al., 2005). 점토광물을 포함한 세립질의 입자들은 해류에 의

해서도 먼 거리를 이동할 수 있으며, 조립질 입자들은 해빙과 빙산을 통해 기원지로부터 먼 곳에 퇴적되기도 한다(Wagner et al., 2011; Darby et al., 2012). 빙산에 의한 퇴적물의 이동은 빙기에 중요한 역할을 한다. 빙기에는 로렌타이드 빙상(Laurentide ice sheet), 유라시아 빙상(Eurasian ice sheet) 등 북극해에 빙상이 넓게 분포하였다(Andrews et al., 1995; Darby et al., 2011). 빙상은 육성 기원 퇴적물을 다량 포함하고 있으며, 빙상으로부터 떨어져 나온 빙산이 녹게 되면 그 속에 포함하고 있던 퇴적물들을 해저 바닥에 떨어뜨리게 되는데, 이를 빙운쇄설물(IRD; Ice Rafted Debris)라 부른다. 빙운쇄설물은 대체로 조립질 입자들로 구성되어 있는데, 일반적으로 $250\mu\text{m}$ 이상의 조립한 입자들은 대부분 빙산에 의해서만 운반되는 것으로 알려져 있다(Darby et al., 2011; Zou, 2016). 따라서, 북극해 해양 퇴적물에 대한 퇴적시기에 따른 기원지 변화를 통해 북극 빙상의 역사와 고해양 순환 패턴에 대한 이해를 높일 수 있다.

가스 하이드레이트(gas hydrate)는 물과 가스가 결합한 얼음과 같은 고체 상태로 존재하고, 저온 고압 상태에서 비교적 안정하지만, 온도와 압력의 변화에 따라 민감하게 상이 변화한다. 최근 급격한 대기 및 해양의 온난화는 북극의 영구동토층에 존재하는 가스 하이드레이트를 해리시켜, 온실가스인 메탄을 방출시키고 지구온난화를 가속화하는 것으로 알려졌다(Kvenvolden, 1988; Milkov, 2004; Boswell and Collett, 2011; Ruppel and Kessler, 2017). 이러한 이유로 북극해의 해저환경 및 메탄 방출 현상은 많은 연구자들의 관심을 받고 있으며, 국내에서도 2010년부터 아라온호를 이용한 북극해 탐사가 수행되고 있다(Paull et al., 2015; Kobayashi et al., 2016; Jin et al., 2018). 2013년 수행된 ARA04B Expedition 동안 보퍼트해의 다중빔 심층 탐사(multibeam bathymetric mapping survey)를 통해 수심 약 740 m에서 3개, 약 282 m에서 1개, 약 420 m에서 1개의 진흙화산(Mud Volcano, MV)이 발견되었으며, 각 진흙화산들은 수심에 따라 MV의 명칭이 부여되었다(Paull et al., 2015).

북극 보퍼트해의 420 MV에서는 ROV (remoted operated vehicle) 탐사를 통해 해저로부터의 메탄 방출을 확인하였으며, 2017년 수행된 ARA08C Expedition에서 420 MV에 대한 재탐사를 실시하였으며, MV의 지속적인 메탄 방출과 규모의 확대를 확인하였다(Jin et al., 2018). 한편, 2016년 수행된 ARA07C Expedition 기간동안 쳐치해저고원(Chukchi Plateau) 남서쪽 사면의 다중빔 심층 탐사를 통해 수심 약 600 m에서 마운드(mound) 구조를 발견하였으며, 2018년 탐사에서 주변 지역에 대

한 후속 탐사를 통하여 총 8개의 해저 마운드 구조를 발견하여, ‘아라온 마운드 (ARAON Mound; AM)’라는 이름을 부여하였다. 마운드 구조는 메탄 분출에 의해 지형이 불록하게 솟아오른 것으로 여겨지는데(Sassen et al., 2004; Paull et al., 2008; Freire et al., 2011; Serie et al., 2012; Somoza et al., 2014; Hong et al., 2017), 메탄 가스의 상승으로 인해 탄성과 탐사에서 음향 공백대가 나타나며, AM6에서 시추한 ARA07C-St13에서는 코어 퇴적물에서 메탄 하이드레이트를 인양하였다(Jin and Shipboard Scientific Party, 2018. 2019).

본 연구에서는 척치해저고원 사면과 아라온 마운드에서 획득한 코어 퇴적물에 대하여 광물학적 분석을 수행하여 시기별 퇴적물의 기원지 변화를 추정하였으며, 이를 바탕으로 고환경 변화를 알아보았다.



제 2 장 국·내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술 개발 현황

국내에서 북극 망간단괴는 아라온호를 이용한 2013년 ARA03B 탐사에서 최초로 획득하였으나, 관련된 연구는 현재까지 보고된 바 없다. 우리나라 1980년대부터 북동태평양 지역 망간단괴에 대한 연구와 탐사를 꾸준히 시행하고 있다. 1994년에 유엔으로부터 클래리온-클래퍼턴 해역(CCZ) 내에 할당광구 150,000 km²을 승인받았으며, 2002년에는 75,000 km²의 우리나라 단독개발광구를 확정하였다(MOMAF, 2003). 90년대~2000년대에는 망간단괴의 특성과 부존률 등 다양한 연구활동이 수행되었으며(Lee et al., 1995; Choi et al., 2002)(Fig. 1), 현재는 정밀탐사, 환경탐사와 더불어 채광, 제련 및 양광에 대한 실험을 수행하고 있다.

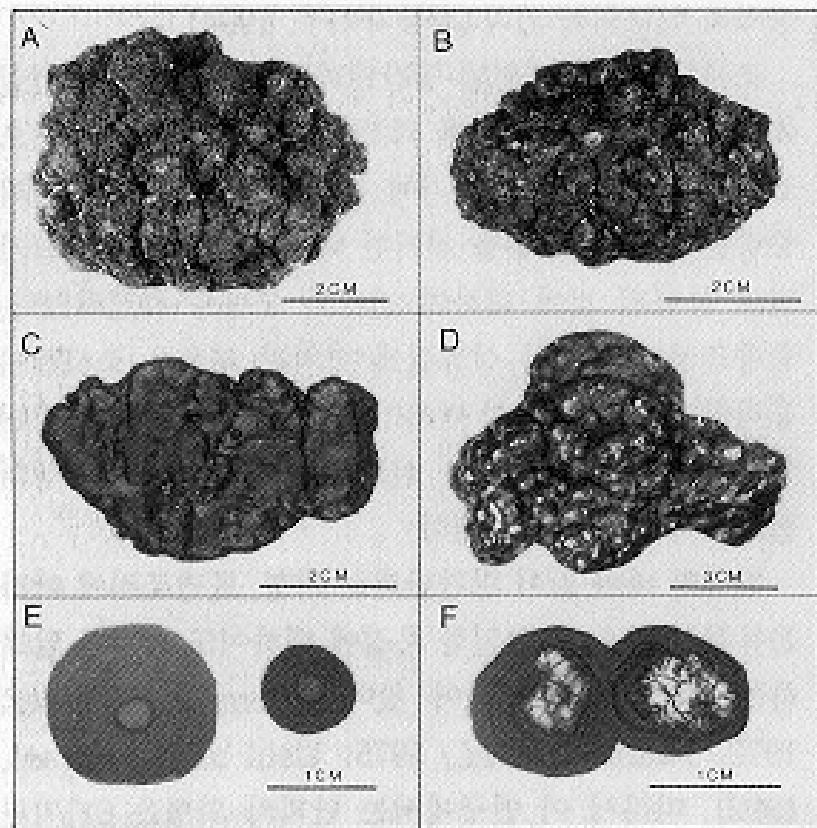


Fig. 1. Photographs showing external shapes and surface textures of manganese nodules from the study area (Lee et al., 1995).

국내에서 해양 퇴적물을 이용한 기원지 및 고환경 연구는 한반도 주변 해역에서 주로 수행되고 있으며(Fig. 2), 인도양, 태평양 등의 대양에서도 수행되고 있다. 광

물조성은 퇴적물 기원지의 모암 특징을 반영하기 때문에, 현재의 퇴적 환경 해석에 이용될 수 있을 뿐 아니라 코어 퇴적물 분석을 통해 과거 환경에 대한 해석에 이용될 수 있다. 황해의 경우 중국과 한국의 강들로부터 많은 쇄설성 퇴적물을 공급받기 때문에, 많은 연구자들이 퇴적물 기원지에 관심을 가져왔고, 표층 퇴적물과 코어 퇴적물에 대한 많은 광물학적 연구가 수행되었다.

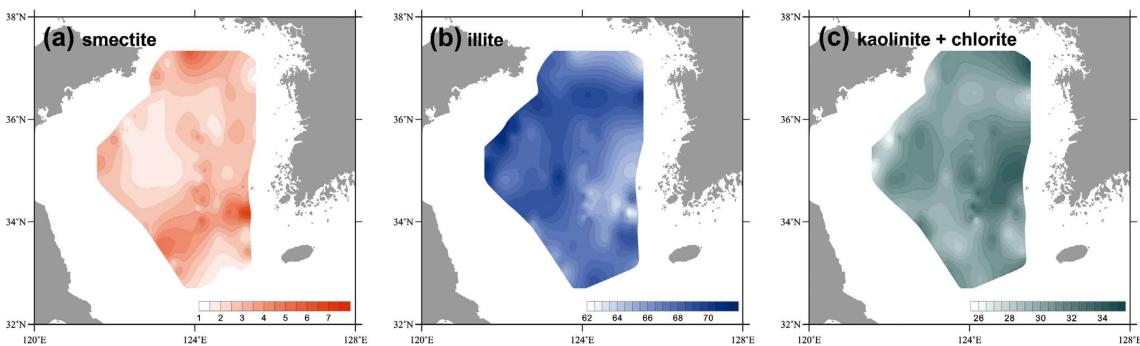


Fig. 2. Distribution patterns of major clay mineral contents (%) in CYSM. (a) smectite; (b) illite; (c) kaolinite + chlorite. (Koo et al., 2018)

제 2 절 국외 기술 개발 현황

북극해의 망간단괴는 1868년 카라해에서 최초로 발견되었으며(Murray and Renard, 1891), 카라해와 바렌츠해의 넓은 대륙붕에서 주로 발견되고 척치해와 동시 베리아해의 일부 해역에서 발견된 바 있다(Nordenskjold, 1881; Baturin and Dubinchuk, 2011; Baturin et al., 2016)(Fig. 3). 북극해 망간단괴 연구는 대부분 소량의 단괴에 대한 지화학 분석 결과를 제시하고 있으며, 형태와 광물학적 결과는 거의 보고되지 않았다. 카라해의 경우, 최근 단괴의 형태, 지화학적 분석을 통한 단괴의 성인을 결정하는 연구가 수행된 바 있다(Vereshchagin et al., 2019). 카라해 망간단괴는 주로 원반형으로 산출되며(Fig. 4), 단괴의 성인은 Mn/Fe ratio와 희토류 원소 함량을 기반으로 속성기원 망간단괴로 결정되었다. 그러나, 카라해를 제외 한 동시베리아해, 척치해, 바렌츠해의 망간단괴는 형태와 광물 조성에 대한 정보가 전혀 보고되지 않았으며, 카라해와 비교하여 많은 탐사가 수행되지도 못하였다.

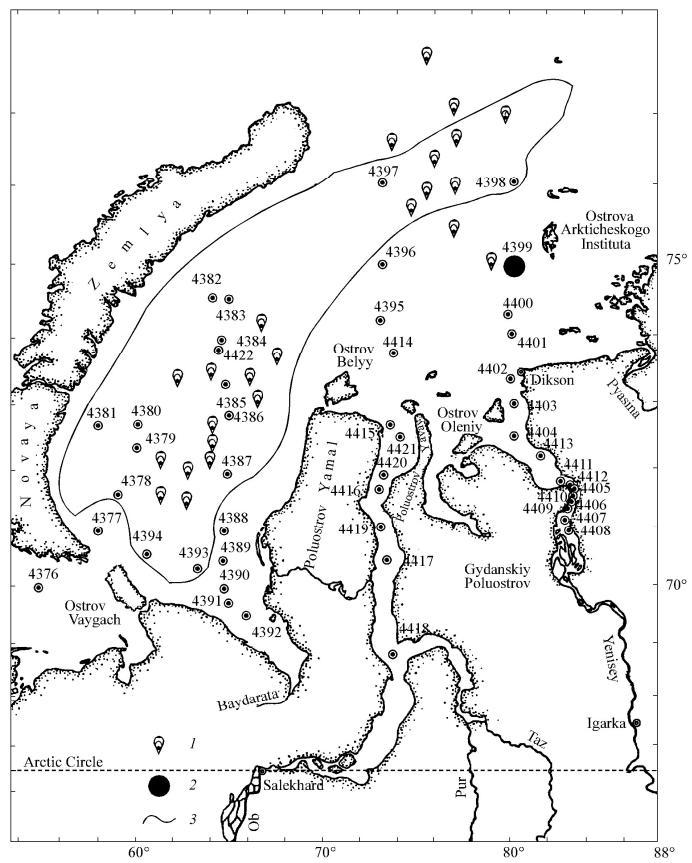


Fig. 3. Distribution of ferromanganese nodules in the Kara Sea (Bogdanov et al., 1995).

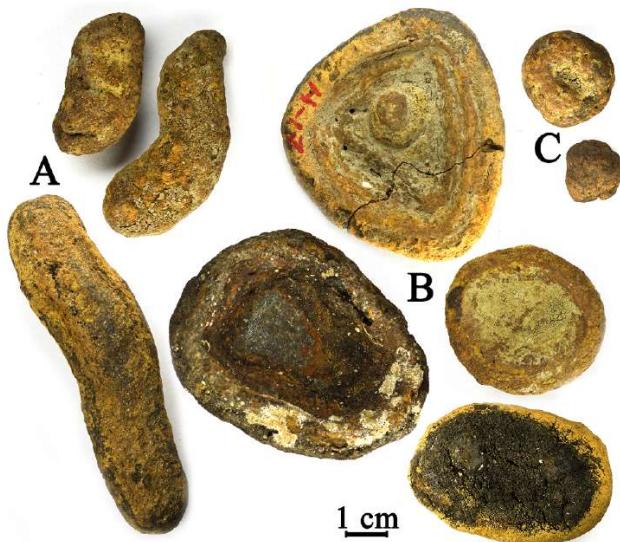


Fig. 4. Photographs of morphological type of Fe-Mn nodule in the Kara Sea (Vereshchagin et al., 2019)

북극해의 주요 퇴적물 기원지에는 캐나다 북극 군도(Canada Archipelago), 북아메리카-알래스카 및 유라시아 대륙에 위치한 많은 강들이 있으며(Wahsner et al., 1999; Fagel et al., 2014), 이들은 다양한 지질시대의 암석과 지구조를 가지기 때문에, 광물학적 연구를 통한 기원지 구분이 유용하게 이용될 수 있다(Rachold, 1999; Phillips and Grantz, 2001; Patchett et al., 2004; Stein, 2008; Fagel et al., 2014). 캐나다 북극 군도는 세일과 이암이 풍부한 고생대와 중생대의 퇴적암으로 구성되며, 북아메리카는 탄산염 광물이 풍부하다(Phillips and Grantz, 2001; Patchett et al., 2004). 동시베리아 지역은 선캄브리아기 및 캄브리아기의 석회암과 쥬라기에서 백악기 시대의 퇴적암, 제4기 퇴적물로 구성된다(Rachold, 1999; Stein, 2008). 북극 해에서 수행된 많은 광물학적 연구들은 북극해 주변 대륙들의 지질 특성 차이로 인해 석영(qaurtz), 백운석(dolomite), 카올리나이트(kaolinite)의 함량을 통하여 퇴적물의 기원지를 구분할 수 있다고 보고하였다.

진흙화산은 가스 및 유체와 함께 다량의 퇴적물이 표면으로 분출되어 형성된 퇴적체를 말한다(Milkov et al., 2000; Kopf, 2002; Bonini, 2012; Paull et al., 2015; Mazzini and Etiope, 2017). 진흙화산은 심부의 점토층 내의 압력이 높아져 과압 상태가 되면 단층을 따라 퇴적물이 표층까지 이동한 후 분출하여 형성되며(Mazzini et al., 2009; Bonini, 2008; Mazzini and Etiope, 2017), 각 퇴적체의 크기와 구조 및 분출되는 유체와 퇴적물이 매우 다양하며, 분출 기간 또한 수 시간에서 수백 년으로 크게 다르다(Zoporowski and Miller, 2009; Bonini, 2012; Paull et al., 2015). 해저의 진흙화산은 흑해, 카디스만, 카스피해, 지중해, 멕시코만, 인도양, 카리브해, 노르웨이해, 대서양, 태평양, 중국해, 북극해 등 다양한 해역에서 발견되었다(Milkov et al., 2000; Dimitrov, 2002; Kholodov, 2002; Hensen et al., 2004; Mazzini et al., 2004; Mhammedi et al., 2008; Mazzini and Etiope, 2017).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구지역

2016년부터 2019년까지 쇄빙선 아라온을 활용하여 수행된 4차례의 북극해 탐사들의 연구지역은 크게 동시베리아해, 척치해 및 보퍼트해로 구분할 수 있으며, 채취한 시료는 망간단괴와 코어 퇴적물로 구분된다.

동시베리아해 해역 탐사는 ARA07C Expedition, ARA09C Expedition, ARA10C Expedition에서 수행되었다. 이번 과제에서 수행된 4차례의 탐사동안 망간단괴는 동시베리아해에서만 확인되었다. ARA07C Expedition 기간동안 망간단괴 탐사를 위해 지난 ARA03B Expedition에서 망간단괴가 발견되었던 정점 주변에서 드래지를 실시하였으며, 수심 185 m의 ARA07C-St01에서 망간단괴를 발견하였다. 이후 ARA09C Expedition와 ARA10C Expedition 기간동안에는 드래지와 박스코어리를 이용하여 추가적인 망간단괴와 퇴적물을 획득하였다. 3차례의 탐사동안 망간단괴는 수심 184 - 240 m의 대륙붕에서 총 10개의 정점에서 발견되었다. ARA10C Expedition에서는 망간단괴 지역에서 ARA10C-St16과 ARA10C-St41 정점에서 박스코어 퇴적물을 획득하였다. 박스코어 퇴적물은 망간단괴를 포함하고 있었으며, 망간단괴의 형성환경을 알아보기 위하여, 광물학적-지화학적 분석이 수행되었다.

동시베리아해의 코어 퇴적물은 ARA07C Expedition 동안 동시베리아해 대륙붕에서 척치 분지의 사면으로 이어지는 구간에서 획득하였다. 동시베리아해 대륙붕에서 ARA07C-St07 (수심 40 m), ARA07C-St05 (수심 60 m) 두 개의 중력코어를 획득하였으며, 척치 분지로 이어지는 사면에서 ARA07C-St03 (수심 308 m)와 ARA07C-St02B (수심 648 m) 두 개의 중력코어를 획득하였다.

척치해 탐사는 ARA07C Expedition과 ARA09C Expedition 동안 수행되었다. ARA07C Expedition기간 동안 ARA07C-St13과 ARA07C-St14에서 마운드 구조를 발견하였으며, 코어 퇴적물 하부에서 가스하이드레이트를 발견하였다. 이후 ARA09C Expedition 기간동안 연속적인 마운드 구조들을 발견하였으며, 이를 아라온 마운드(ARAON Mound)라고 명명하였다. 총 8개의 마운드로 구성된 아라온마운드는 수심이 가장 깊은 서쪽의 마운드를 AM1이라고 명명하였으며, 동쪽으로 갈수록 번호가 증가하여 가장 수심이 얕은 마운드를 AM8로 명명하였다. 아라온 마운드는 원형의 수 미터에서 수 킬로미터까지의 크기를 갖는 해저면에서 돌출된 구조들

로서 심부에서 생성한 유체 및 가스가 상부로 이동하면서 생성된 구조들로 판단된다. ARA09C Expedition 기간 동안 취득한 아라온 마운드의 탄성파 탐사자료는 Figure 7과 같다. ARA09C Expedition 기간 동안 아라온 마운드의 AM01, AM06, AM07에서 퇴적물 코어를 획득하였고, 비교를 위해 마운드 구조가 형성되지 않은 AM06과 AM07 사이의 ARA09C-St13에서 퇴적물 코어를 획득하였다. 또한, 아라온 마운드에서 측지 분지로 이어지는 사면의 ARA09C-St03 (수심 820 m), ARA09C-St08 (수심 813 m)에서 퇴적물 코어를 채취하였다.



Fig. 5. Location map of core site during the ARA07C Expedition

2017년 수행된 ARA08C Expedition 동안 보퍼트해 탐사가 수행되었다. 보퍼트해 탐사는 멕켄지 트러프 지역과 이전 ARA04B Expedition에서 발견되었던 420 MV으로 구분된다. 멕켄지 트러프의 광물학적 특성을 알아보기 위해, 멕켄지강의 하구로부터 멕켄지 트러프를 따라 3개의 정점(ARA08C-St02, ARA08C-St03, ARA08C-St04)으로부터 박스코어 퇴적물을 채취하였다.

420 MV는 아라온 마운드와 마찬가지로 심부에서 생성된 유체 및 가스와 함께 퇴적물이 분출되어 형성되는 것으로 판단된다. ARA08C Expedition 동안 취득한 420 MV의 탄성파 탐사자료는 Figure X와 같다. 420 MV의 광물학적 특성을 알아보기

위해, 420 MV의 중심으로부터 외곽까지 4개의 정점(ARA08C-St15, ARA08C-St16, ARA08C-St17, ARA08C-St18)으로부터 박스코어 퇴적물을 채취하였으며, 비교를 위해 동일한 수심(420 m)의 정점 ARA08C-St21에서 박스코어 퇴적물을 채취하였다.

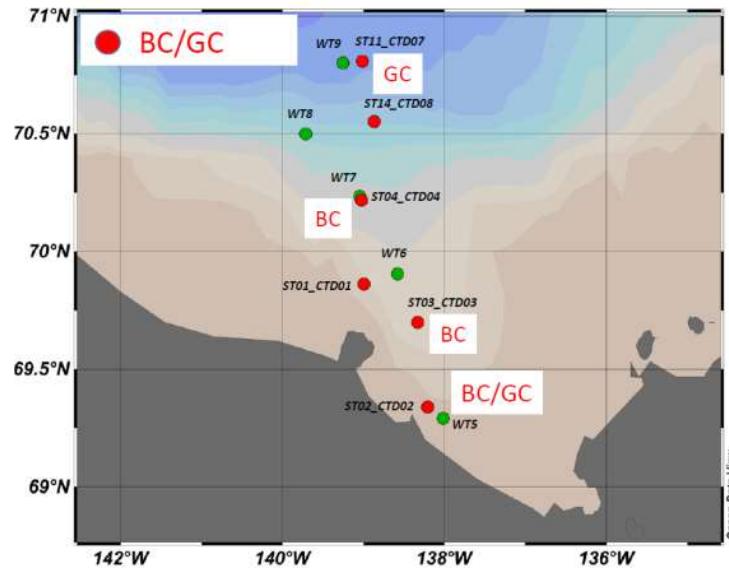


Fig. 6. Location map of core site during the ARA08C Expedition

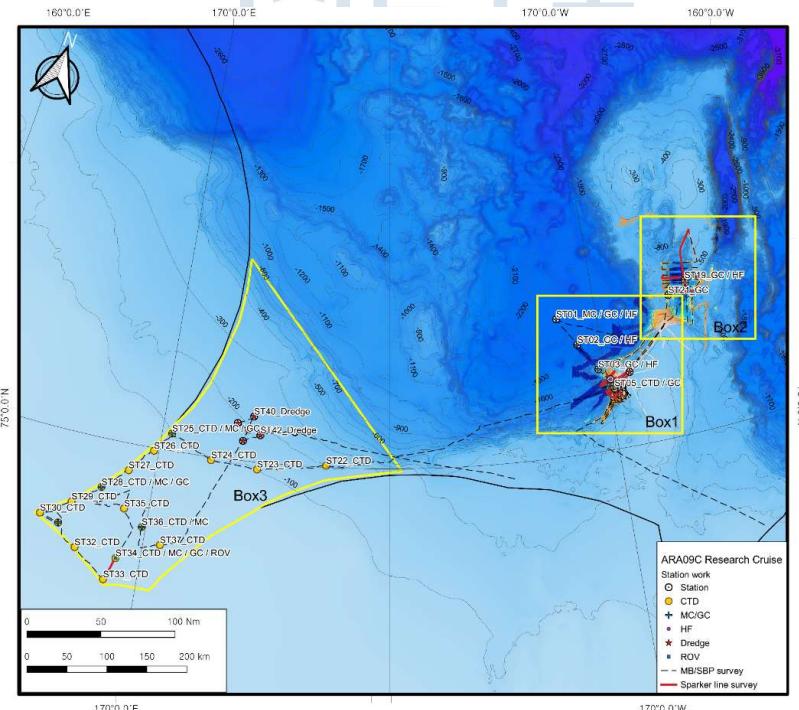


Fig. 7. Location map of core site during the ARA09C Expedition

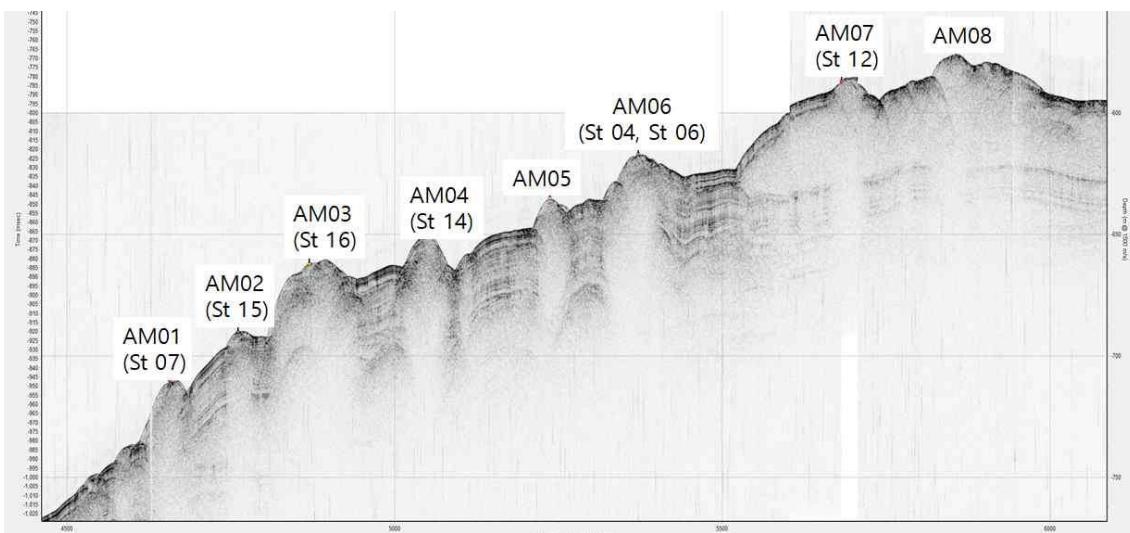


Fig. 8. SBP data of ARAON Mound structure

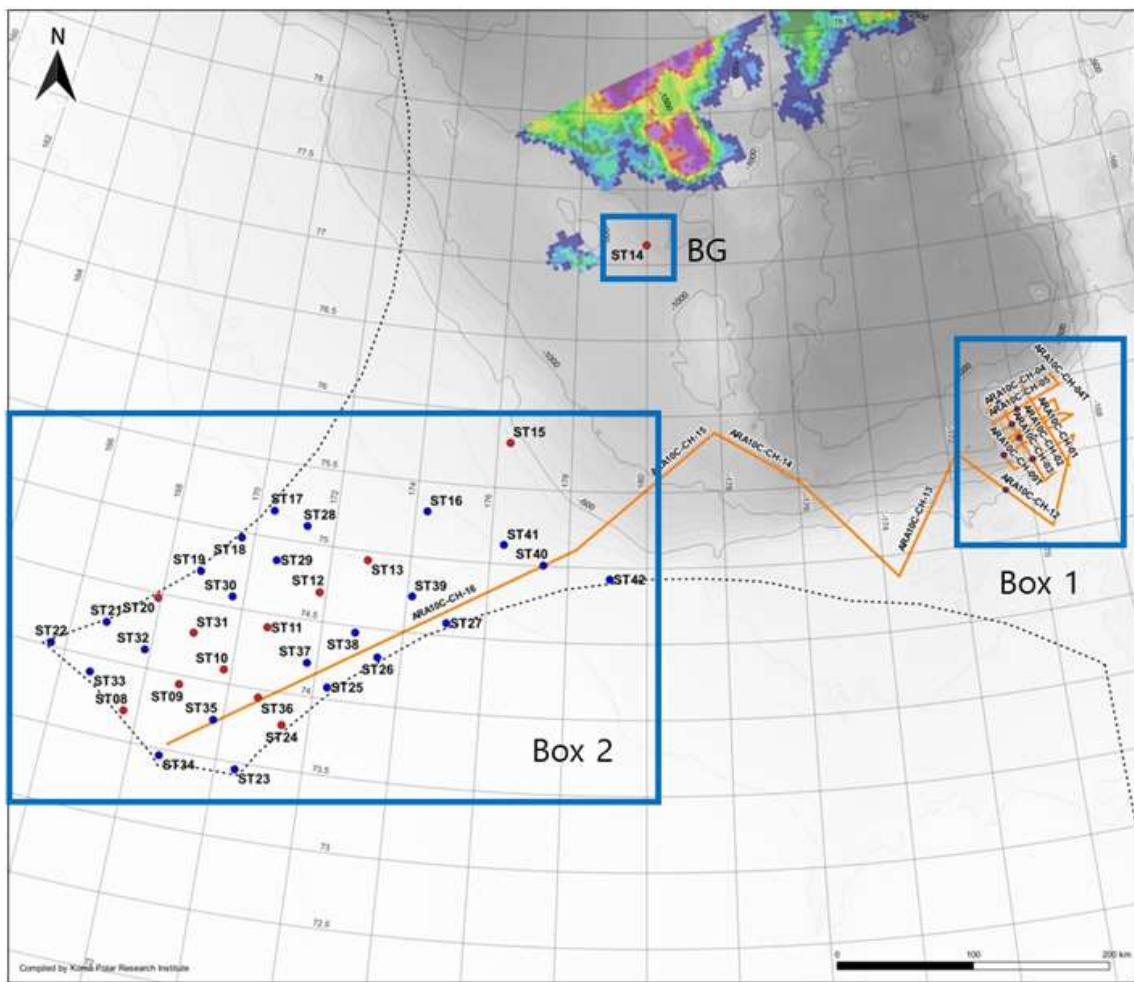


Fig. 9. Location map of core site during the ARA10C Expedition

제 2 절 시료 채취

1. 망간단괴 채취

한국극지연구소의 쇄빙선 아라온을 이용한 2016년 ARA07C Expedition, 2018년 ARA09C Expedition, 2019년 ARA10C Expedition 기간동안 동시에 베리아해 지역의 총 12개 정점에서 드래지(dredge)와 박스 코어러(boxcorer, BC)를 이용하여 망간단괴와 주변 퇴적물을 채취하였다(Fig. 10 and 11). 망간단괴를 채취한 정점에 대한 정보는 Table 1과 같다.

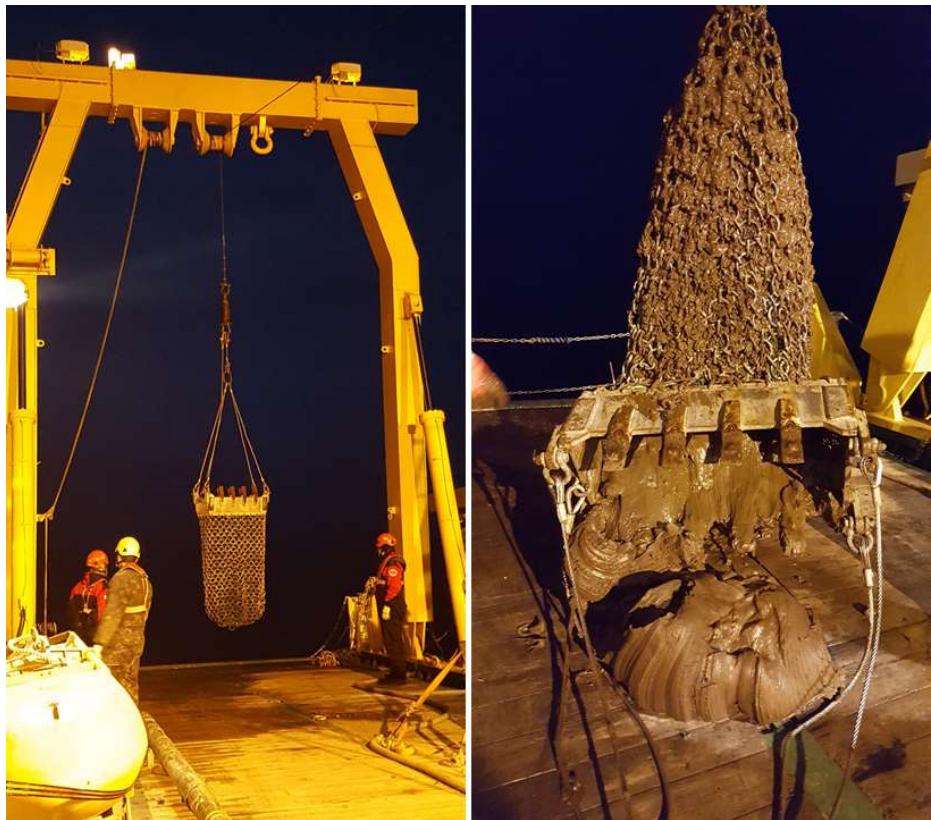


Fig. 10. Dredge sampling during the ARA09C Expedition

ARA07C Expedition 기간에는 탐사시간 부족으로 ARA07C-St01 한 정점에서만 드래지를 실시하였으며, 획득한 망간단괴 중 11개의 망간단괴를 연구에 이용하였다 (Fig. 12). ARA09C Expedition 기간 동안에는 정점 ARA07C-St01 주변 해역의 6개 정점(ARA09C-St38, ARA09C-St39, ARA09C-St40, ARA09C-St41, ARA09C-St42, ARA09C-St43)에서 드래지를 실시하였으며, 약 2,000여 개의 망간단괴를 획득하였다

(Figs. 13–18). ARA09C의 모든 정점은 수심 180–240 m의 대륙붕에 위치한다. ARA10C Expedition 기간 동안은 3개 정점에서 드래지지를 실시하였으나, 정점 ARA10C-St40과 정점 ARA10C-St15에서는 망간단괴 획득을 하지 못하였다. 수심 201 m의 정점 ARA10C-St40에서는 기술적 문제로 인해 망간단괴를 획득하지 못한 것으로 판단되었으며, 수심 370 m의 정점 ARA10C-St15는 망간단괴가 충분히 분포하지 않는 것으로 판단되었다. 정점 ARA10C-St16과 ARA10C-St41에서는 박스 코어리를 이용하여 퇴적물을 채취하였다. 박스코어 ARA10C-St16에서는 약 70개의 망간단괴가 발견되었으며, 박스코어 ARA10C-St41에서는 9개의 망간단괴를 획득하였다.

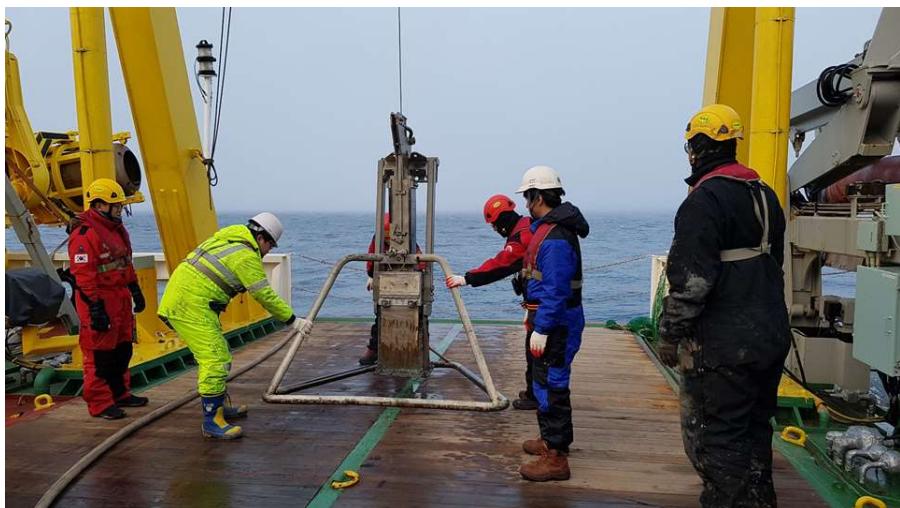


Fig. 11. Sediment coring by box corer (BC) during the ARA09C



Fig. 12. Manganese nodule acquired during the ARA07C Expedition



Fig. 13. Manganese nodule acquired from the site ARA09C-St38



Fig. 14. Manganese nodule acquired from the site ARA09C-St39



Fig. 15. Manganese nodule acquired from the site ARA09C-St40



Fig. 16. Manganese nodule acquired from the site ARA09C-St41



Fig. 17. Manganese nodule acquired from the site ARA09C-St42

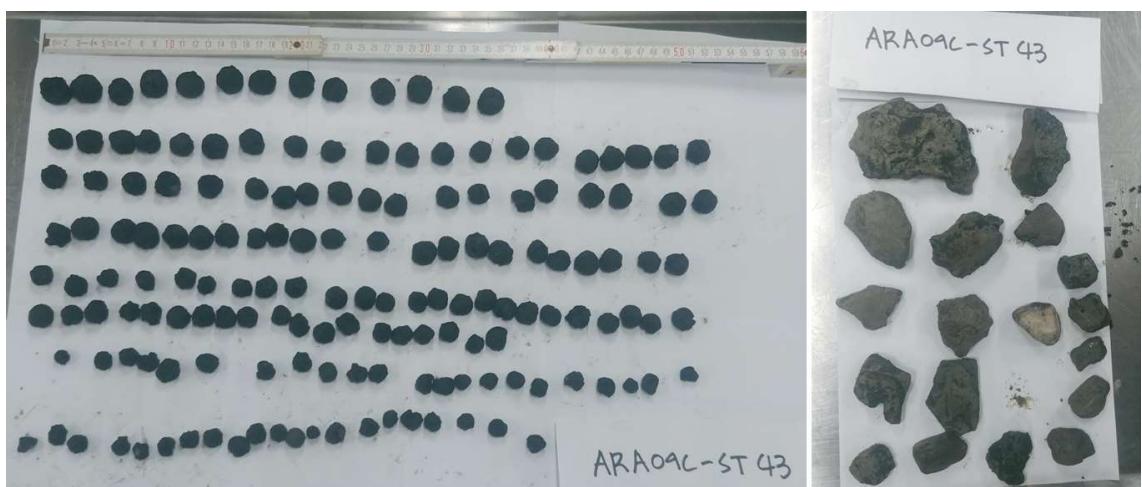


Fig. 18. Manganese nodule acquired from the site ARA09C-St43

Table 1. Information for the site acquired manganese nodules

Study Area	Expedition Site	Location		Water depth (m)	N of Mn nodules	Remarks
		Latitude	Longitude			
East Siberian Sea	ARA07C-St01	75.3563°N	173.7641°E	185	11	dredge
	ARA09C-St38	75.3563°N	173.7641°E	196	410	dredge
	ARA09C-St39	75.4146°N	173.2346°E	194	257	dredge
	ARA09C-St40	75.5066°N	173.9313°E	215	334	dredge
	ARA09C-St41	75.2219°N	173.5572°E	184	162	dredge
	ARA09C-St42	75.3158°N	174.3064°E	204	961	dredge
	ARA09C-St43	75.2492°N	174.8375°E	240	172	dredge
	ARA10C-St15	75.8004°N	176.3328°E	370	-	dredge
	ARA10C-St16	75.3052°N	174.2936°E	203	70	Box corer
	ARA10C-St40	75.0026°N	177.3775°E	201	-	dredge
	ARA10C-St41	75.1250°N	176.3405°E	203	9	Box corer
	ARA10C-St42	75.1250°N	176.3405°E	201	36	dredge

Table 2. Information for the site acquired core sediment containing manganese nodules

Study Area	Expedition Site	Location		Water depth (m)	Length (cm)	Remarks
		Latitude	Longitude			
East Siberian Sea	ARA10C-St16	75.3052°N	174.2936°W	203	(BC) 31 (GC) 285	Mn nodule
	ARA10C-St41	75.1250°N	176.3405°W	203	(BC) 32	Mn nodule

2. 코어 퇴적물 채취

동시베리아해, 척치해, 보퍼트해 탐사를 통해 총 20개의 정점에서 코어 퇴적물을 확보하였다. 동시베리아해 대륙붕-대륙사면 지역의 코어 퇴적물은 2016년 ARA07C Expedition 기간 동안 총 4개 정점에서 중력 코어러(gravity corer, GC)와 박스 코어러(box corer, BC)를 통해 획득한 퇴적물을 이용하였다. 척치해 대륙사면 퇴적물은 2018년 ARA09C Expedition 기간 동안 정점 ARA09C-St03과 ARA09C-St08에서 중력 코어러를 통해 획득한 퇴적물을 이용하였다. 척치해의 아라온 마운드에서는 ARA07C Expedition와 ARA09C Expedition 기간 동안 총 5개의 정점에서 중력 코어러를 이용하여 퇴적물을 획득하였으며(Fig. 19), 비교를 위해 아라온 마운드 사이에 위치한 정점 ARA09C-St13에서 중력 코어를 채취하였다.

보퍼트해의 연구지역은 맥肯지 트러프와 420 MV로 구분된다. 맥肯지 트러프에서는 2017년 ARA08C Expedition 동안 맥肯지 트러프를 따라 3개의 박스코어를 획득하였다. 420 MV는 MV의 중앙으로부터 외곽까지 4개의 박스코어를 채취하였으며, 비교를 위해 주변 동일한 수심을 가지는 정점 ARA08C-St21에서 박스코어를 채취하였다.

퇴적물 채취에 이용한 중력 코어러의 코어 배럴 길이는 1 – 3 m이고, 1.0 ton의 중량을 갖는다. 중력 코어러로 채취한 퇴적물 코어 보관 및 이동을 위해 아라온 선상에서 1 m에서 1.5 m 길이로 코어를 절단하여 실험실로 이동하였다. 일부 퇴적물 코어는 실험실에서 퇴적상 기술 및 가스 하이드레이트 채취를 위해 절개하였다. 실험실에서 절개한 퇴적물 코어 중 절반은 작업용 코어(working core)로 사용하였으며, 나머지 절반은 보관용 코어(archived core)로 약 4°C로 냉장 보관하여 운반하였다. 분석에 이용된 부시료들은 절개된 코어 퇴적물에서 동일한 간격을 두고 1cm 두께의 퇴적물을 채취하였으며, 동일한 간격 내에서 퇴적상이 달라지는 경우 추가적으로 부시료를 채취하였다. 박스코어의 경우 2-4 cm 간격으로 부시료를 채취하였으며, 중력 코어의 경우 10 cm 간격으로 부시료를 채취하였다.



Fig. 19. Sediment coring by a gravity corer (GC) during ARA09C Expedition

Table 3. Site information for sediment core during the ARA07C

Study Area	Site	Location		Water depth (m)	Length (cm)	Remarks
		Latitude	Longitude			
East Siberian Sea	ARA07C-St02B	76.7463°N	174.3203°E	648	(BC) 32 (GC) 345	
	ARA07C-St03	76.1074°N	172.6548°E	308	(GC) 378	
	ARA07C-St05	74.7589°N	170.4555°E	60	(GC) 139.5	
	ARA07C-St07	73.8146°N	169.1941°E	44	(BC) 32 (GC) 136.5	
Chukchi Sea	ARA07C-St13	75.6800°N	169.7365°W	610	(BC) 34 (GC) 235	Gas hydrate
	ARA07C-St14	75.7034°N	169.7592°W	635	(GC) 161	Gas hydrate

Table 4. Site information for sediment core during the ARA08C

Study Area	Expedition Site	Location		Water depth (m)	Length (cm)	Remarks
		Latitude	Longitude			
Mackenzie Trough	ARA08C-St02	69.3388°N	138.2060°W	38	(BC) 42	
	ARA08C-St03	69.6984°N	138.3286°W	140	(BC) 50	
	ARA08C-St04	70.2180°N	139.0204°W	407	(BC) 41.5	
420MV	ARA08C-St15	70.7910°N	135.5646°W	420	(BC) 46	
	ARA08C-St16	70.7916°N	135.5595°W	420	(BC) 48	
	ARA08C-St17	70.7918°N	135.5519°W	420	(BC) 46	
	ARA08C-St18	70.7896°N	135.5598°W	420	(BC) 52	
420MV- Control site	ARA08C-St21	70.7845°N	135.5221°W	420	(BC) 46	

Table 5. Site information for sediment core during the ARA09C

Study Area	Expedition Site	Location		Water depth (m)	Length (cm)	Remarks
		Latitude	Longitude			
East Siberian Sea	ARA09C-St03	75.9174°N	170.3189°W	820	475	
	ARA09C-St04	75.6797°N	169.7388°W	605	31 221	ARAON Mound 06
	ARA09C-St07	75.7116°N	169.7931°W	699	444	ARAON Mound 01
	ARA09C-St08	75.7397°N	169.8545°W	813	525.5	
	ARA09C-St12	75.6639°N	169.7430°W	588	33 260	ARAON Mound 07
	ARA09C-St13	75.6731°N	169.7391°W	615	38 434	

제 3 절 분석 방법

1. 망간단괴 분석

가. 망간단괴의 형태 기재

육안관찰에 의한 망간단괴의 형태 분류는 연구자마다 조금씩 달리하고 있으나, 1970년대에 체계화되어 일반적으로 외부형태, 표면조직, 크기에 따라 구분한다 (Grant, 1967; Meyer, 1973; Meylan, 1974; Halbach et al., 1979; Usui, 1979). 망간단괴의 외부형태는 단괴의 세 축(장축, 단축, 높이)에 의해 구분된다. 일반적으로 세 축의 길이가 비슷한 구형(spheroidal; S), 한 축이 길고 두 축이 짧은 타원체형(ellipsoidal, E), 두 축이 길고 한 축이 짧은 원반형(discoidal, D), 얇은 판 같은 모양의 평판형(tabular, T), 특정한 모양을 갖추지 않은 불규칙형(irregular, I), 몇 개의 단괴들이 서로 붙어서 산출되는 다단괴형(polybate, P)과 같이 구분되어지며, 연구 지역에 따라 특정한 형태를 가지는 경우 다른 명칭을 추가하기도 한다. 동시베리아 해에서 발견된 망간단괴들은 형태 구분을 위해 세 축의 길이와 무게를 측정하였으며, 단괴의 형태를 구형(S), 타원체형(E), 평판형(T), 불규칙형(I), 다단괴형(P), 튜브형(Tube) 등 6가지로 구분하였다.

망간단괴의 표면조직은 육안관찰을 통해 기재되며, 일반적으로 다음과 같이 4가지로 구분된다: 표면의 조직이 거칠고 보트리오이드(botryoids)가 발달한 거친 형(rough surface, r), 표면의 조직이 매끄럽고 광택이 나는 매끄러운 형(smooth surface, s), 거친 형과 매끄러운 형의 중간에 해당하는 점이형(transitional surface, t), 망간단괴의 일부가 퇴적물 속에 매몰되어 단괴의 하부와 해수가 접한 상부가 서로 다른 조직을 보이는 경우(dimorphic surface, d).

동시베리아해 망간단괴의 크기는 장축의 길이를 기재하였다. 장축의 길이가 3 cm 이하인 단괴를 small (s), 3–6 cm를 medium (m), 6 cm 이상을 large (l)로 구분하였다. 그러나, 3 cm 이하의 작은 단괴들의 비율이 높아 1 cm 이하의 단괴는 small 1 (s^1), 1–2 cm는 small 2 (s^2), 2–3 cm는 small 3 (s^3)으로 세분화하였다.

망간단괴의 형태는 일반적인 기재 방법을 따라 크기-형태-표면조직 순으로 ‘크기 [형태]표면조직’으로 기재되었다. 예를 들어, 거친 표면조직의 small 2 크기를 가지는 타원체형 망간단괴는 $s^2[E]r$ 과 같이 표현되며, 매끄러운 표면조직의 large 크기를 가지는 구형의 망간단괴는 $l[S]s$ 로 표현된다.

나. 망간단괴의 내부조직 관찰

망간단괴의 내부조직 관찰을 위해서 망간단괴를 진공 하에서 에폭시로 몰딩한 후, 절개면을 관찰하였다. 단괴의 내부조직은 거시적 조직과 미세조직으로 구분되었다. 거시적 조직 관찰을 위해 절개면에 대한 육안관찰 및 광학현미경 관찰을 실시하였으며, 미세조직 관찰을 위해 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, Field-Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하였다. FE-SEM은 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 JEOL사의 JSM-7610F 기기를 이용하였다.

망간단괴의 내부조직에 대한 분류는 국·내외의 여러 연구자들에 의해 각기 다르게 표현되어 왔으며, 북극해의 망간단괴에 대한 분류는 아직까지 보고된 바가 없다. 국내에서는 우리나라가 광구를 가지고 있는 북동태평양의 클래리온-클리퍼톤(Clarion-Clipperton Zone, CCZ) 해역에서 산출되는 망간단괴에 대한 분류방법이 설정된 바 있어(Choi et al., 2000), 본 연구에서는 CCZ에서 이용된 분류법을 일부 수정하여 연구지역에 적합한 분류방법을 설정하였다.

다. 망간단괴 지화학 분석

망간단괴 벌크 샘플에 대하여 주성분원소는 유도결합 플라즈마 원자발광분광법(ICP-AES, Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy)으로, 미량성분은 유도결합 플라즈마 질량분석법(ICP-MS, Inductively Coupled Plasma - Mass Spectroscopy)을 이용하여 분석하였다. 유도결합 플라즈마 분석은 해양과학기술원 보유의 기기를 이용하였다.

망간단괴의 내부조직에 따른 화학조성을 알아보기 위해, 제작된 연마편에 대하여 마이크로 X-선 형광분석기(uXRF, micro X-ray Fluorescence)와 전계방출형 주사전자 현미경(FE-SEM, Field-Emission Scanning Electron Microscope)과 에너지분산형 분광분석기(EDS, Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하여 분석하였다. uXRF는 연세대학교 지구시스템과학과에서 보유하고 있는 Bruker사의 M4 TORNADO 기기를 이용하였으며, FE-SEM과 EDS 분석은 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 JEOL사의 JXA-8530F PLUS를 사용하였다.

라. 망간단괴 광물 분석

망간단괴의 광물 조성을 알아보기 위해서 별크 망간단괴와 내부조직에 따른 부시료에 대하여 X선 회절 분석을 실시하였다. 부시료들은 절개면에서 내부조직을 확인한 후, 송곳을 이용하여 한 개의 단괴에서 3-5개씩 채취하였다. 망간단괴의 표면 시료들은 에폭시 몰딩 이전에 사포를 이용하여 표면을 긁어내어 획득하였다. 채취된 부시료들은 내부조직에 따른 분류와 단괴 내부의 위치에 따른 분류 등 2가지 기준으로 분류하였다. 내부조직에 따른 분류는 다공질대(porous structure), 층상대(layered structure), 산화철층(Fe-oxide layer) 및 핵(nucleus) 등 4종류로 분류하였고, 단괴 내부에서의 위치에 따른 분류는 표면(surface zone), 외곽대(outer zone; 단괴 반지름의 외곽 1/3 영역), 중간대(middle zone; 단괴 반지름의 중앙 1/3), 내부대(inner zone; 단괴 반지름의 내부 1/3) 등 4가지로 분류하였다.

부시료들은 시료량이 매우 적어 소량의 시료를 훌뿌려 로딩할 수 있는 실리콘홀더(low-background silicon sample holder)를 사용하여 X선 회절 분석(XRD)을 실시하였다. 이 홀더는 실리콘 단결정의 (911)면으로 제작되어 비정질 피크나 배경 피크가 검출되지 않아 소량시료를 측정하기 적합하며, 2 mg의 미량의 시료만을 사용하더라도 신뢰도가 높은 XRD 결과를 도출해 낼 수 있다(Kim et al., 2017). 산화망간광물의 동정을 위하여 XRD 분석은 미처리 상태와 95°C에서 12시간 가열 건조시킨 상태 각 2회 씩 분석하였다. XRD 분석은 경상대학교 지질과학과에서 보유하고 있는 Bruker사의 D8 Advance A25 고해상도 X-선 회절분석기를 이용하였다. 분석은 40 kV/40 mA, 4-50° 2-theta 구간에서 주사간격 0.02°, 주사시간은 3초로 설정하였다.

망간단괴를 구성하는 중요한 산화망간광물 중, 토도로카이트와 베네사이트는 미처리 상태와 가열 건조 상태 모두에서 각각 10A과 7A의 피크를 가진다. 부서라이트의 경우 미처리 상태에서는 10A의 피크를 가지지만 가열 건조 상태에서는 7A으로 피크의 위치가 변화되는 것을 이용하여 산화망간 광물의 반정량분석을 시도하였다. 산화망간광물의 상대적 함량은 피크 면적비를 이용하는 점토광물 반정량 분석법을 적용하였다(Biscaye, 1965).

미처리 상태에서 10A의 피크는 토도로카이트+부서라이트, 7 A 피크는 베네사이트를 나타내며, 가열 건조 상태의 10A 피크는 토도로카이트, 7 A 피크는 베네사이트+부서라이트를 나타낸다(Fig. 2). 미처리 상태의 10 A과 7A의 면적비를 계산하여

7A의 비율을 베네사이트의 함량으로 간주하였고, 가열 건조 상태의 10A과 7A의 면적비를 계산하여 10A의 비율을 토도로카이트의 함량으로 간주하였다. 부서라이트는 베네사이트와 토도로카이트를 제외하고 남은 함량으로 계산하였다. 2.45 Å의 회절선만을 나타내는 버나다이트는 다른 망간광물들과 피크 중첩이 발생하기 때문에, 반정량 분석에서 제외하였다. 토도로카이트, 베네사이트, 부서라이트를 반정량하는 계산식은 다음과 같다(Fig. 20).

$$\text{Todorokite (\%)} = \frac{A_2}{(A_1+A_2)} \times 100$$

$$\text{Birnessite (\%)} = \frac{A_3}{(A_3+A_4)} \times 100$$

$$\text{Buserite (\%)} = 100 - (\text{todorokite} + \text{birnessite})$$

($A_1 = 10 \text{ \AA}$ peak-area of untreated samples; $A_2 = 7 \text{ \AA}$ peak-area of untreated samples, $A_3 = 10 \text{ \AA}$ peak-area of dried samples at 95°C ; $A_4=7 \text{ \AA}$ peak area of dried samples at 95°C)

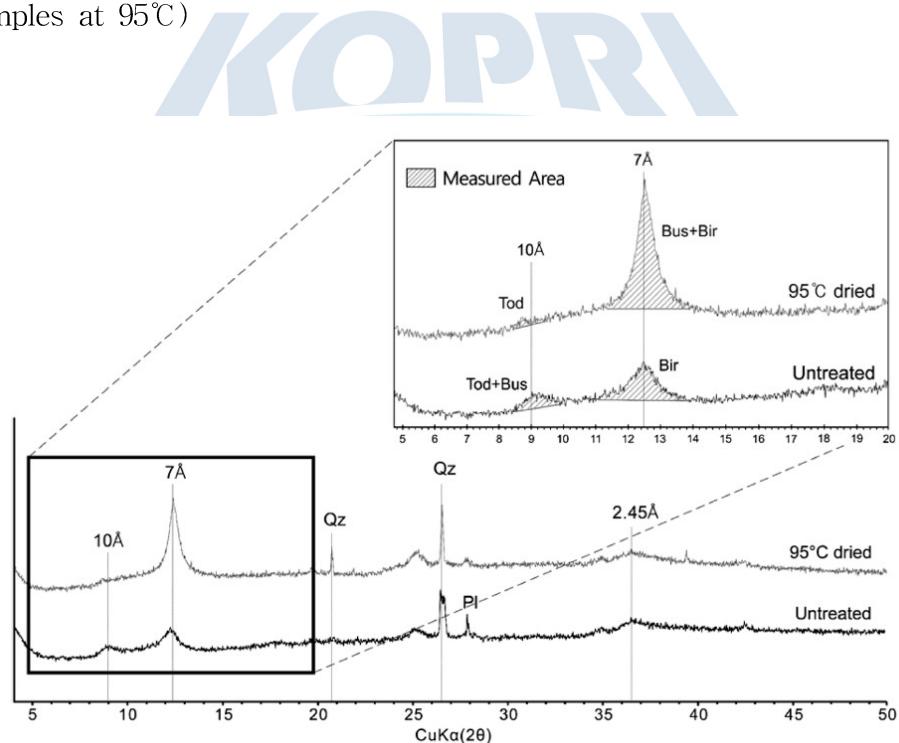


Fig. 20. XRD patterns of untreated and dried (95°C) manganese nodules. The enlarged graph shows the measured peak area for semi-quantitative analysis. Bir: birnessite, Bus: buserite, Pl: plagioclase, Tod: todorokite, Qz: quartz.

2. 퇴적물 분석

가. 퇴적물 광물조성 분석

코어 퇴적물에서 채취된 부시료들의 벌크광물조성을 알아보기 위하여 X선 회절분석을 실시하였다. 약 4 g의 건조된 부시료를 볼 밀(Ball mill)로 파쇄하여 분석용 시료를 준비하였다. X-선 회절분석은 경상대학교 지질과학과에서 보유하고 있는 Bruker사의 D8 Advance A25 X선 회절분석기를 이용하였으며, 분석조건은 40 kV/40 mA, 5-70° Θ 구간에서 주사간격 0.02°, 주사 시간 0.4초로 설정하여 분석하였다. 벌크광물 정량 분석은 TOPAS 프로그램을 이용하여 벌크 시료에 대한 석영(quartz), 알칼리장석(K-feldspar), 사장석(plagioclase), 각섬석(amphibole), 휘석(pyroxene), 흑운모(biotite), 백운모(muscovite), 방해석(calcite), 백운석(dolomite), 석고(gypsum), 철광물(Fe-bearing minerals), 점토광물(clay minerals) 등 광물조성을 분석하였다. TOPAS 프로그램을 이용한 정량분석에서, 적절한 신뢰도를 확보하기 위하여 배경값(background)은 5차 보정, Rwp (weighted profile R-factor)는 20 이하, GOF (Goodness of fit) 는 3 이하의 값이 될 때까지 반복 분석하였다.

부시료들의 상세한 점토광물 조성을 알아보기 위해 2 μm 이하의 입자를 가진 점토부분을 분리하여 정방위 시편으로 제작하였다. 부시료들은 6% H₂O₂를 이용하여 유기물을 제거한 후, 습식체질을 통해 모래 크기(>64 μm)의 입자들을 분리하였다. 점토 입자는 모래 크기의 입자를 제거한 부시료들을 stoke's law를 이용하여 실트 입자를 침전시켜 획득하였다. 분리된 점토입자는 smear on glass 방법을 이용하여 정방위 시편으로 제작되었으며, X선 회절분석을 실시하였다. X선 회절 분석은 경상대학교 지질과학과에서 보유하고 있는 Bruker사의 Siemens D5005 X선 회절분석기를 이용하였으며, 흑연 단색화된 파장(CuK α = 1.5406 Å)을 사용하였다. 분석조건은 40 kV/40 mA, 3-30 ° 2-theta(Θ) 구간에서 주사 간격 0.02°, 주사 시간 2초로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절 값을 기록하였으며, 슬릿은 1.0-0.6-1.0°를 이용하였다. 점토광물의 반정량 분석은 공기 중 건조시료(air-dried)와 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료(ethylene glycolated)에 대하여 X선 회절분석을 실시하여 그 결과를 비교해 결정하였다. 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 등 네 가지 주요 점토광물의 상대적인 함량은 에틸렌글리콜로 포화시킨 시료에서 각 광물의 특징적인 (001) 피크의 면적 비를 이용하여 계산하였다(Fig. 21). 각 광물의 (001) 피크 강도 차를 보정하기 위하여 계산된 면적에 가중치를 곱하였다(Biscaye, 1965). 녹니석과

카올리나이트의 상대적인 함량은 녹니석 (004) 피크와 카올리나이트 (002) 피크 면적 비를 이용하여 계산하였다. 각 피크의 면적들은 Eva 3.0 프로그램을 이용하여 계산되었다. 녹니석과 카올리나이트의 함량은 공기 중 건조 시료의 X선 회절 분석 결과에서 카올리나이트 (002) 피크와 녹니석 (004) 피크의 회적 강도 비를 이용하여 결정하였다.

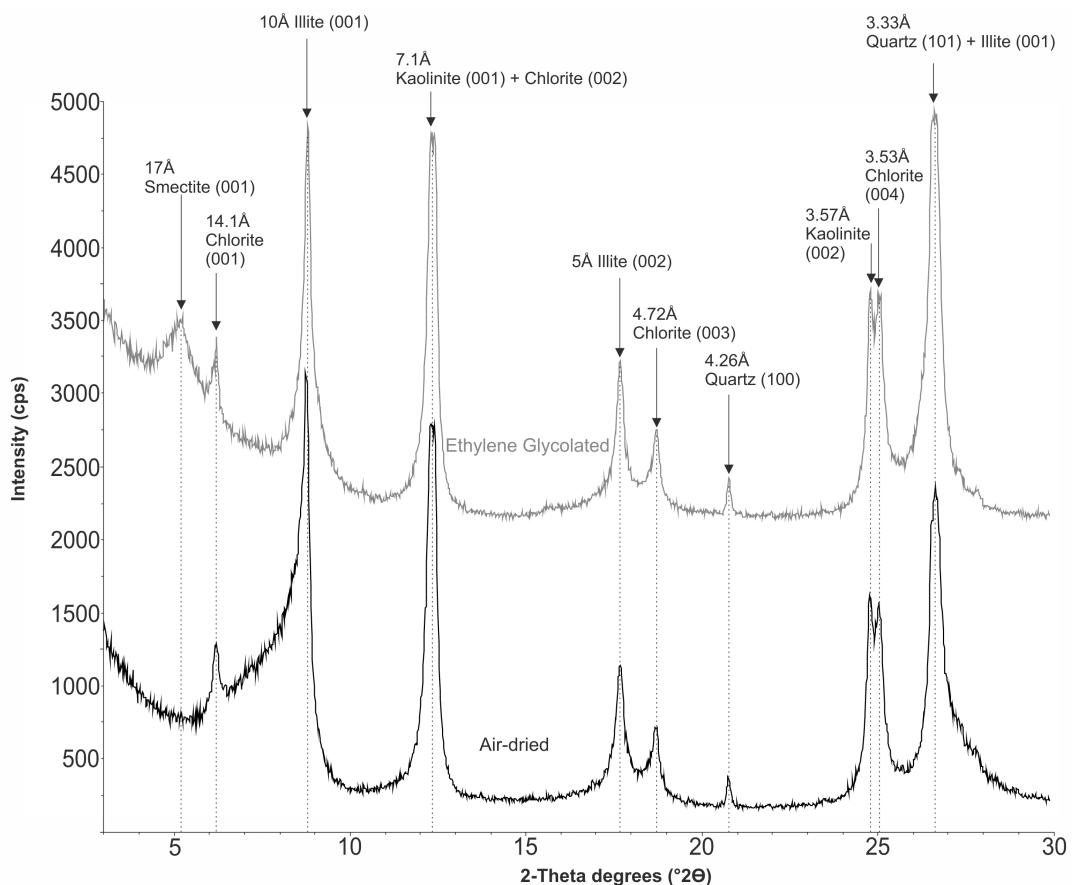


Fig. 21. Typical XRD patterns of ARA08C ST15-5 from the 420 MV, showing interpretation of major clay mineral species from the two classical runs (air-dried-black line, ethylene glycolated-gray line).

나. 퇴적물 입도 분석

유기물 처리를 위해 시료 약 10 g과 6 %의 H_2O_2 100 mL를 넣은 후, 초음파 세척기로 5분간 처리하고 상온에서 약 3일간 유기물을 제거하였다. 유기물 처리 후, 시료를 교반한 뒤 1 N 염산 5 mL를 넣어 탄산염을 제거하였다. 그리고 약 63 μm

체(230 mesh)를 이용하여 조립질 퇴적물을 분리하여 건조 후 무게를 측정하였으며, 남은 세립질 퇴적물들은 2 %의 확산제로 포화시켜 부산대학교 지질환경과학과에서 보유하고 있는 Micromeritics Sedigraph III를 이용하여 분석하였다. 입도 분석 결과는 기기 분석을 통해 실트 및 점토의 함량을 단위로 측정하였으며, 실트, 점토의 무게에 조립질 퇴적물의 무게를 합하여 전체 시료의 입도를 계산하였다.

다. 퇴적물 내 빙설쇄설물(IRD) 함량 및 조성 분석

빙운쇄설물 함량 분석은 각 시료들을 4 g 씩 건조하여 총 건조시료 무게에 대한 63 μm 이상 입자의 무게비를 계산하였다. 쇄설물 중 유공층과 같은 생물 기원 탄산염은 편셋으로 제거 후, 시료를 오븐에 넣어 50°C에서 건조하여 무게를 측정하였다. 건조 후 시료를 63 μm 체를 이용해 습식체질 하였으며, 63 μm 이상의 입자를 오븐에서 50°C에서 건조하여 무게를 측정하고 총 건조시료 무게로 나누어 무게비를 계산하였다. IRD의 함량은 각 시료들을 4g 씩 건조하여 총 건조시료 무게에 대한 >63 μm 입자의 무게비를 계산하였다(Jakobsson et al., 2000).

라. 지화학 분석

퇴적물 시료의 주성분 원소는 X-Ray 형광 분석기(XRF)를 이용하여 분석하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원에서 보유중인 XRF 기기를 이용하였으며, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, MgO, Na₂O, CaO, TiO₂, MnO, P₂O₅의 원소를 분석하였다.

제 4 절 분석 결과

1. 동시베리아해 망간단괴

가. 동시베리아해 망간단괴의 형태

동시베리아해에서 획득한 망간단괴 2123개의 크기를 측정하고, 형태를 기재하였다 (Table 7 and 8). 망간단괴의 크기는 세 축의 길이를 측정하였으며, 기재 시 장축의 길이를 기준으로 분류하였다. 망간단괴의 형태는 육안관찰을 통해 구형(S), 타원체형(E), 평판형(T), 불규칙형(I), 다단괴형(P), 튜브형(Tube) 등 6가지로 구분하였다. 동시베리아해 망간단괴는 크기와 형태에 따라 총 19가지($s^1[S]r$, $s^2[S]r$, $s^3[S]r$, $m[S]r$, $s^2[E]r$, $s^3[E]r$, $m[E]r$, $l[E]r$, $s^2[T]r$, $s^3[T]r$, $m[T]r$, $l[T]r$, $s^2[I]r$, $s^3[I]r$, $m[I]r$, $s^3[Tube]r$, $m[Tube]r$, $l[Tube]r$, $s^3[P]r$)의 형태로 구분될 수 있다. 동시베리아해 망간단괴의 표면조직은 모두 거친형(r)으로 동일하며, 색은 대체로 짙은 갈색을 띤다.

관찰된 2,123개의 망간단괴 중 구형의 망간단괴는 1,982개로 93.4 %를 차지한다. 구형(spherical) 망간단괴의 크기는 3개의 망간단괴를 제외하고 모두 3 cm 이하이며, 2-3 cm (s^2)가 가장 많았다. 비구형(non-spherical) 망간단괴는 총 141개로 6.6 %를 차지하며, 그 중 타원체형과 평판형이 가장 많았다. 비구형 망간단괴는 구형과 달리 주로 3 cm 이상의 크기를 가지며, 타원체형과 평판형의 경우 6 cm 이상의 크기를 가지기도 한다. 심해저 망간단괴의 경우, 불규칙형 또는 다단괴형의 망간단괴가 많이 발견되지만 동시베리아해 망간단괴들에서는 드물게 산출된다. 튜브형 망간단괴는 총 7개를 획득하였다. 튜브형 망간단괴는 원통형으로 성장하였으며, 원통 중앙에 빈 공간으로 보이는 통로를 가지고 있다(Fig. 23). 정점에 따른 단괴의 형태 차이는 뚜렷하지 않으나, 정점 ARA09C-St39에서 가장 많은 비구형 망간단괴가 발견되었다. 대부분의 정점에서는 s^2 크기의 구형 단괴가 가장 많이 발견된다.

단괴의 크기를 기준으로 분류할 경우, s^1 (1 cm 이하) 크기의 단괴는 4.0 %, s^2 (1-2 cm) 크기는 79.0 %, s^3 (2-3 cm) 크기는 13.8 %, m (3-6 cm) 크기는 2.5 %, l (6 cm 이상) 크기는 0.7 %를 차지한다.



Fig. 22 Image of spherical nodules



Fig. 23 Image of non-spherical nodules

Table 7. Morphology of manganese nodule in the East Siberian Sea

Type	ARA03B _ST25	ARA07C _ST01	ARA09C _ST38	ARA09C _ST39	ARA09C _ST40
	n (%)				
s ¹ [S]r	-	5 (41.7)	9 (2.5)	1 (0.5)	14 (4.3)
s ² [S]r	26 (65.0)	5 (41.7)	273 (75.6)	133 (62.1)	291 (90.1)
s ³ [S]r	14 (35.0)	2 (16.7)	53 (14.7)	21 (9.8)	5 (1.5)
m[S]r	-	-	-	1 (0.5)	2 (0.6)
s ² [E]r	-	-	1 (0.3)	-	-
s ³ [E]r	-	-	1 (0.3)	11 (5.1)	-
m[E]r	-	-	8 (2.2)	1 (0.5)	-
l[E]r	-	-	-	1 (0.5)	-
s ² [T]r	-	-	-	3 (1.4)	2 (0.6)
s ³ [T]r	-	-	-	6 (2.8)	2 (0.6)
m[T]r	-	-	9 (2.5)	9 (4.2)	1 (0.3)
l[T]r	-	-	3 (0.8)	2 (0.9)	-
s ² [I]r	-	-	1 (0.3)	7 (3.3)	2 (0.6)
s ³ [I]r	-	-	3 (0.8)	11 (5.1)	3 (0.9)
m[I]r	-	-	-	1 (0.5)	1 (0.3)
s ³ [Tube]r	-	-	-	2 (0.9)	-
m[Tube]r	-	-	-	1 (0.5)	-
l[Tube]r	-	-	-	1 (0.5)	-
s ³ [P]r	-	-	-	2 (0.9)	-
Total	40 (100.0)	12 (100.0)	361 (100.0)	214 (100.0)	323 (100.0)

Table 8. Morphology of manganese nodule in the East Siberian Sea

Type	ARA09C _ST41	ARA09C _ST42	ARA09C _ST43	ARA10C _ST16	Total
	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)
s ¹ [S]r	1 (1.2)	9 (1.0)	1 (0.7)	37 (48.7)	77 (3.6)
s ² [S]r	55 (64.7)	736 (85.1)	119 (81.0)	27 (35.5)	1665 (78.4)
s ³ [S]r	1 (1.2)	115 (13.3)	17 (11.6)	12 (15.8)	240 (11.3)
m[S]r	-	-	-	-	3 (0.1)
s ² [E]r	-	-	-	-	1 (0.0)
s ³ [E]r	6 (7.1)	-	-	-	18 (0.8)
m[E]r	5 (5.9)	2 (0.2)	1 (0.7)	-	17 (0.8)
l[E]r	1 (1.2)	-	1 (0.7)	-	3 (0.1)
s ² [T]r	-	-	-	-	5 (0.2)
s ³ [T]r	-	-	1 (0.7)	-	9 (0.4)
m[T]r	6 (7.1)	-	4 (2.7)	-	29 (1.4)
l[T]r	3 (3.5)	-	3 (2.0)	-	11 (0.5)
s ² [I]r	1 (1.2)	2 (0.2)	-	-	13 (0.6)
s ³ [I]r	3 (3.5)	1 (0.1)	-	-	21 (1.0)
m[I]r	-	-	-	-	2 (0.1)
s ³ [Tube]r	2 (2.4)	-	-	-	4 (0.2)
m[Tube]r	1 (1.2)	-	-	-	2 (0.1)
l[Tube]r	-	-	-	-	1 (0.0)
s ³ [P]r	-	-	-	-	2 (0.1)
Total	85 (100.0)	865 (100.0)	147 (100.0)	76 (100.0)	2123 (100.0)

나. 망간단괴의 내부조직

망간단괴의 내부조직에 대한 분류는 국·내외의 여러 연구자들에 의해 각기 다르게 표현되어 왔으며, 북극해에서 산출되는 망간단괴에 대한 분류는 아직까지 연구된 것이 보고되지 않았다. 국내에서는 우리나라가 광구를 가지고 있는 북동태평양의 클래리온-클리퍼튼 해역에서 산출되는 망간단괴에 대한 분류방법이 설정된 바가 있는데(Choi et al., 2000), 본 연구에서는 이 분류법을 일부 수정하여 동시베리아해에서 산출되는 망간단괴에 적합한 분류방법을 설정하였다.

동시베리아해에서 산출되는 망간단괴의 거시적 조직은 층상대(layered zone), 다공질대(porous zone), 철산화층(Fe-oxide layer), 핵(Nucleus)으로 분류하였다(Fig. 24). 층상대는 공극을 거의 포함되지 않으며 얇은 층리가 동심원상으로 발달한다. 일반적으로 1 mm 이하의 얇은 층으로 나타나 육안 관찰이 쉽지 않으나, 두꺼운 층리의 경우 육안으로도 관찰이 가능하다.

다공질대는 다량의 기공을 포함하며, 단괴의 중심부로부터 기포가 올라오는 듯한 형상을 이루며 발달한다. 연구된 동시베리아해 망간단괴의 대부분을 차지한다.

철산화층은 대체로 1 mm 이하의 얇은 층으로 구성되며, 단괴의 절개면에서 주황색의 띠 형태로 관찰된다.

핵은 구형과 비구형 단괴에서 서로 다른 형태로 관찰된다. 일반적으로 망간단괴의 핵은 주변의 암석, 동물의 뼈 등으로 구성되기 때문에 단괴 내부에서 뚜렷하게 구분이 가능하다. 그러나, 구형 단괴들의 경우 대부분의 단괴에서 핵이 뚜렷하게 구분되지 않았으며, 핵을 구성하는 입자가 매우 작거나 없는 것으로 판단된다. 반면, 비구형 단괴들은 뚜렷한 핵을 가지고 있으며, 이 핵의 형태를 따라 동일한 두께의 금속 침전층이 발달한다. 핵은 미고결된 미드 퇴적물 또는 단단한 암석 입자로 구성된다.

동시베리아해에서 산출되는 망간단괴는 대체로 다공질대로 구성되어 있으며, 층상대와 철산화층은 제한적으로 발달하고 있다. 다공질대는 한 단괴의 대부분을 차지할 정도로 크게 발달하는데, 보통 다공질대가 어느 정도 발달한 후에는 얇은 층상대를 형성하고 다시 다공질대가 발달한다. 구형과 비구형 단괴에서 금속 침전층이 내부조직은 크게 다르지 않으나, 구형 단괴에서 다공질대가 비교적 크게 발달하는 것으로 보인다. 층상대는 동시베리아해 망간단괴에서 가장 제한적으로 발달한 조직으로 두께가 1 mm를 넘지 않는다. 단괴의 최외각은 대부분 규산염광물 층이 얇게

코팅된 듯한 모습으로 나타나, 반사현미경 하에서 어둡게 관찰된다(Fig. 25).

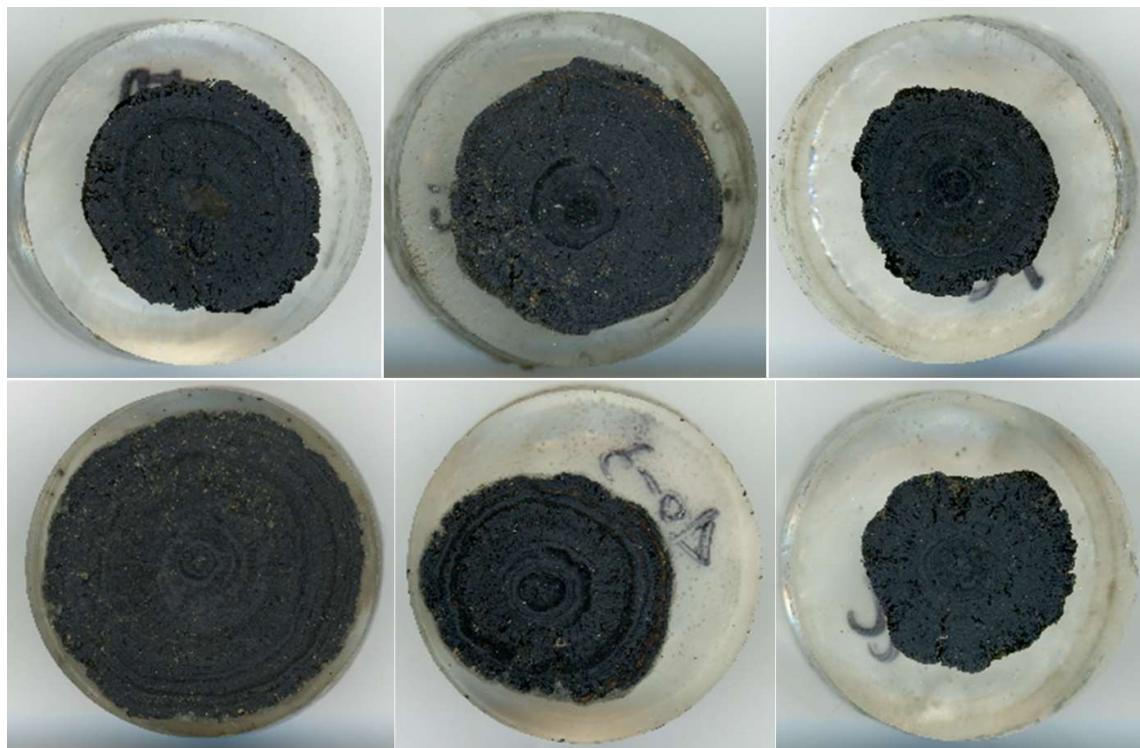


Fig. 24. Image for cross section of spherical manganese nodule

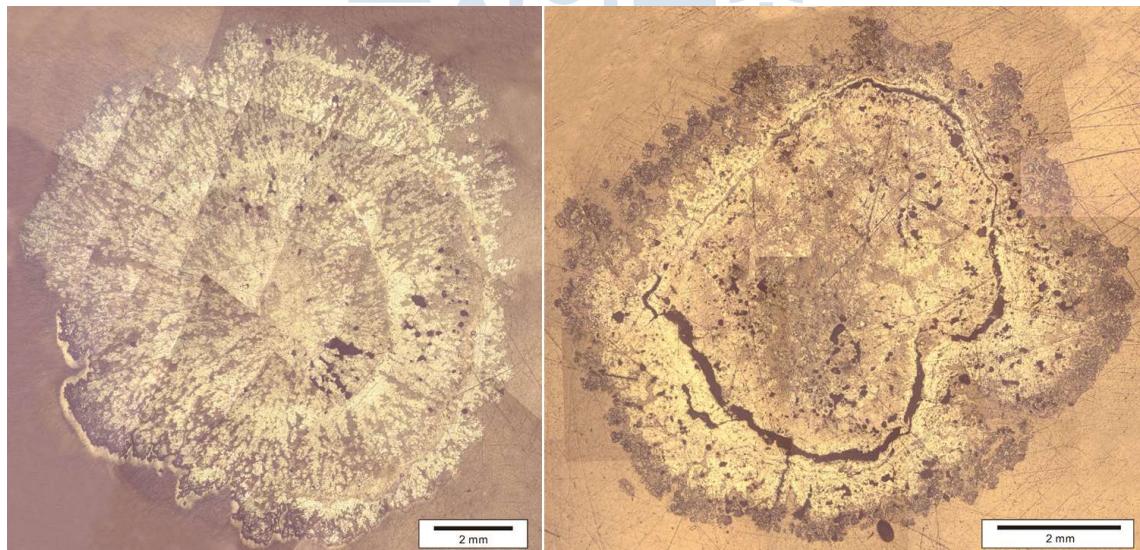


Fig. 25. Image for cross section of spherical manganese nodule using the microscope

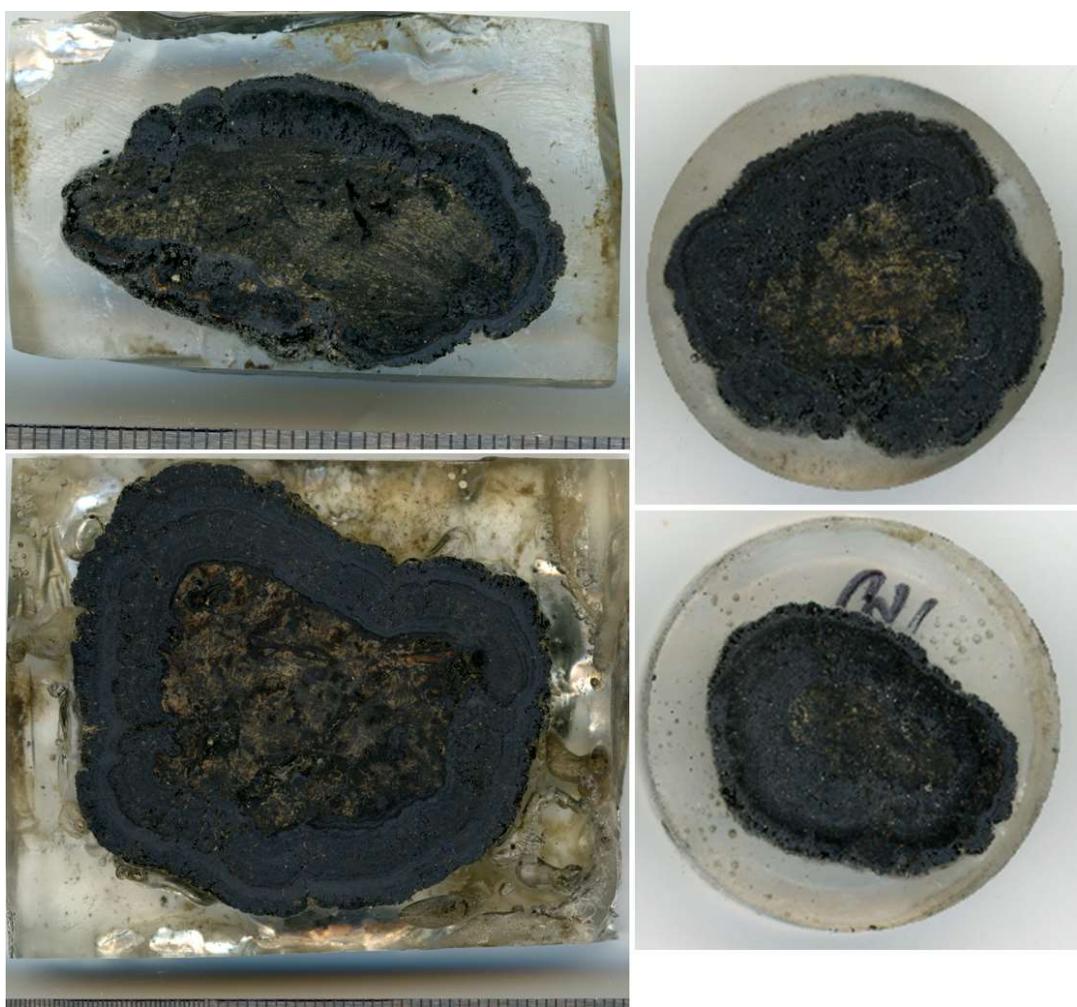


Fig. 26. Image for cross section of non-spherical manganese nodule



Fig. 27. Image for cross section of tube type manganese nodule

동시베리아해에서 산출되는 망간단괴의 미세조직은 기하학적 형태에 따라 주상(columnar), 괴상(massive) 및 첨-구상(cuspatate-globular) 조직으로 구분하였다(Fig. 28). 주상조직은 엽리가 거의 평행하게 배열되어 전체적으로 주상을 이룬다. 반면, 엽리의 발달이 미약한 조직들은 괴상조직으로 분류하였다. 첨-구상조직은 첨상조직과 구상조직을 합친 것으로, 첨상조직은 엽리가 완곡부를 이루며 발달하여 강한 물결 무늬 또는 초승달 보양의 엽리를 보이는 조직을 말한다. 첨상조직은 각각의 첨상체 내에서는 엽리의 횡적 연결성이 좋으나 첨상체 간의 연결성이 부족하다. 횡적 연결성이 매우 부족하여 첨상체가 구상으로 떨어져 산출되는 경우는 구상조직으로 간주하였으나, 두 조직 사이의 구분이 뚜렷하지 않아 첨-구상으로 함께 분류하였다. 주상조직은 층상대의 일부에서만 관찰된다. 두께는 수십~수백 μm 로 얕게 발달하며, 층의 중심에서 외곽으로 갈수록 미세층리의 굴곡이 커져 결국에는 첨-구상조직 또는 괴상조직으로 이어진다(Fig. 28a, b). 괴상조직은 괴상대에서 주로 관찰되며, 엽리가 나타나지 않거나 매우 불규칙하다(Fig. 28d). 주상조직에 비해 두꺼운 층을 가진 수백 μm ~수 mm로 발달한다. 첨-구상조직은 연구지역의 단괴에서 가장 우세하게 나타나는 조직으로 방사상대의 대부분을 차지하고, 괴상대에서도 크게 발달한다. 하지만, 층상대에서는 거의 나타나지 않는다.

첨-구상조직의 중심부는 대체로 구상조직으로 이루어져 있다. 구상조직의 각각의 구상 입자들은 수 μm ~수백 μm 의 다양한 크기를 가지며(Fig. 28c), 규산염광물들이 구상의 망간산화물의 빙자리를 채우고 있다. BEI이미지에서 구상 내부는 철 또는 규산염 광물의 함량이 높은 어두운 층과, 망간의 함량이 높은 밝고 얕은 층들이 수많은 엽리를 형성한다. 이 구상조직들은 외곽으로 갈수록 입자 사이의 연결성이 좋아져 서서히 첨상조직을 이룬다. 첨상조직은 조직 간의 경계에서 구상조직의 밀집으로 가장 크게 발달하며, 그 두께는 비교적 얕다.

거시적 조직과 미세조직들을 종합하면, 동시베리아해 망간단괴의 주요한 특징인 방사상대는 주로 첨-구상조직으로 구성된다. 층상대에서는 주상조직 또는 첨상조직이 발달하는데, 주상조직은 얕게 발달하는 층상대에서만 관찰되는데 반하여, 괴상대는 첨-구상조직과 괴상조직들이 함께 어우러져 나타난다.

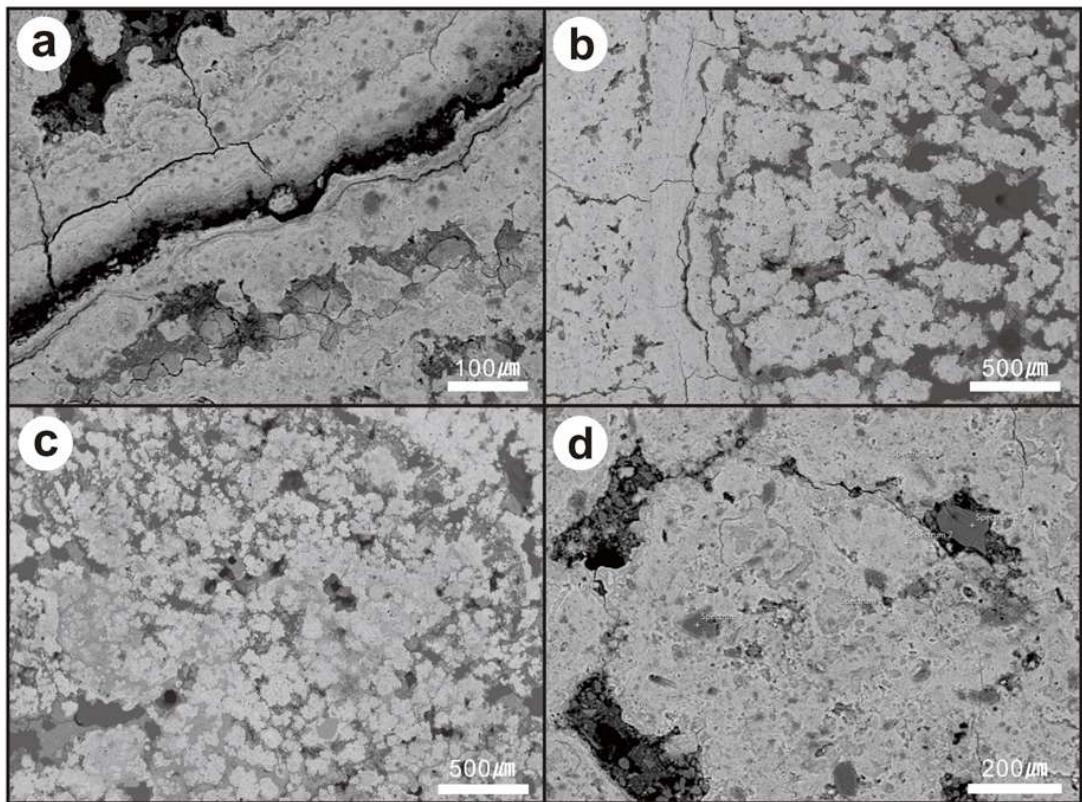


Fig. 28 BEI images of microstructure in Mn nodules from the East Siberian Sea. (a) columnar, (b) boundary between columnar and cupate-globular (c) cupate-globular, (d) massive.

다. 망간단괴의 화학조성

(1) 벌크 화학조성

ICP 분석을 통해 구한 망간단괴의 bulk 화학조성을 Table 1에 도시하였다. Mn의 함량은 28.6–34.8 wt%, 평균 33.2 wt%이며, Fe의 함량은 1.2–2.3 wt%, 평균 1.8 wt%이다. 태평양이나 인도양 등 다른 해역에서 산출되는 망간단괴에 비하여 Mn의 함량은 높은 값을 가지지만, Fe의 함량은 매우 낮다. 망간단괴 내에 존재하는 주요 금속 원소들은 평균 Co 275 ppm, Ni 231 ppm, Cu 86 ppm, Zn 292 ppm으로 다른 해역과 비교하여 상당히 낮다. 단괴 외곽과 내부 layer의 차이를 알아보기 위해, #1 샘플에 대하여 외곽과 내부에 대해 2번의 추가 분석을 실시하였으나, 금속 원소 함량에 있어 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 8).

Table 9. Important metal contents and Mn/Fe ratios for bulk manganese nodules from the East Siberian Sea with Pacific Ocean and Indian Ocean for comparisons

Element	Unit	Nodule 1	Nodule 2	Nodule 3	Nodule 4	Nodule 5	Nodule 6
Al	%	2.9	3.4	3.0	3.4	2.7	2.9
Fe	%	1.8	2.3	1.3	1.9	2.1	1.1
Mn	%	34.5	28.6	34.8	31.2	34.5	35.7
Mg	%	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7
Ca	%	1.0	0.6	0.9	1.0	1.1	0.9
Na	%	2.5	1.0	1.5	2.2	2.8	1.8
K	%	1.7	1.9	1.8	1.8	1.6	1.8
P	%	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0
Ti	%	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
Co	ppm	173.9	660.5	252.0	204.0	172.9	186.6
Ni	ppm	171.5	177.4	217.2	378.9	222.8	217.4
Cu	ppm	54.0	75.1	90.1	156.9	68.1	71.6
Zn	ppm	202.5	223.7	250.5	540.0	314.7	221.4
La	ppm	18.8	23.1	22.4	26.1	19.0	19.6
Ce	ppm	34.3	37.3	34.4	38.1	34.4	32.5
Pr	ppm	3.7	4.6	4.3	5.3	4.0	3.9
Nd	ppm	15.9	18.5	18.2	22.4	16.4	16.1
Sm	ppm	3.4	3.9	4.0	4.9	3.5	3.5
Eu	ppm	0.9	1.5	1.3	1.4	0.9	1.1
Gd	ppm	3.7	4.5	4.6	5.9	4.1	4.0
Tb	ppm	0.6	0.7	0.7	0.9	0.6	0.6
Dy	ppm	3.3	3.8	3.9	5.1	3.4	3.5
Ho	ppm	0.6	0.7	0.8	1.0	0.7	0.7
Er	ppm	1.7	2.1	2.1	2.8	1.8	1.9
Tm	ppm	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3
Yb	ppm	1.5	1.8	1.9	2.4	1.6	1.6
Lu	ppm	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
Mn/Fe	-	19.1	12.2	26.1	16.7	16.6	31.6
Co+Ni+Cu	ppm	399.3	913.0	559.3	739.8	463.8	475.5
Σ REE	ppm	88.8	103.0	99.0	116.9	90.9	89.4

(2) 내부조직에 따른 화학조성

다공질대와 층상대에서는 Mn 함량이 높고 Fe 함량이 낮은 경향을 보이며, 다공질대가 층상대보다 조금 높은 Mn/Fe 비를 나타낸다(Table 9). 다공질대와 층상대의 평균 Mn 함량은 각각 49.9%와 47.8%이며, 평균 Fe 함량은 각각 2.2%와 2.4%이며, Mn/Fe 비는 각각 22.6과 19.9이다. 대표적인 망간단괴 산출지역인 태평양과 인도양에서 Mn/Fe 비가 1.00-4.61인 것을 고려하면(Hein et al., 2013, 2015), 동시베리아해 망간단괴는 매우 높은 Mn/Fe 비를 가지고 있는 것이 확인되어, 미래의 Mn 자원으로서의 가치가 매우 높다는 것을 알 수 있다(Table 9). 산화철층의 경우, 평균 Mn 함량이 4.1%, Fe 함량이 31.1%이며, 1.5%의 P을 포함한다. 산화철층의 Mn/Fe 비는 0.1로 매우 낮다.

주사전자현미경 하에서 관찰되는 망간단괴의 미세조직은 대부분 주상(columnar), 첨-구상(cuspateglobular) 조직이 관찰되었다(Fig. 29). 주상조직은 엽리가 거의 평행하게 배열되어 전체적으로 주상을 이루며, 첨-구상조직은 강한 물결무늬와 구상의 조직을 말한다(Choi et al., 2000; Koo et al., 2017). 주상조직은 조직 간의 경계와 층상대에서 관찰되며, 첨-구상 조직은 다공질대 전반에서 관찰되었다(Fig. 29). 원소 별 X-ray 분포도에서, 단괴 내에서 Mn과 Fe 함량은 역의 상관관계를 지시하는 분포를 나타내며, Fe 함량이 높은 부분에서는 P도 역시 높게 존재하였다. Si는 핵과 단괴 전반에 분포된 실리카 입자들에서 높은 함량을 보였다. Co, Ni, Cu는 검출되지 않았는데, 그 이유는 이들 원소들이 검출한계 이하의 낮은 농도로 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다(Koo et al., 2017).

Table 10. Chemical compositions of manganese nodules found in major nodule deposits

Seas		Elements (%)								Mn/Fe	
		Mn	Fe	Si	Al	Mg	Ca	Na	K		
East Siberian Sea	Porous structure	49.9	2.2	5.5	2.8	1.8	1.5	2.5	2.0	-	22.6
	Layered structure	47.8	2.4	3.8	1.6	1.1	1.2	1.8	1.3	-	19.9
	Fe-oixde layer	4.1	31.1	11.5	3.8	1.2	1.7	1.1	1.3	1.5	0.1
Clarion-Clipperton Zone		28.4	6.16	6.55	2.36	1.89	1.70	1.99	0.99	0.21	4.61
Cook Island		16.1	16.1	7.3	3.01	1.34	1.95	1.84	0.89	0.34	1.00
Indian Ocean		24.4	7.14	10.0	2.92	1.99	1.67	1.86	1.14	0.17	3.42

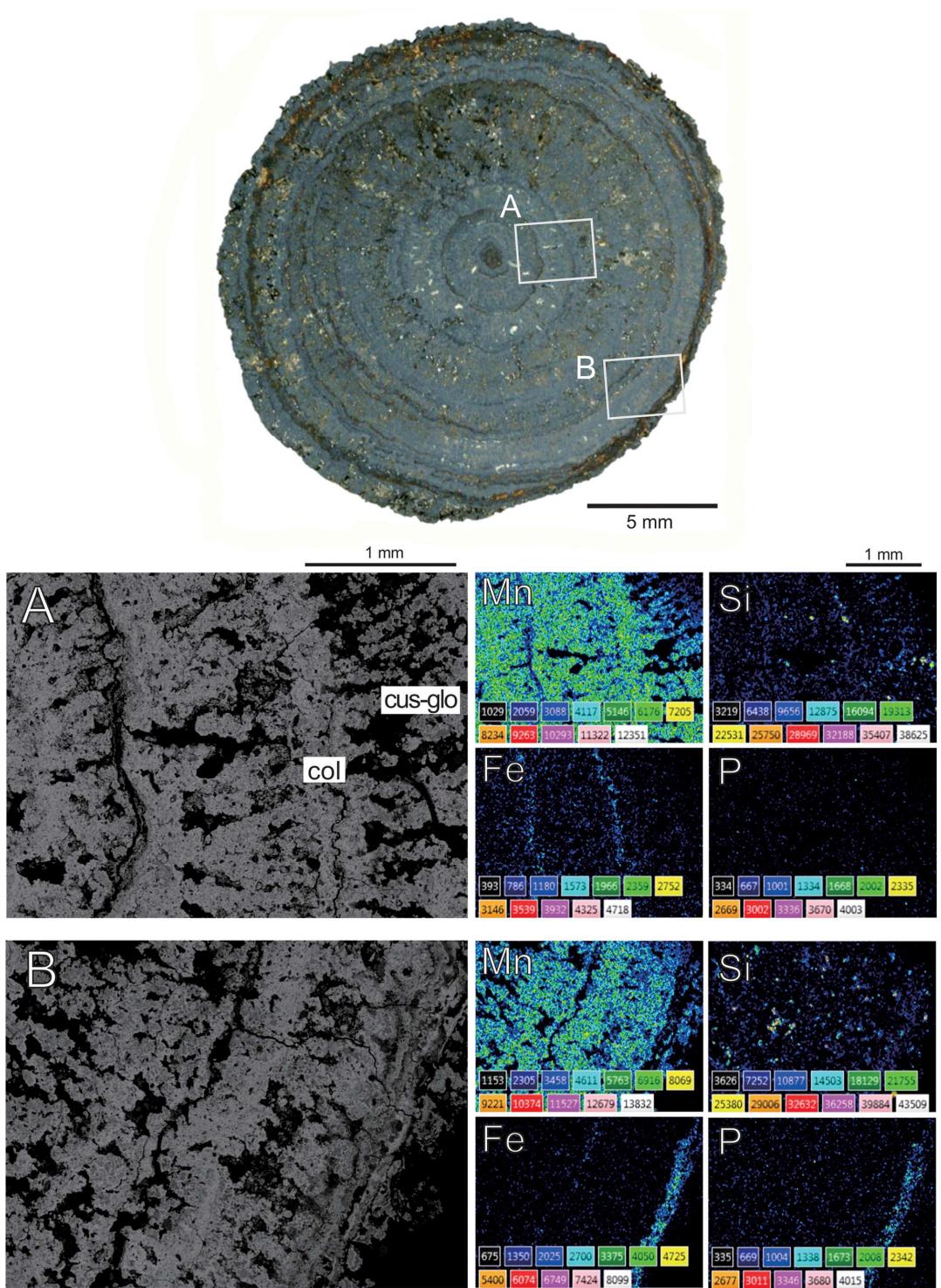


Fig. 29. The backscattered-electron (BSE) images and elemental maps (Mn, Si, Fe, and P) of the manganese nodule samples. White boxes indicates the analyzed location within the nodule. col; columnar, cus-glo; cusate-globular.

내부조직 간의 화학적 조성차이를 알아보기 위해 EPMA를 이용하여 각 미세조직 내의 염리를 분석하였으며, 그 결과를 Table 10에 제시하였다. 산화망간광물들은 결정 구조 내에 많은 양의 물을 포함하기 때문에, 합계가 70% 이상인 결과들은 분석 결과가 양호한 것으로 판단하여 이들만을 이용하였다(Wegorzewski and Kuhn, 2014). MnO의 평균 함량은 첨-구상조직(57.9 wt%), 주상조직(58.9 wt%), 괴상조직(56.7 wt%)로 조직에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다. FeO의 평균 함량 또한 첨- 구상조직(1.1 wt%), 주상조직(1.6 wt%), 괴상조직 (1.6 wt%)로 첨-구상조직에서 비교적 작은 양으로 분석되었으나, FeO의 범위가 첨-구상조직(0.2-2.7 wt%), 주상조직(0.5-2.8 wt%), 괴상조직(1.0-2.2 wt%) 임을 고려해보면 조직에 따른 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 주요 금속 원소(Co, Ni, Cu)들 또 한 모든 조직에서 bulk 자료와 큰 차이를 보이지 않았으며, 다른 주요 원소들에서도 미세조직에 따른 차이점은 발견할 수 없었다. Mn과 Fe를 이용한 XY 그래프를 통해 동시베리아해와 다른 해역에서 산출되는 망간단괴를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 인도양 심해저에서 산출되는 망간단괴는 그 성인이 다양함 때문에 10-30 wt%의 Mn 함량과 2-14 wt%의 Fe 함량으로 넓은 범위에 도시된다(Banerjee et al., 1999). 태평양 심해저의 단괴들은 30-40 wt%의 Mn 함량과 4-7 wt%의 비교적 좁은 범위에 집중되어 있다(Wegorzewski and Kuhn, 2014). 동시베리아해에서 산출되는 망간단괴들은 약 30-50 wt%의 많은 Mn 함량을 가진다. 반면, Fe의 함량은 미세조직에 관계 없이 모두 2 wt% 이하로 매우 부족하여 다른 해역들과 분명한 차이를 보인다. 동시베리아해에서 산출되는 망간단괴의 Mn/Fe ratio는 평균 20.4로 태평양에서 산출되는 망간단괴의 약 4배, 인도양의 약 6배 높은 값을 보이는데, 이러한 차이는 동시베리아해의 망간 단괴의 형성과정 및 형성환경이 다른 해역과는 달랐음을 의미할 수 있다(Fig. 30).

Table 11. Electron microprobe analyses of variance in each microstructure

Texture	MnO	FeO	CoO	CuO	NiO	SiO2	Al2O3	MgO	Na2O	K2O	CaO	TiO2
Cuspate-globular	57.12	0.92	0.05	-	0	8.77	4.76	1.84	3.26	1.25	2.04	0.07
	61.53	0.63	-	-	0	2.43	1.11	2.08	3.15	1.72	2.03	-
	59.84	0.8	0.01	0.02	0.01	3.27	1.36	2.95	2	2.21	1.2	0.04
	56.35	0.96	0.02	0.03	0.06	4.98	2.08	2.66	2.23	2.01	1.31	0.08
	65.67	0.24	0.06	0.03	0.04	0.26	0.09	2.46	2.46	1.71	1.96	0.02
	46.79	2.71	0.28	-	0.06	9.32	3.77	2.78	1.59	1.99	1.62	0.08
	61.41	0.87	-	0.04	0.02	3.52	1.31	2.54	3.89	1.37	1.94	0.04
	58.86	0.75	0.06	-	0.01	1.69	0.66	2.52	1.74	1.75	2.11	0.13
	50.39	1.63	0.04	0.01	0.05	9.57	5.3	2.22	1.8	3.1	2.32	0.04
	66.12	0.22	0.04	-	-	0.27	0.02	2.77	2.72	1.58	2.1	0.01
	54.6	1.08	-	-	0.06	2.95	1.59	2.74	1.65	2.14	1.61	0.06
	59.58	1.23	0.02	0.01	0.06	5.71	2.61	3.45	2.6	2.56	2.99	0.21
	57.79	1.4	0.01	0	0	8.06	2.68	3.78	2.35	2.45	2.47	0.14
	55.05	1.82	0.02	0.01	0.05	8.79	3.47	2.61	1.59	2.51	2.66	0.09
mean	57.94	1.09	0.04	0.01	0.03	4.97	2.2	2.67	2.36	2.02	2.03	0.07
Columnar	58.56	2.82	0.08	-	-	5.28	2.45	2.41	4.75	1.14	1.96	0.06
	54	1.96	0.01	0.07	0.02	12.09	4.23	2.59	3.99	2.22	1.36	2.11
	64.74	0.48	0.04	-	0.01	1.47	0.46	1.94	6	0.94	1.92	0.03
	58.16	1.12	-	0.02	-	6.48	2.73	2.45	4.13	1.76	2.05	-
mean	58.87	1.59	0.03	0.02	0.01	6.33	2.47	2.35	4.72	1.51	1.82	0.55
Massive	55.06	2.15	0.01	0.09	0	9.38	3.46	3.01	1.49	1.82	2.81	0.1
	58.36	1.01	0.03	0.03	0	5.46	2.02	2.65	4.02	1.67	2.98	0.05
mean	56.71	1.58	0.02	0.06	0	7.42	2.74	2.83	2.75	1.74	2.9	0.08

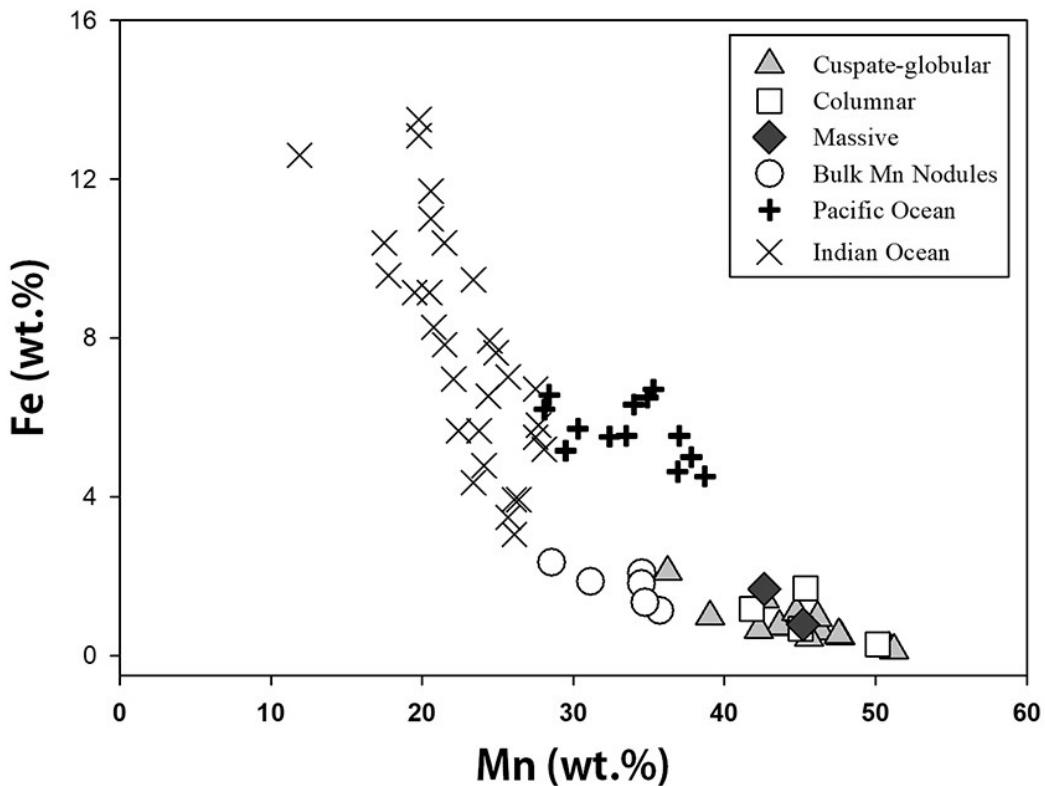


Fig. 30. Mn vs. Fe contents of bulk nodules and manganese oxides from the study area. Mn nodules data from the Pacific Ocean (Wegorzewski and Kuhn, 2014) and Indian Ocean (Banerjee et al., 1999) are plotted for comparison.

라. 망간단괴의 광물 조성

심해저에서 산출되는 망간단괴를 구성하는 산화망간광물은 부서라이트(buserite), 아스볼렌(asbolan/asbolane), 베네사이트(birnessite), 토도로카이트(todorokite), 베나다이트(vernadite) 및 로마네차이트(romanechite) 등으로 보고되어 왔으며 (Bogdanova et al., 2008), 생성환경 및 성인에 따라 그 광물 조성에 많은 차이가 있다. 북극해에서 산출되는 망간단괴에 대해서는 Baturin and Dubinchuk (2011)의 TEM 분석을 토대로 Chukchi Sea와 East Siberian Sea에서 발견된 망간단괴가 주로 적철석, 베나다이트, 아스볼렌으로 구성됨을 확인한 연구가 거의 유일하다.

산화망간광물들은 그 명칭에 있어 많은 논란이 있었지만 대체로 각기 다른 광물로 인정되고 있다(Choi et al., 2000). 층상광물인 부서라이트, 아스볼렌과 터보스트레이틱(turbostratic) 구조를 가지는 토도로카이트는 X선 회절상에서 모두 10 Å의 주회절선을 가진다. X선 회절분석 자료에서 층상광물은 구조적 결합(structural

defectiveness)와 무질서(disorder)로 인해 구별이 쉽지 않으며, 9.6–10 Å의 강한 회절선만을 나타낸다(Pal'hik et al., 2013). 베나다이트는 δ -MnO₂로 불리기도 하며, 결정도가 매우 낮아 2.45 Å과 1.42 Å의 제한된 회절선만을 보인다(Choi et al., 2000).

산화망간광물들은 층간 또는 터보스트레틱 구조 내에 존재하는 양이온과 물 분자들로 인해 온도에 의해 구조적 변형을 받기 때문에 이를 광물의 동정을 위해서 일반적으로 열처리를 통한 분석이 실시된다(Pal'hik et al., 2013). 부서라이트는 100°C 이하의 낮은 온도에서 쉽게 탈수되어 7.2–7.4 Å의 베네사이트로 변형된다. 반면, 아스볼렌은 200°C까지 안정하며, 부서라이트와 토도로카이트는 결정도에 따라 300–400°C까지 안정하다(Pal'hik et al., 2013). 이와 같은 특성을 이용하여 미처리 시료와 100°C에서 열처리된 시료에 대해 XRD 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 31에 제시하였다. Fig. 31에서 보는 바와 같이 본 연구에 이용된 망간단괴는 부서라이트, 베네사이트, 베나다이트 등의 산화망간광물들과 석영과 장석 등 규산염 광물들로 구성된다. 미처리 시료에서 10 Å의 회절선은 부서라이트, 토도로카이트 및 아스볼렌에 의한 것으로 간주되었다. 동일 시료를 100°C로 하루 동안 가열한 후 얻은 결과에서 10 Å의 회절선은 모두 7 Å으로 이동되었으며, 동시에 5 Å의 회절선은 3.5 Å으로 이동되었다. 따라서 10 Å의 회절선에서 토도로카이트, 아스볼렌은 제외되었으며, 10 Å은 부서라이트, 7 Å은 베네사이트, 2.45 Å과 1.42 Å의 약한 회절선은 베나다이트로 확인되었다. 이러한 결과를 바탕으로 동시베리아해 망간단괴를 구성하는 산화망간광물은 주로 부서라이트, 베네사이트와 베나다이트로 구성되어 있음을 확인하였다.

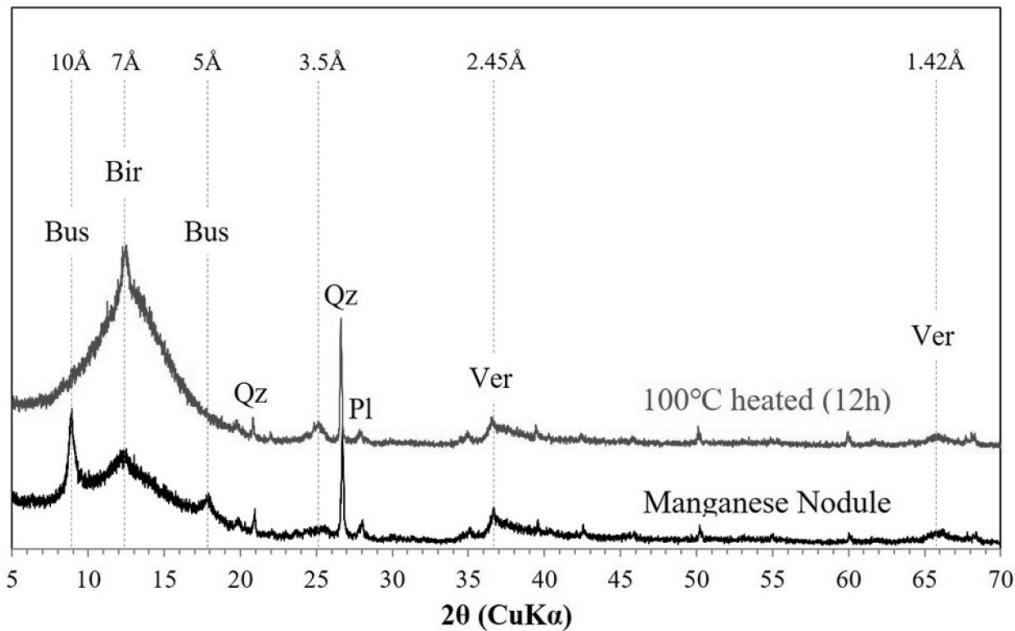


Fig. 31 XRD patterns of untreated and heated (100°C , 12 h) Mn nodule. Bir; birnessite, Bus; buserite, Pl; plagioclase, Qz; quartz, Ver; vernadite.

내부조직 관찰 및 광물 분석을 위한 부시료 채취를 위해 16개의 단괴가 이용되었다. 연구에 이용된 단괴는 연구지역에서 가장 일반적인 구형 단괴들 중, 부시료 채취를 위한 충분한 크기를 고려하여 직경 2-3 cm의 단괴들로 선정하였다. 선정된 단괴 시료들은 내부조직 관찰을 위해 에폭시로 몰딩한 후, 연마편을 제작하였다. X선 회절 분석을 위한 부시료들은 내부조직을 확인한 후 송곳을 이용하여 한 개의 단괴에서 3-5개의 부시료를 채취하였다. 단괴 표면 시료들은 에폭시 몰딩 이전에 사포를 이용하여 표면을 긁어내어 획득하였다.

채취된 부시료들은 내부조직에 따른 분류와 단괴 내부의 위치에 따른 분류 등 2 가지 기준으로 분류하였다(Fig. 32). 내부조직에 따른 분류는 다공질대(porous structure), 층상대(layered structure), 산화철층(Feoxide layer) 및 핵(nucleus) 등 4 종류로 분류하였고, 단괴 내부에서의 위치에 따른 분류는 표면(surface zone), 외곽대(outer zone; 단괴 반지름의 외곽 1/3 영역), 중간대(middle zone; 단괴 반지름의 중앙 1/3), 내부대(inner zone; 단괴 반지름의 내부 1/3) 등 4가지로 분류하였다.

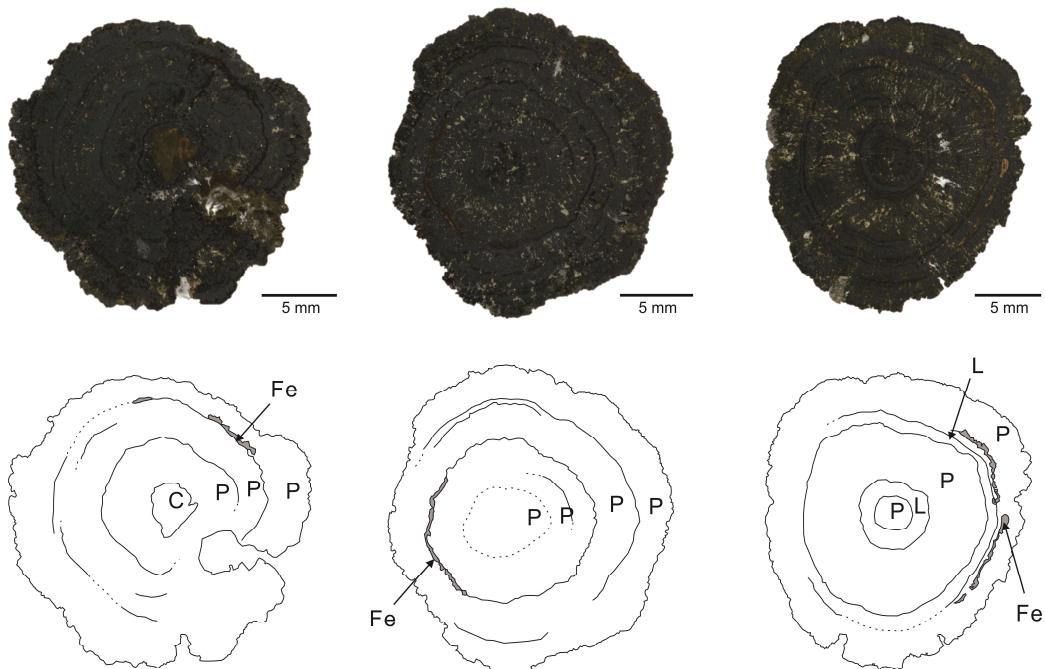


Fig. 32. Polished-section photographs and sketches of the East Siberian Sea Mn-nodule samples. P; porous structure, L; layered structure, Fe; Fe-oxide layer, C; nucleus.

피크 면적비를 이용한 망간광물의 반정량 분석은 미처리 상태와 가열 건조된 상태의 10 Å과 7 Å의 피크 면적을 이용하였으며, 토도로카이트, 부서라이트, 베네사이트 3가지 광물의 상대적인 비율을 계산하였다. 산화철층과 핵은 산화망간광물에 해당하는 피크를 측정하기 어려울 정도로 함량이 적어 반정량 분석에서 제외하였다.

다공질대와 층상대 시료는 토도로카이트, 베네사이트, 부서라이트, 베나다이트 등의 산화망간광물과 석영, 장석 등의 규산염 광물로 구성된다. 63개 부시료의 평균조성은 토로로카이트가 16%, 부서라이트가 39%, 베네사이트가 45%로, 토도로카이트의 함량이 가장 적고 베네사이트가 가장 풍부했다(Table 11).

내부구조에 따른 산화망간광물의 반정량분석 결과, 다공질대는 토도로카이트 12%, 부서라이트 40%, 베네사이트 47%, 층상대는 토도로카이트 22%, 부서라이트 35%, 베네사이트 43%로, 층상대가 다공질대에 비하여 토도로카이트가 약 10% 많고, 베네사이트와 부서라이트는 각각 5%, 4% 씩 적다. 산화망간광물 함량을 내부구조에 따른 위해 삼각도표에 도시한 결과, 다공질대 시료들이 토도로카이트의 함량이 다소 낮은 위치에 도시되지만, 두 조직 간의 뚜렷한 광물 조성 차이는 나타나지

않았다(Fig. 33).

위치에 따른 분류 결과, 내부대에서 토도로카이트 34%, 부서라이트 33%, 베네사이트 33%, 중간대에서 토도로카이트 15%, 부서라이트 43%, 베네사이트 42%, 외곽대에서 토도로카이트 10%, 부서라이트 28%, 베네사이트 62%, 표면에서 토도로카이트 2%, 부서라이트 51%, 베네사이트 47%로 분석되었다(Table 11). 토도로카이트는 표면에서 0~4%로 가장 낮으며, 내부대에서 가장 풍부하며 단괴 내부에서 외부로 갈수록 감소한다. 반면, 베네사이트와 부서라이트는 각각 외곽대와 표면에서 가장 높은 값을 보였으나, 위치에 따른 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 삼각도표에서 토도로카이트는 표면에서 내부대로 가며 뚜렷한 증가를 보이지만, 베네사이트와 부서라이트는 모든 구간에서 불규칙한 분포를 나타냈다.

동시베리아해 망간단괴의 다공질대와 층상대는 서로 형태학적 특징은 다르지만, 유사한 화학조성과 광물조성을 나타낸다. Mn/Fe 비율 기반으로 두 조직은 모두 속성기원으로 판단되었으며, 베네사이트와 부서라이트가 풍부하고 토도로카이트를 가진다. 속성기원의 태평양 단괴들은 주로 베나다이트와 소량의 토도로카이트로 구성되는 것으로 보고되었으며 (Wegorzewski et al., 2015; Khun et al., 2017), 망간단괴의 조직과 광물학적 연관성 연구를 수행한 기존 연구에서 속성작용을 받은 다공질대에서 토도로카이트와 베네사이트가 풍부한 것으로 보고하였다(Choi et al., 2000). 또한, 속성기원의 단괴로 해석된 북극 카라해의 단괴들은 주요 광물조성이 7A의 베네사이트와 부서라이트이며, 토도로카이트는 포함되지 않는 것으로 보고되었다 (Vereshchagin et al., 2019). 따라서, 속성기원으로 보고된 기존 결과들과 이번 연결과 모두 광물 조성에 차이가 있다. 이는 주변 열수활동을 포함한 해양환경의 차이 혹은 별크 시료를 준비한 경우 다른 성장과정을 겪은 내부조직이 혼합되기 때문일 수 있다. 그러나, 이번 연구 결과에서 내부조직과 관계없이 단괴 내부의 위치에 따라 토도로카이트의 함량 변화가 확인되므로, 단괴의 광물조성에 영향을 미치는 요인이 단괴의 성장과정 이외에도 존재할 것으로 보인다. 단괴의 내부에서 토도로카이트가 풍부해지는 경향은 태평양의 단괴에서도 관찰된 바 있으며, 이는 후기 속성작용에 의한 재결정 또는 재침전으로 해석되었다. 토도로카이트를 합성할 때, 베네사이트, 부서라이트, 토도로카이트 순서에 따라서 광물조성이 달라지는 것 역시 이와 같은 해석과 부합하는 것으로 여겨진다(Choi et al., 2000).

또한, 토도로카이트는 열수에 의해 형성된 망간단괴에서 풍부하며(Kuhn et al.,

2003), 이는 단괴의 빠른 성장 속도와 관계되었을 것으로 추측되었다(Kuhn et al., 2017). 연구지역 주변의 열수활동은 보고된 바가 없으므로, 동시베리아해 망간단괴는 단괴 내부에서 토도로카이트가 증가하는 경향은 초기 침전 이후의 재결정작용 또는 단괴 내외부의 성장 속도 차이에 의한 결과로 해석될 수 있다. 피크 면적비를 이용한 망간단괴의 광물 조성 분석은 정확한 광물 조성과는 차이가 있을 수 있지만, 단괴 내부에서의 광물 조성 차이를 잘 나타내고 내부 조직이나 망간단괴 내 위치에 따른 비교에 용이하였다. 점토광물의 경우, 피크 면적비를 이용한 반정량 분석이 해양 퇴적물, 단층 물질 등 다양한 분야에서 널리 이용되고 있으므로, 망간광물의 반정량 분석법 또한 망간단괴 연구에 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 12. Semi-quantitative Mn-oxide compositions of the East Siberian Sea Mn nodules

Classification		n	Mineral composition (%)		
			Todorokite	Birnessite	Buserite
Internal texture	Porous structure	43	12	47	40
	Layered structure	20	22	43	35
Lamellae depth	Inner zone	12	34	33	33
	Middle zone	27	15	42	43
	Outer zone	15	10	62	28
	Surface zone	9	2	47	51
Total		63	16	45	30

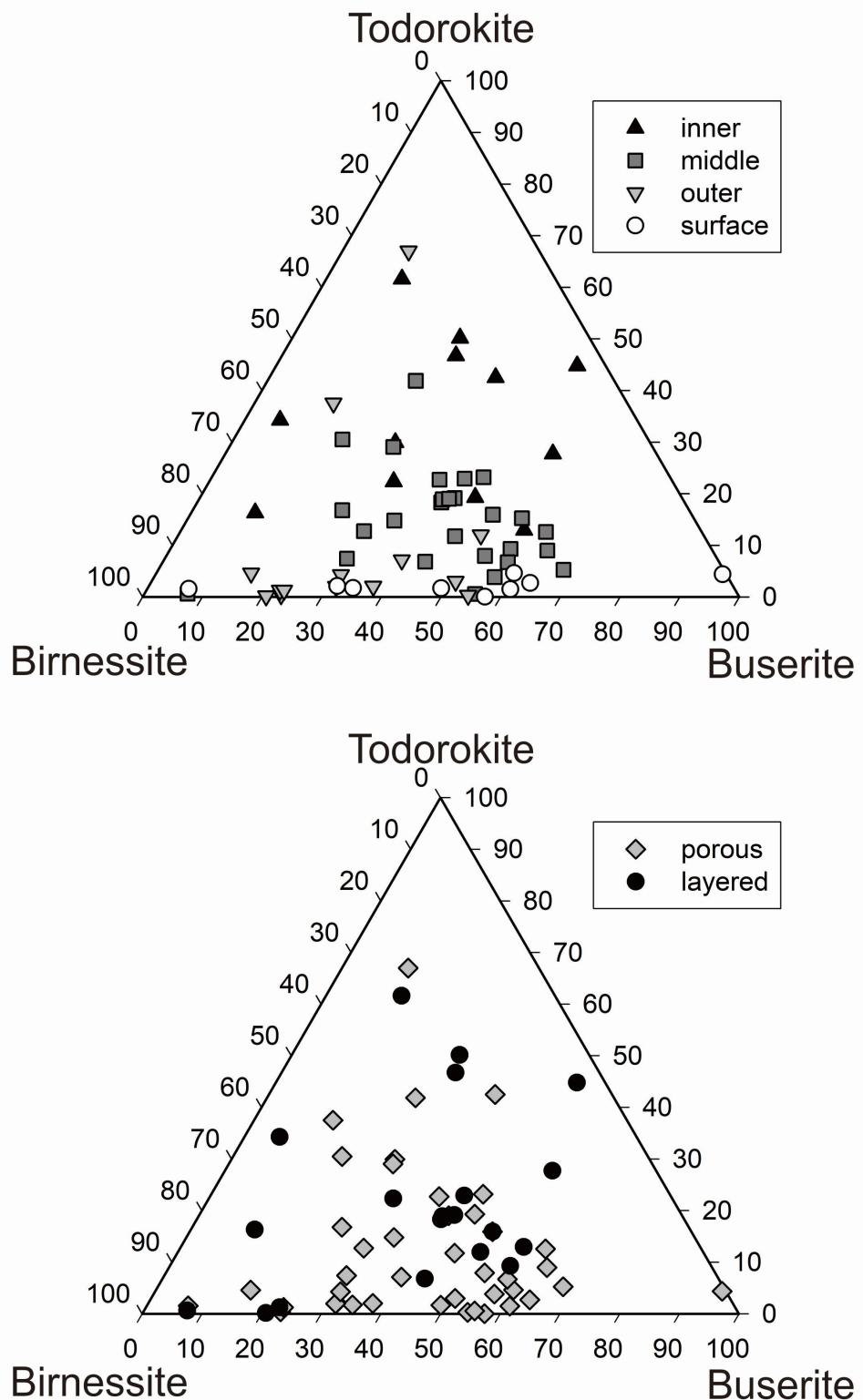


Fig. 33. Ternary diagrams of buserite-todorokite-birnessite contents for the Mn nodule samples depending on (A) internal structure, (B) lamellae depths within the nodule.

마. 망간단괴의 성인

망간단괴의 성인은 화학조성 및 주변 지질 환경을 근거로 수성기원(hydrogenetic), 속성기원(diagenetic), 열수기원(hydrothermal) 및 복합기원(mixed-type)으로 분류될 수 있다. 속성기원은 공극수로부터 금속이 침전되는데 이 경우 해수로부터 침전되는 수성기원의 경우보다 유체 중 Mn의 농도가 높아서 Mn/Fe 비가 높은 특징을 나타낸다(Bonatti et al., 1972; Wegerzewski and Khun, 2014; Khun et al., 2017). 일반적으로, Mn/Fe 비가 5보다 큰 경우 속성기원으로, 5 이하인 경우는 수성기원으로 여겨진다. 동시베리아해 망간단괴에서 다공질대와 층상대는 모두 19 이상의 매우 높은 Mn/Fe 비를 나타냈으며, 이는 단괴 대부분이 속성기원의 성장을 겪었음을 의미한다. 반면, 망간단괴 내에 얇은 폭으로 존재하는 산화철층이 형성되는 기간 동안, 일시적으로 수성기원의 성장이 이루어졌을 가능성도 있다.

또한, 망간단괴의 기원은 $Mn-Fe-(Cu+Ni+Co) \times 10$ 삼각 도표를 통해 구별할 수 있다(Bonatti et al., 1972). 동시베리아해에서 채취된 모든 망간단괴들은 Mn/Fe 비가 매우 높고 $(Cu+Ni+Co) \times 10$ 값은 매우 낮아 삼각도표의 속성기원 영역에 도시된다. 그러므로 북극해 망간단괴들은 초기 속성 작용에 의해 형성된 속성기원으로 판단된다. 망간단괴가 채취된 동시베리아해 주변 지역에서 아직까지 열수 활동이 보고된 사례가 없으며(Baturin et al., 2017), Mn의 함량은 높지만 Cu, Ni, Co 등 다른 금속 원소의 함량이 매우 낮은 것은 망간단괴의 형성이 열수기원과는 크게 관련되지 않음을 뜻한다.

철산화물층을 제외한 내부조직에서, 수성기원의 대표적인 조직으로 알려져 있는 주상조직을 갖는 층상대는(Choi et al., 2000), 연구지역의 단괴에서 제한적으로 발달한다. 최근 연구에서 $Mn-Fe-(Cu+Ni+Co) \times 10$ 삼각도표를 이용한 접근은 수성기원과 속성기원의 침전을 명확하게 구분할 수 없다는 보고가 있었기 때문에(Zhong et al., 2017), 단괴가 형성되는 일부 기간은 수성기원에 의한 것일 수도 있다. 하지만, 미세 조직 간의 화학적 성분 차이가 거의 나타나지 않는 점은 철산화층을 제외한 단괴의 조직들이 하나의 성인을 가질 가능성이 크며, 그 성인은 속성기원일 것으로 사료된다. 동시베리아해 망간단괴에서 특징적으로 높은 Mn의 기원은 북극해의 특수한 환경과 주변 퇴적물들로부터 찾을 수 있다. 북극해에서 망간의 함량은 특징적인 갈색층을 형성할 정도로 풍부하다 (Marz et al., 2011). 북극해는 50% 정도의 대륙붕 을

포함하기 때문에, 빙하기-간빙기 동안의 해수면 변화는 Mn의 유입량에 큰 영향을 미치는데, 해수면이 낮은 빙하기 동안, Mn의 총 유입은 감소하지만 대륙붕 위의 동토층(parmafrost)에 집적된다(Macdonald and Gobeil, 2012). 북극해로 유입되는 대부분의 Mn은 북극해 연안에 위치한 강 또는 연안 침식에 의해 비롯되며, 이들 대부분이 북극해에 갇혀 있기 때문에(Macdonald and Gobeil, 2012), 동시베리아해 망간단괴에서 특징적으로 높은 Mn 함량을 나타내는 것으로 판단된다.

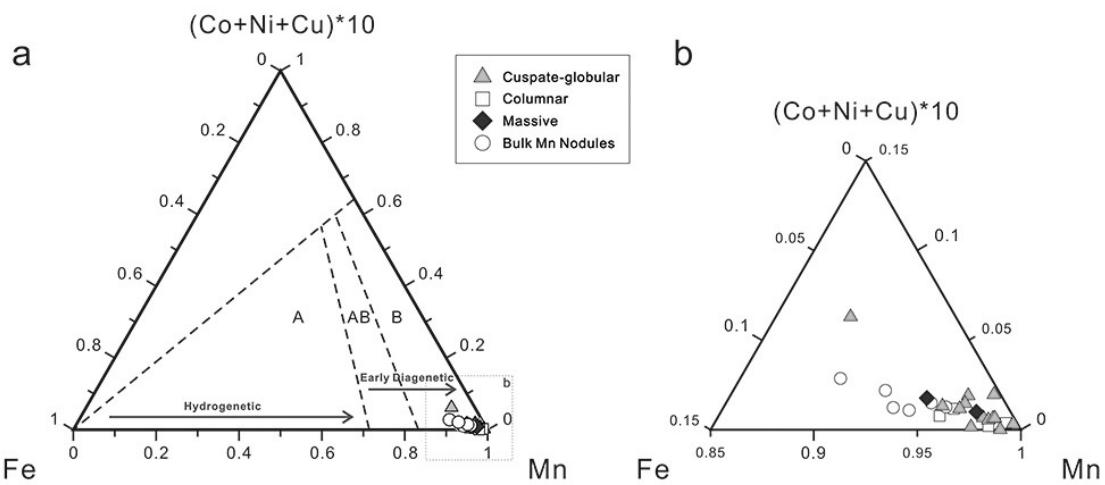


Fig. 34. Ternary diagram of $\text{Fe}-\text{Mn}-(\text{Cu}+\text{Ni}+\text{Co}) \times 10$ showing the geochemical relationship between different genetic types of nodules. Dashed black lines border the three nodule type fields A: hydrogenetic nodules, B: diagenetic nodules, and AB: mixed type.

2. 동시베리아해(East Siberian Sea) 해양 퇴적물

가. 코어 퇴적물

ARA07C Expedition 기간 동안 획득한 코어 중 동시베리아해와 척치해에서 총 6 개의 코어 퇴적물을 이용하였다. 동시베리아해에서 획득한 코어 퇴적물은 총 4개이며, ARA07C Expedition 기간 동안 동시베리아해 대륙붕으로부터 척치분지 사면에 위치한 4개 정점(ARA07C-St02B, ARA07C-St03, ARA07C-St05, ARA07C-St07)에서 획득하였다. 척치해에서 획득한 코어 퇴적물은 총 2개이며, 정점 ARA07C-St13과 ARA07C-St14에서 획득되었다. ARA07C-St03, St05, St07의 3 정점의 수심은 50 - 270 m이며, 척치해의 St13과 St14의 수심은 약 650m이다. ARA07C 탐사중 St13의 GC 하부에서 가스 하이드레이트가 발견되었다. 정점에 대한 정보는 Table 12에 제시하였다.

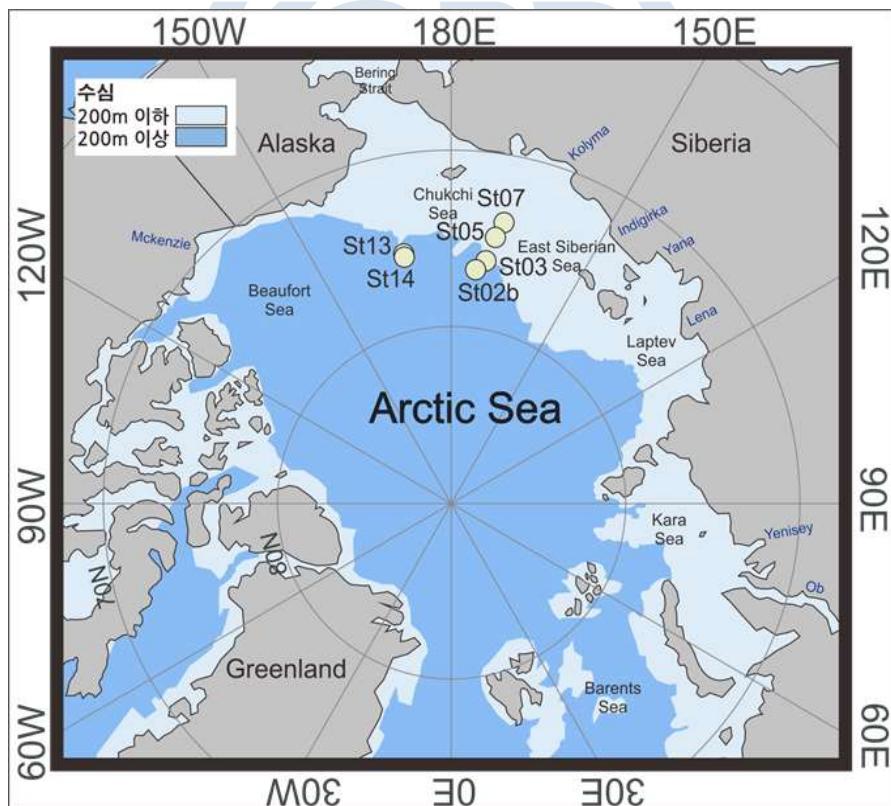


Fig. 35. Map showing the sample location during the ARA07C Expedition

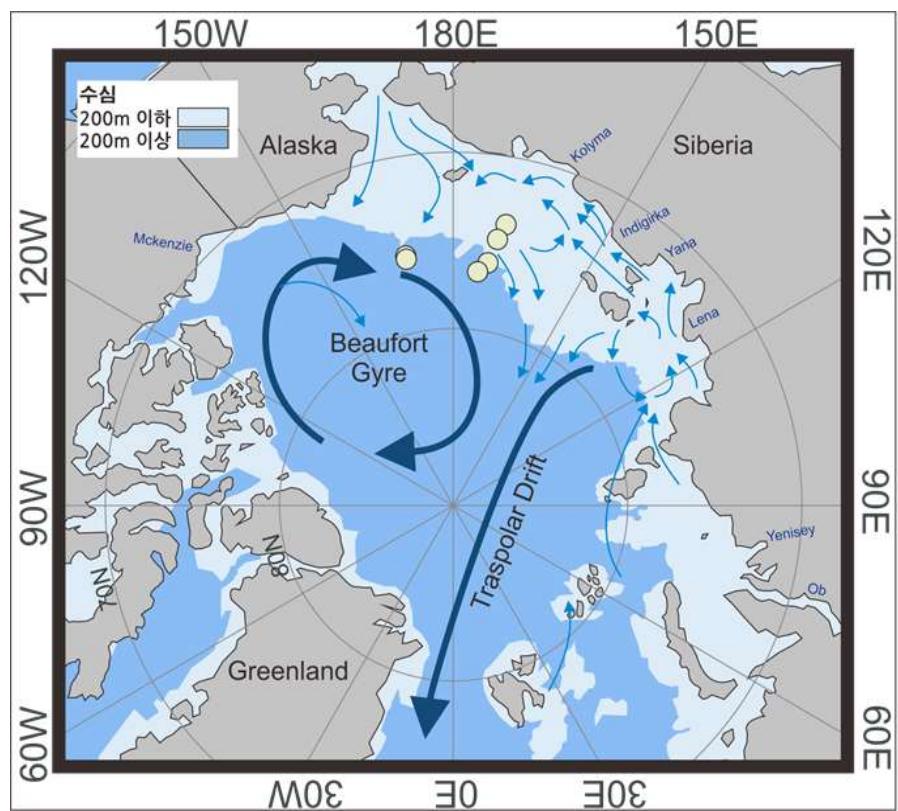


Fig. 36. Map showing the major current in the Arctic Ocean

Table 13. Site information of gravity core during the ARA07C Expedition

Station	Water Depth (cm)	Core Depth (cm)	Latitude	Longitude
St02b	648	345	76.75	174.32
St03	308	378	76.11	172.65
St05	60	140	74.75	170.45
St07	44	137	73.82	169.2
St13	610	235	75.68	-169.74
St14	653	161	75.7	-169.76

코어는 동시베리아해 지역에 속하는 St02b, St03, St05, St07와 척치해 지역에 속하는 St13, St14로 구분된다. 동시베리아해 지역의 4개 코어는 대체로 갈색, 밝은 회색을 띤다. St02b의 상부는 갈색, 하부는 암록색과 회색을 띤다. St03은 밝은 회색과 갈색을 띠고, St05는 밝은 회색을 띠며, St07도 밝은 회색을 띤다. 반면, 척치해 지역의 St13과 St14는 짙은 회색을 띤다(Fig. 37).

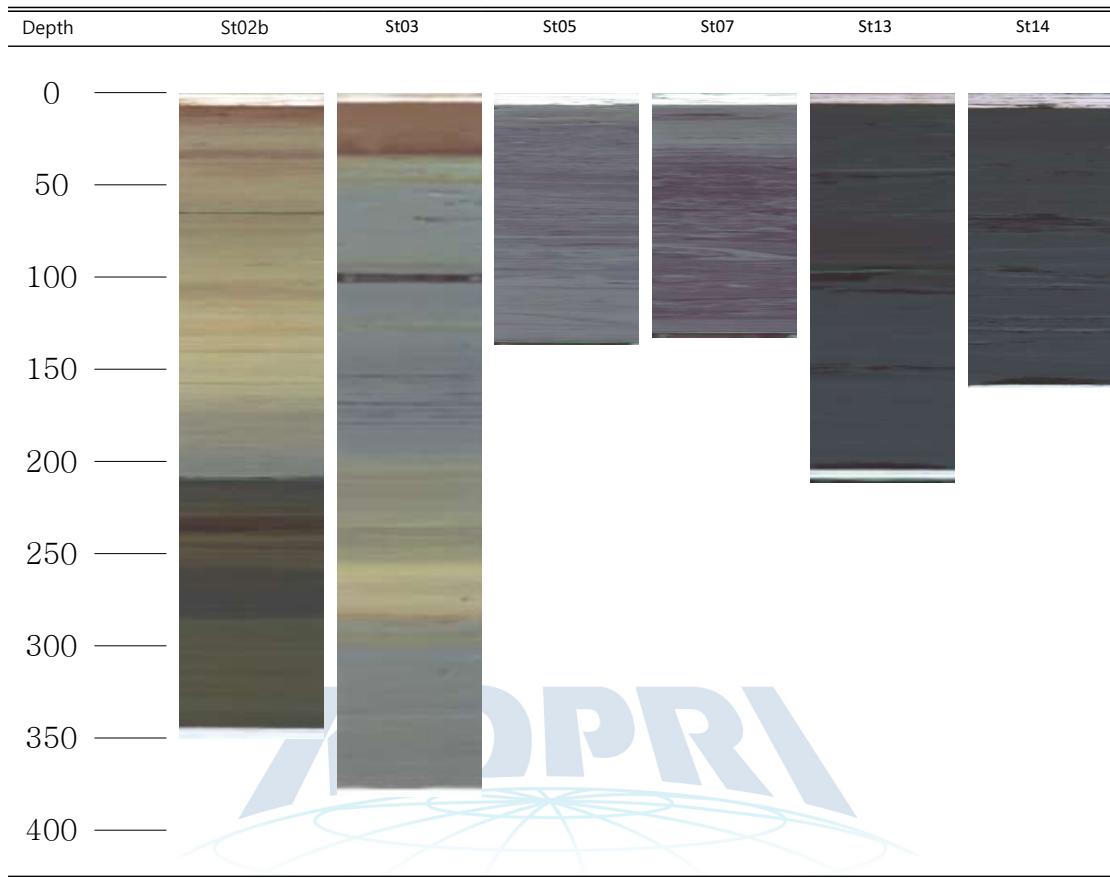


Fig. 37. Core images acquired during the ARA07C Expedition

나. 입도 및 광물 조성

각 코어에 대한 점토광물 반정량 분석 결과와 깊이에 따른 수직적 변화는 Fig. 38에 제시하였다. 점토광물의 상대적 함량은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 풍부하며, 정점에 따른 차이는 크지 않다. 일라이트는 북극해에 가장 많이 존재하는 점토광물로서 코어 퇴적물에서 최소 49 %에서 최대 83 %까지 포함되고, 평균 65 %이다. 녹니석은 두 번째로 많은 점토광물로서, 최소 9 %에서 최대 30 %로 평균 21 %이며, 카올리나이트는 최소 5 % 최대 28 %로 평균 11 %, 스멕타이트는 최소 0.3 % 최대 6.5 %, 평균 1.7 %이다. ARA07C-St03, ARA07C-St05, ARA07C-St07과 비교하여 ARA07C-St02b와 ARA07C-St13, ARA07C-St14는 수직적 변화가 뚜렷하게 나타난다.

퇴적물 코어의 입도 분석은 ARA07C-St02b와 ARA07C-St13 두 개의 코어 퇴적물에 대하여 수행하였다. 입도 분석 결과, ARA07C-St02b는 sand가 평균 2.6 %,

silt가 평균 35.4 %, clay가 평균 62 %로 나타났다. ARA07C-St13 GC는 sand 평균 3. 1%, silt 평균 31.4 %, clay 평균 65.5 %로 두 코어 모두 대부분 머드로 구성되어 있다.

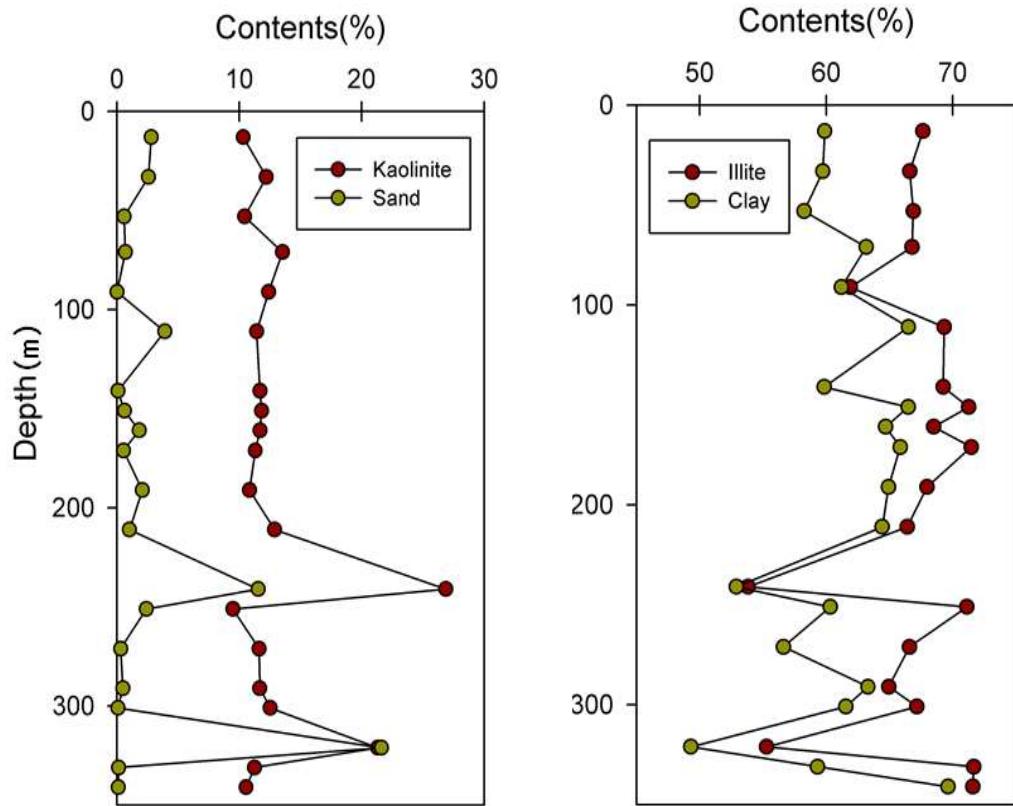


Fig. 38. Vertical variation of grain size and clay minerals in core ARA07C-St02B

가스 하이드레이트가 발견된 ARA07C-St13, ARA07C-St14 코어 퇴적물은 나머지 코어들과 비교하여 짙은 회색을 띠어 유기물 함량이 높은 것으로 판단되며, 스멕타이트 함량이 높았다. 그러나, 스멕타이트 함량에 따른 차이는 매우 미비하였으며, 동시베리아해와 척치해로 구분한 점토광물 함량의 지역적 차이는 거의 없었다.

점토광물 함량과 입도분포를 비교해보면 가스 하이드레이트가 발견된 코어인 ARA07C-St13의 카올리나이트와 sand의 수직적 변동이 유사하며, 일라이트는 clay와 유사한 경향을 나타낸다. ARA07C-St02b 또한 카올리나이트는 sand와, 일라이트는 clay와 유사한 변화를 보인다. 각 코어별 일라이트와 카올리나이트의 상관관계를 보면 수심이 깊은 지역의 ARA07C-St02b, ARA07C-St13, ARA07C-St14는 카올리나이트와 일라이트가 반비례한다. 반면, 수심이 얕은 지역의 ARA07C-St03,

ARA07C-St05, ARA07C-St07은 카올리나이트와 일라이트의 상관관계를 찾을 수 없다. 따라서, 점토광물함량과 입도의 연관성은 코어의 수심에 따라 달라지는 것으로 판단된다. 수심이 깊은 코어와 얕은 코어의 점토광물 함량을 삼각도표로 비교해 보면, 수심이 얕은 ARA07C-St03, ARA07C-St05, ARA07C-St07의 경우 점토광물 함량 분포가 집중되지만, ARA07C-St02b, ARA07C-St13, ARA07C-St14의 경우 점토광물 함량이 비교적 넓게 분포한다.

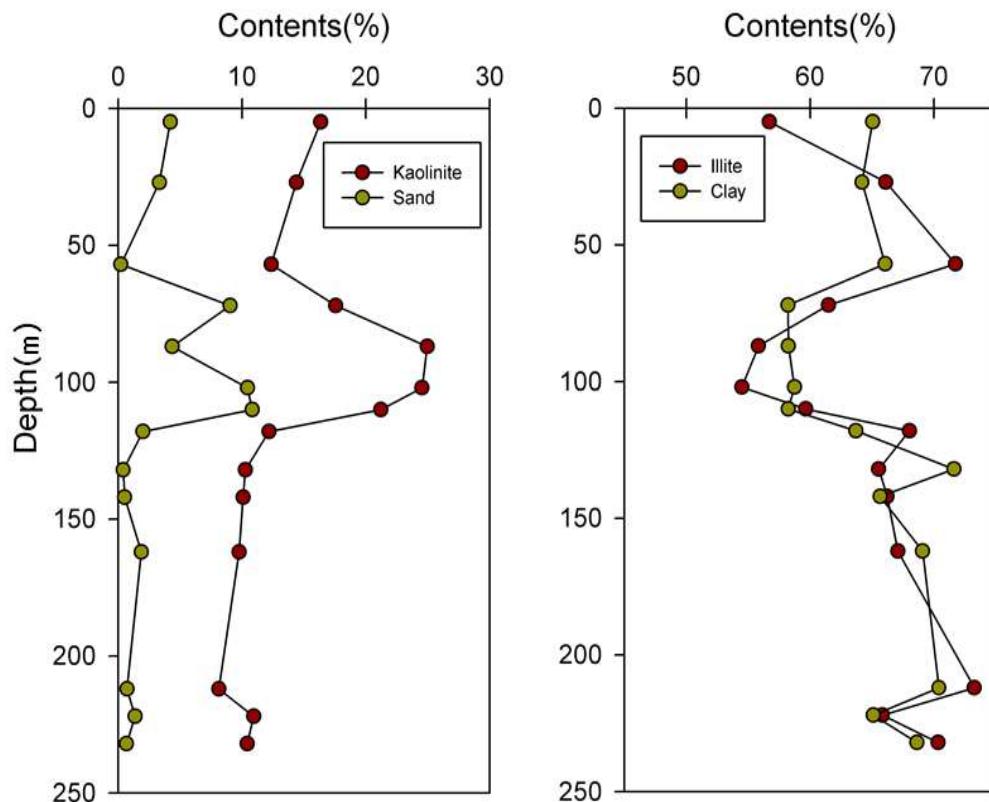


Fig. 39. Vertical variation of grain size and clay minerals in core ARA07C-St13

다. 퇴적물 기원지

퇴적물의 기원지를 유추하기 위해 주변 강 점토광물 데이터를 수집하여 ARA07C의 점토광물 함량과 비교하였다. ARA07C-St03, ARA07C-St05, ARA07C-St07은 Indigirka River, Kolyma River의 점토광물함량과 유사함으로 Indigirka, Kolyma River의 직접적인 유입이 있었을 것으로 판단된다. 반면, ARA07C-St02b, ARA07C-St13, ARA07C-St14는 Indigirka, Kolyma, Mckenzie River의 점토광물 함

량과 유사하며, Indigirka, Kolyma, Mckenzie River 외에도 다른 복합적인 퇴적물의 유입이 있었을 것으로 판단된다.

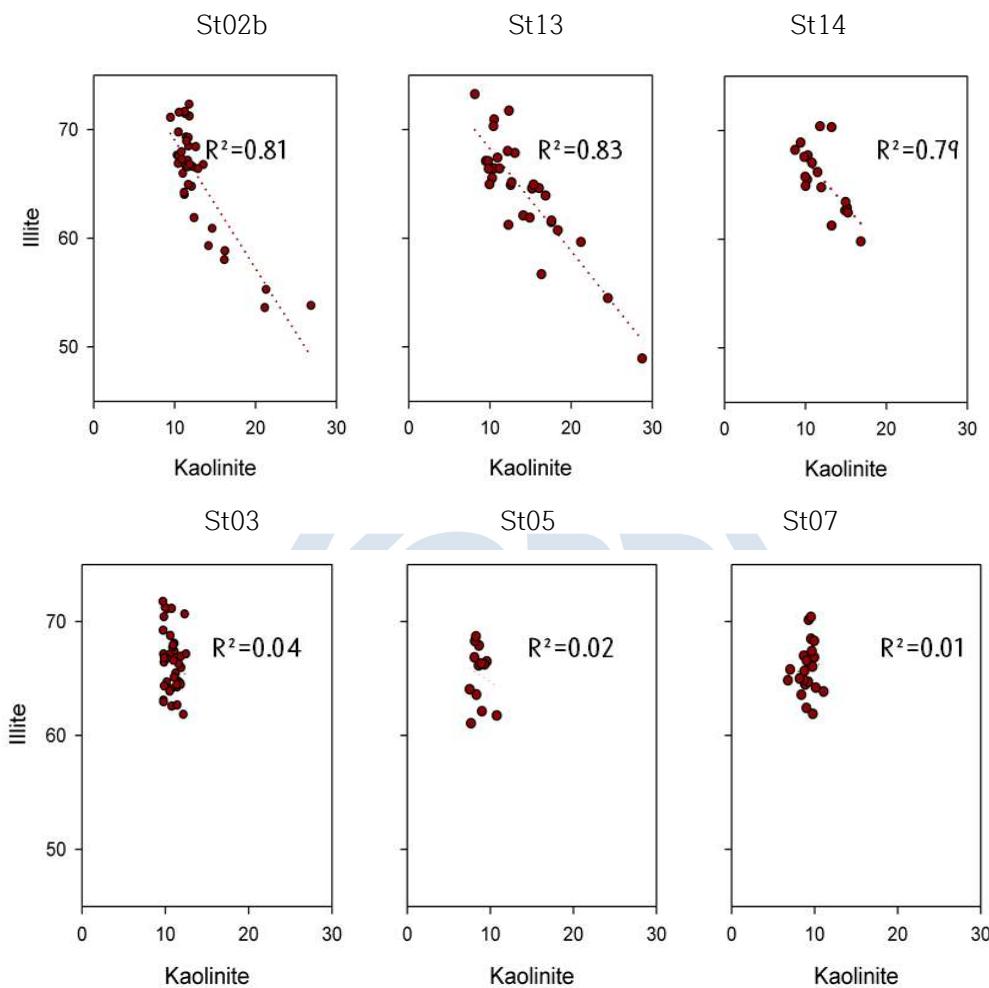


Fig. 40. Correlation between the illite and kaolinite

Table 13. Clay mineral composition of river sediment in the Arctic Ocean

	Rivers	Smectite	Illite	Kaolinite	Chlorite
East siberian sea	Kolyma River	5	59	9	27
	Indigirka River	3	71	5	21
Chukchi sea	River of alaska : Notak, Kobuk	2	66	1.5	30.5
Beaufort Sea	Mckenzie River	5.5	65	17	12.5

Ref. Silverberg(1972); Naidu et al.(1982); Naidu and Mowatt(1983); M Wahsner(1999)

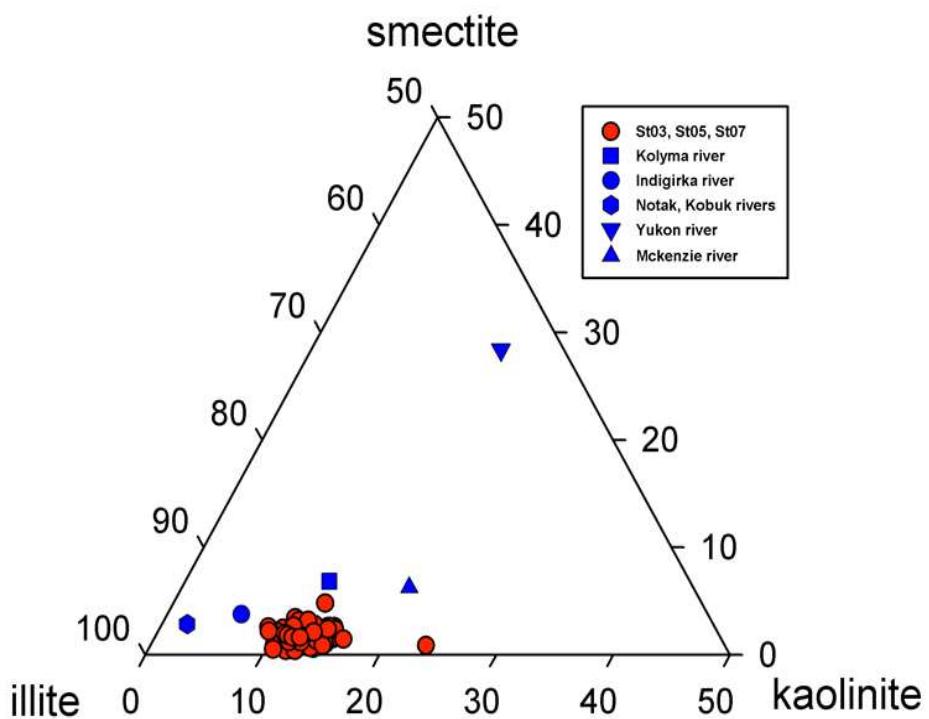


Fig. 41. Ternary diagram of smectite-illite-kaolinite for ARA07C-St03, St05, St07

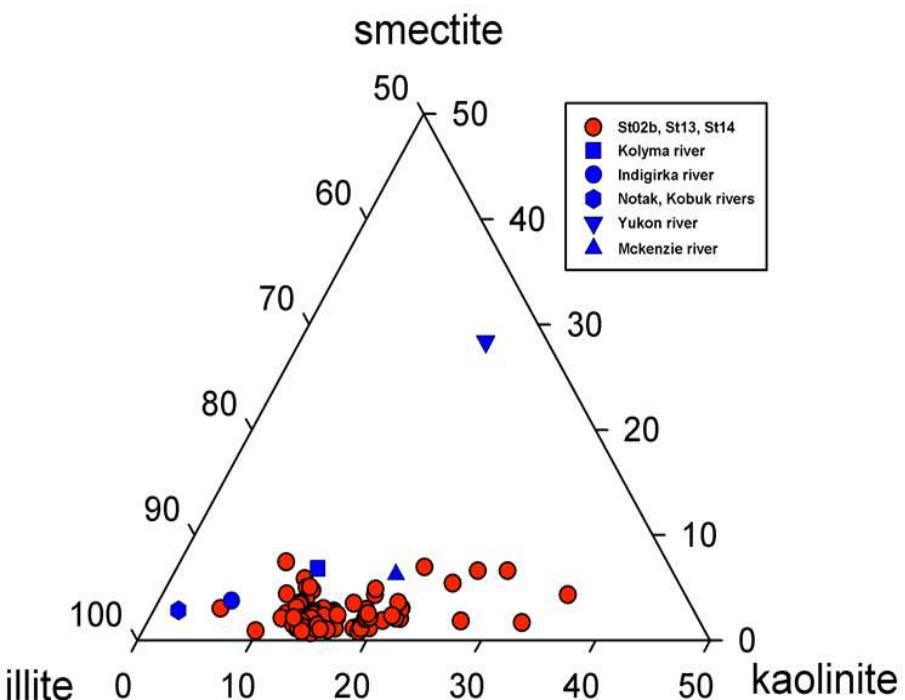


Fig. 42. Ternary diagram of smectite-illite-kaolinite for ARA07C-St02b, St13, St14

3. 척치해(Chukchi Sea) 해양 퇴적물

가. 코어 퇴적물

극지연구소의 쇄빙선 아라온호를 이용해 Arctic Expedition ARA07C와 ARA09C 탐사에서 채취된 총 5개의 중력 코어(gravity core)를 사용하였다. 중력 코어 중 4 개는 아라온 마운드 구조에서, 1개는 마운드 사이의 사면에서 채취하였다. 마운드 구조 중력 코어는 AM1의 ARA07C St13-GC, AM6의 ARA09C St04-GC와 ARA09C St07-GC, AM7의 ARA09C St12-GC이며, 사면 중력 코어는 AM6과 AM7 사이의 ARA09C St13-GC이다. 아라온 마운드에서 획득된 코어 퇴적물은 상부에서 하부로 감에 따라 퇴적물의 색이 일반적으로 갈색, 회색, 녹회색으로 변화된다. 갈색 퇴적물은 표층에서 주로 관찰되며 소량의 사질을 포함한 생교란 니질 퇴적물로 구성된다. 갈색층 하부에 존재하는 괴상의 암회색층은 때로는 회색과 암회색층이 띠로 반복되며, 이 퇴적층 내에는 회색 내지 분홍색 계열의 암편이나 조립질 입자가 불규칙적으로 산재하거나 수평 층리로 분포하는 것이 특징적이다. 회색층 아래의 최하부 녹회색 퇴적층은 세 층서 중 가장 세립질 퇴적물로 구성된다(Jin and Shipboard Scientific Party, 2019).

아라온 마운드 사이 사면에서 획득한 코어 퇴적물 역시 아라온 마운드 코어 퇴적물과 같이 상부에서 하부로 감에 따라 전반적으로 갈색, 회색, 녹회색을 띤다. 그러나 아라온 마운드와는 달리, 갈색 퇴적층이 표층뿐만 아니라 코어의 하부에서도 관찰된다(Jin and Shipboard Scientific Party, 2019). 갈색층 사이에는 괴상의 암회색층과 세립질의 녹회색 퇴적층이 존재한다. 두 번째 갈색층 상부에는 1cm 두께의 밝은 분홍색 계열의 퇴적층이 관찰되며, 이 퇴적층 내에는 조립질 암편이 빈번하게 산출된다(Jin and Shipboard Scientific Party, 2019).

나. 벌크 광물 조성

아라온 마운드 코어(ARA07C-St13) 퇴적물 시료 43개와 사면 코어(ARA09C-St13) 퇴적물 시료 22개에 대하여 벌크 광물 정량 분석을 실시한 결과, 이들은 대부분 규산염 광물로 구성되며, 탄산염 광물, 황산염 광물과 철광물이 소량 존재한다. 규산염 광물은 주로 석영, 장석(사장석, 알칼리 장석)과 같은 규장질 광물(felsic mineral)과 점토광물(일라이트, 녹니석, 카올리나이트)로 구성되며, 휘석, 각

섬석, 흑운모, 백운모와 같은 고철질 광물(mafic mineral)은 소량 포함되어 있다. 탄산염 광물은 거의 전부 백운석이며, 그 양은 시료에 따라 변화는 있지만 대부분 0.3-3.0 %이다(Table 14).

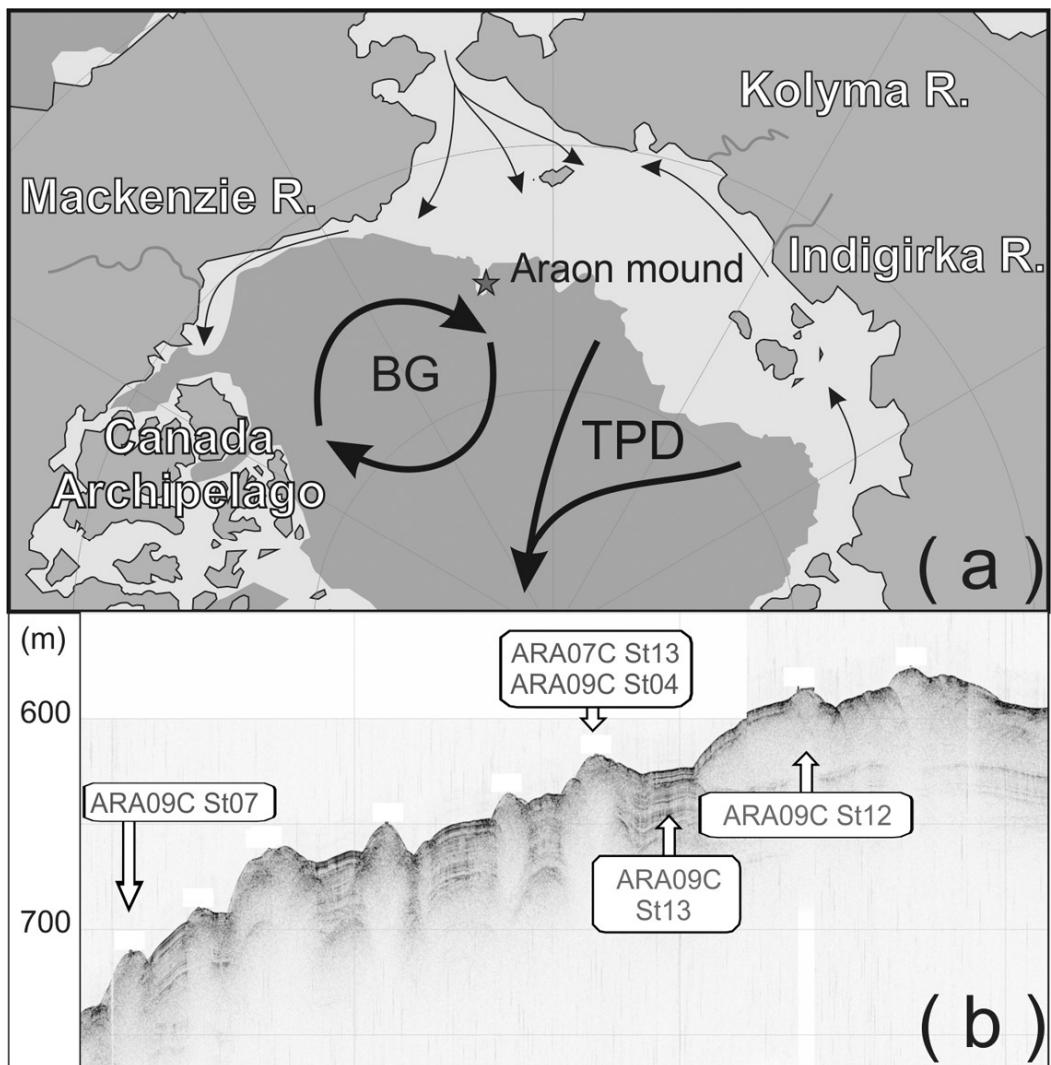


Fig. 42. (a) Map showing the locations of Araon mound. The thick arrow represents Beaufort Gyre (BG) and TransPolar Drift (TPD), and the narrow arrow represents coastal currents. (b) Sub-Bottom Profiler (SBP) image showing the locations of sediment core of Araon mound.

아라온 마운드 코어(ARA07C-St13) 퇴적물은 사면코어(ARA09C-St13) 퇴적물에 비하여 규장질 광물과 점토광물은 각각 약 14%, 2.5% 씩 많이 포함되어 있고, 고철질 광물은 3.2% 적게 포함되어 있다. 마운드 코어 퇴적물은 사면 코어 퇴적물보다

석영을 거의 2배 많이 포함하고 있으며, 사장석, 일라이트, 녹니석 함량은 다소 높고, 알칼리장석, 백운모, 흑운모, 휘석 등의 함량은 다소 낮다. 탄산염 광물의 대부분을 차지하는 백운석은 마운드 코어 퇴적물이 사면 코어 퇴적물보다 약 1.2% 더 많이 포함하고 있으며, 유일한 황산염 광물인 석고는 마운드 코어 퇴적물에서는 존재하지 않고, 메탄 하이드레이트가 확인된 사면 코어 퇴적물에서만 존재하는데, 그 함량은 평균 4.2%이다. 석고는 메탄 하이드레이트의 존재를 판단하는 지시자로 많이 연구되어 있으므로(Kocherla 2013; Pierre et al., 2014; Lin et al., 2016; Pierre, 2017), 본 연구지역의 메탄 하이드레이트와 석고의 유의미한 관계를 파악하기 위해서 추가적인 연구를 통하여 그 관계를 밝히려고 준비 중에 있다.

Table 14. Average content of bulk mineral composition by unit

Core	Unit	n	Qtz	Ksp	Pl	Px	Amp	Bt	Mus	Il	Kao	Chl	Dol	Gyp	Fe
ARA09C -St13	1	5	20.5	4.1	13.2	0.3	0.7	0.2	9.9	38.2	6.8	5.0	1.0	0.0	0.1
	2	14	29.3	4.4	11.0	0.3	0.5	0.1	9.3	29.8	7.4	4.8	3.0	0.0	0.1
	3	24	22.5	4.9	15.8	0.2	0.6	1.1	4.9	35.6	6.8	6.3	1.2	0.0	0.2
ARA07C -St13	Avg	43	24.7	4.7	13.9	0.2	0.6	0.7	6.9	33.8	7.0	5.6	1.8	0.0	0.1
	2	13	23.9	6.2	11.3	0.6	0.6	2.2	7.5	29.5	7.4	3.6	0.8	5.8	0.4
	3	9	18.1	4.6	13.6	0.5	0.6	1.3	9.9	37.6	6.4	4.9	0.3	1.9	0.2
	Avg	22	21.5	5.5	12.3	0.6	0.6	1.9	8.5	32.8	7.0	4.1	0.6	4.2	0.3

Qtz : Quartz, Ksp : K Feldspar, Pl : Plagioclase, Px : Pyroxene, Amp : Amphibole, Bt : Biotite, Mus : Muscovite, Il : Illite, Kao : Kaolinite, Chl : Chlorite, Dol : Dolomite, Gyp : Gypsum, Fe : Fe mineral

다. 점토 광물 조성

사면 코어(ARA09C-St13) 퇴적물 시료의 4가지 주요 점토광물 함량은 일라이트가 가장 많으며, 그 다음으로 녹니석, 카올리나이트가 많고, 스멕타이트는 가장 적다. 일라이트는 평균 65.4% (45.9–76.7%), 녹니석은 평균 18.2% (10.7–22.1%), 카올리나이트는 평균 13.6% (7.9–32.7%), 스멕타이트는 평균 2.9% (4.7–1.5%)이다(Table 15). 4개의 아라온 마운드 코어(ARA07C-St13-GC, ARA09C-St04-GC, ARA09C-St07-GC, ARA09C-St12-GC) 퇴적물의 점토광물 함량 역시 사면 코어 퇴적물 시료와 같이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 감소한다. 일라이트는 48.9%에서 86.9%까지 포함되어 있으며 평균 63.4%이다. 녹니석은 2.6%에서 25.4%까지 포함되어 있으며 평균 19.2%이며, 카올리나이트는 8.1%에서 31.2%까지

포함되어 있으며 평균 14.6%이다. 스멕타이트는 0.4%에서 6.6%까지 포함되어 있으며 평균 2.8%이다(Table 15). 사면 코어와 마운드 코어의 점토광물 함량은 큰 차이가 없지만, 사면 코어에 비해서 마운드 코어는 일라이트가 약간 적고, 녹니석과 카올리나이트는 조금 많으며, 스멕타이트의 함량은 유사하다.

Table 15. Average content of relative clay mineral composition by unit (%)

Core	Unit	n	Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite
ARA07C -St13	2	15	63.3	17.4	16.3	3.0
	3	10	67.9	18.8	10.2	3.1
	Avg	25	65.1	18.0	13.8	3.1
ARA09C -St04	1	4	64.9	22.1	11.7	1.3
	2	22	61.3	18.7	16.8	3.1
	3	2	65.5	20.6	10.7	3.2
Avg			62.1	19.3	15.7	2.9
ARA09C -St07	1	11	63.3	20.2	13.5	3.0
	2	14	61.4	19.7	16.3	2.7
	3	11	67.0	20.2	10.2	2.6
Avg			63.7	20.0	13.6	2.7
ARA09C -St12	1	4	65.2	20.8	11.9	2.0
	2	13	59.5	17.6	20.2	2.6
	3	8	66.3	20.7	10.0	3.0
Avg			62.6	19.1	15.6	2.6
ARA09C -St13	1	5	68.4	17.3	10.8	3.4
	2	14	59.1	18.8	19.8	2.3
	3	23	68.4	18.0	10.5	3.1
Avg			65.4	18.2	13.6	2.9

라. 유닛 구분

북극의 해양퇴적물은 과거 기후 변화에 대한 기록을 포함하고 있기 때문에, 다양한 방법을 통하여 기후 변화를 알아내기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구를 통해 제4기 동안 빙기와 간빙기가 여러 차례 반복되었음을 알 수 있다 (Jakobsson et al., 2000; Phillips and Grantz, 2001; Polyak et al., 2004; Stein et al., 2010; Dong et al., 2017; Park et al., 2017). 빙기와 간빙기를 구분하는 프록시(proxy)로서 퇴적물 내에 포함되어 있는 벌크광물조성, 점토광물조성, 유기탄소함량 (Total Organic Carbon, TOC)과 같은 지화학 조성, 유기물, 생물기원 탄산염 등이

활용되고 있다(Naidu and Mowatt, 1983; Rachold, 1999; Wahsner et al., 1999; Vogt et al., 2001; Viscosi-Shirley et al., 2003b).

기존 연구에 의하면, 북극해의 제4기 해양 퇴적물은 빙기, 퇴빙기, 간빙기의 3가지 유형으로 나뉜다(Polyak and Jakobsson, 2011; Park et al., 2017). 북극해에 분포하는 3가지 유형의 퇴적물들은 여러 가지 면에서 차이를 나타내고 있는데, 가장 큰 차이는 퇴적물의 색, Mn 함량, 유공충을 비롯한 미생물의 함량, 탄산염 광물의 함량 등이다. 해수면이 낮고 얕은 대륙붕들이 노출된 빙기의 퇴적물은 녹회색 내지 황색을 띠며, 탄산염 광물의 함량이 낮은 세립질 퇴적물이다(Darby et al., 1997; Polyak et al., 2004; Polyak et al., 2009; Stein et al., 2010). 빙기에서 간빙기로 바뀌는 퇴빙기의 퇴적물은 많은 빙운쇄설물의 유입에 의해 석회석과 백운석 등의 탄산염 광물이 많아지는 경향이 있다(Darby et al., 2006; Park et al., 2017). 간빙기의 퇴적물은 빙운쇄설물이 조금 포함되어 있으며, 대체로 갈색을 띠며, MnO 함량이 높고 유공충이 풍부하며 생물교란의 흔적이 나타난다(Polyak et al., 2004; McKay et al., 2008; Adler et al., 2009).

아라온 마운드 코어와 사면 코어는 공통적으로 상부부터 하부까지 갈색, 회색, 녹회색으로 구성되어 있다. 분홍색 계열의 퇴적층은 마운드 코어에서는 발견되지 않고 사면 코어에서만 존재한다. 벌크광물 분석 결과, 석고가 사면 코어에서만 발견되는 것을 제외하고, 두 코어에 포함된 광물의 종류도 비슷하다. 벌크광물조성 뿐만 아니라 점토광물조성도 유사한 경향을 나타낸다.

탄성과 탐사에서 층서가 잘 나타나는 아라온 마운드 사이의 사면에서 획득한 코어 퇴적물은 코어 상부부터 하부로 갈수록 갈색, 회색, 녹회색으로 구성된다. 갈색 퇴적층은 표층과 코어의 하부 330~401cm에서 관찰되며, 상부의 갈색층은 소량의 사질을 포함한 생교란 니질 퇴적물로 구성된다. 갈색층 하부에는 괴상의 암회색층이 존재하며, 암회색층 내에서는 회색과 암회색층이 얇은 띠 형태로 여러 번 반복된다. 특징적으로, 이 퇴적층 내에는 회색 내지 분홍색 계열의 암편이나 조립질 입자가 불규칙적으로 산재하거나 수평 층리로 분포한다. 암회색층 아래에는 녹회색의 퇴적층이 존재하며 세 층서 중 가장 세립한 퇴적물로 구성된다. 갈색층 사이에는 괴상의 진회색층과 세립질의 녹회색 퇴적층이 존재하며 아라온 마운드와 같은 층서를 보인다. 두 번째 갈색층 상부에는 1cm 두께의 밝은 분홍색 계열의 퇴적층이 관찰되며 조립질 암편이 빈번하게 산출된다(Jin and Shipboard Scientific Party, 2019).

본 연구에서는 탄성파 탐사에서 층서가 잘 나타나지 않는 아라온 마운드 코어 퇴적물을 사면 코어 퇴적물과 비교하여 그 층서를 확립하였다. 아라온 마운드 코어 퇴적물의 층서는 퇴적물의 색, 빙운쇄설물 함량, 벌크광물조성, 점토광물조성 등을 바탕으로, 사면 코어 퇴적물 및 척치해저고원에서 기준에 수행된 연구 결과와 비교하여 유닛을 구분하였다(Park et al., 2017). 제일 상부의 갈색을 띠는 유닛 1, 암회색의 유닛 2, 제일 하부의 녹회색, 갈색, 암회색층이 교대로 나타나는 유닛 3 등 3 개의 유닛으로 나누었다(Fig. 43).

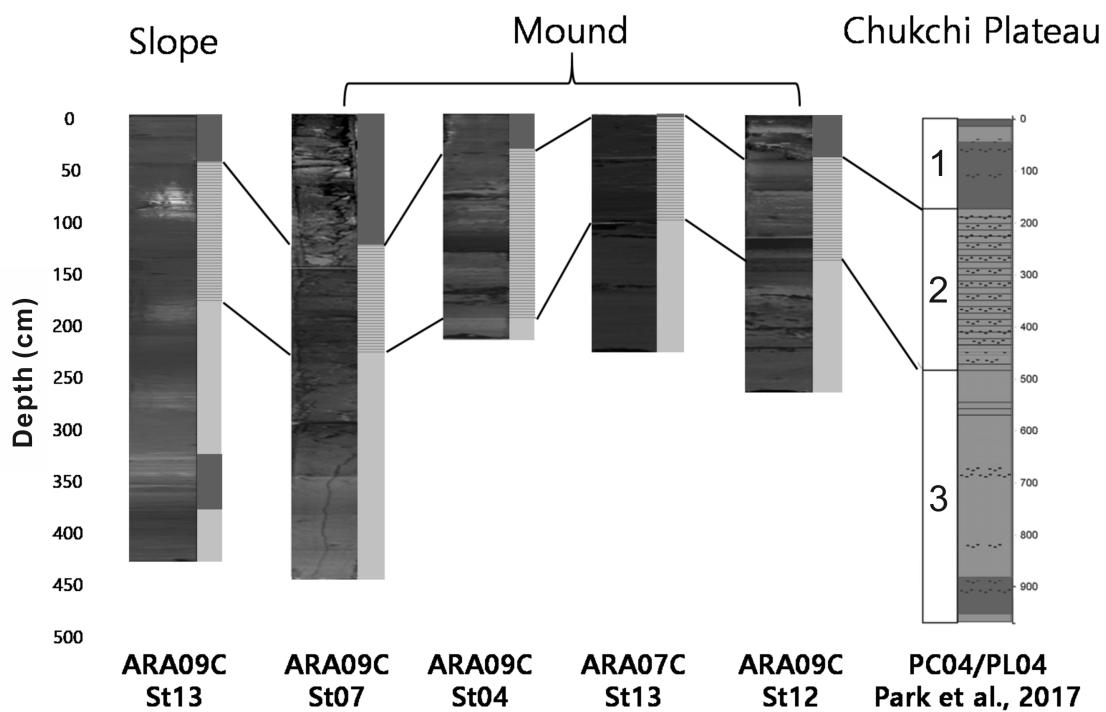


Fig. 43. Correlation of the studied core with PC04/PL04 (Park et al., 2017). (Dark gray color; brown units, Light gray color; gray units, Striped; Laminated layer with abundant IRD).

마. 유닛별 특성

유닛 3은 제일 하부로부터 회색, 녹회색, 갈색, 녹회색의 층이 나타나며 사면코어의 갈색층 상부에 1cm 두께의 분홍색 층이 존재한다(Fig. 43). 대부분 세립질의 입자로 구성되어 있으며 빙운쇄설물 평균 함량은 2.2%이다. 하지만 갈색층과 분홍색에서는 16.3%로 연구 지역 퇴적물 중 가장 높다. 평균 빙운쇄설물 함량은 사면 코

어에서 1.8%, 마운드 코어에서 2.5%의 빙운쇄설물이 함유되어 있다. 사면 코어에서 석영은 22.5%, 유닛 중 가장 함량이 많은 사장석은 15.8%, 알칼리장석은 4.9%이다. 백운석이 1.2%로 빙운쇄설물 함량과 비례하는 경향을 나타내며 특히 분홍색 층에서 12.1%로 연구된 코어 퇴적물 중 가장 높다. 마운드 코어의 경우 석영은 18.1%, 사장석은 13.6%, 백운석은 0.3%로 나타난다.

점토광물 중 사면 코어에서 일라이트가 67.6%, 녹니석이 19.2%, 카올리나이트가 10.1%, 스멕타이트가 3.2%로 나타나며 마운드 코어에서는 일라이트가 66.0%, 녹니석이 19.9%, 카올리나이트가 11.3%, 스멕타이트가 2.8%로 일라이트가 유닛 중 가장 높은 함량을 보이며 카올리나이트가 가장 낮은 함량을 보인다. 분홍색 층이 나타나는 335cm에서는 빙운쇄설물 16.3%, 석영 27.3%, 백운석 12.1%로 대부분 석영과 백운석으로 이뤄진 빙운쇄설물 층이다.

유닛 2는 조립질의 짙은 회색 퇴적물이며 진회색과 회색이 반복되어 층을 이루며 반복되는 층 사이에 진회색의 괴상층이 두껍게 존재한다(Fig. 2; Jin and Shipboard Scientific Party, 2019). 평균 빙운쇄설물 함량은 사면 코어에서 4.4%, 마운드 코어에서 4.6%가 함유되어 유닛 중 가장 높은 함량을 보인다. 사면 코어에서 석영은 29.3%, 사장석은 11.0%이며 백운석이 3.0%로 석영과 백운석의 함량이 가장 높게 나타난다. 마운드 코어의 경우 석영은 23.9%, 사장석은 11.3%, 백운석은 0.8%로 사면코어와 마찬가지로 가장 높게 나타난다. 점토광물 중 사면 코어에서 일라이트가 61.2%, 녹니석이 18.2%, 카올리나이트가 17.7%, 스멕타이트가 2.9%로 나타나며 마운드 코어에서는 일라이트가 59.1%, 녹니석이 18.8%, 카올리나이트가 19.8%, 스멕타이트가 2.3%로 카올리나이트가 특히 높게 나타난다.

유닛 1은 상부는 주로 갈색이며, 하부는 녹회색을 띤다(Fig. 43; Jin and Shipboard Scientific Party, 2019). 평균 빙운쇄설물 함량은 사면 코어에서 1.9%, 마운드 코어에서 2.2%로 적은 양의 빙운쇄설물이 함유되어 있다. 사면 코어에서 석영은 20.5%, 사장석은 13.2%으로 나타난다. 점토광물 중 사면 코어에서 일라이트가 68.4%, 녹니석이 17.3%, 카올리나이트가 10.8%, 스멕타이트가 3.4%로 나타난다. 마운드 코어에서는 일라이트가 64.1%, 녹니석이 20.9%, 카올리나이트가 12.6%, 스멕타이트가 2.4%로 나타난다.

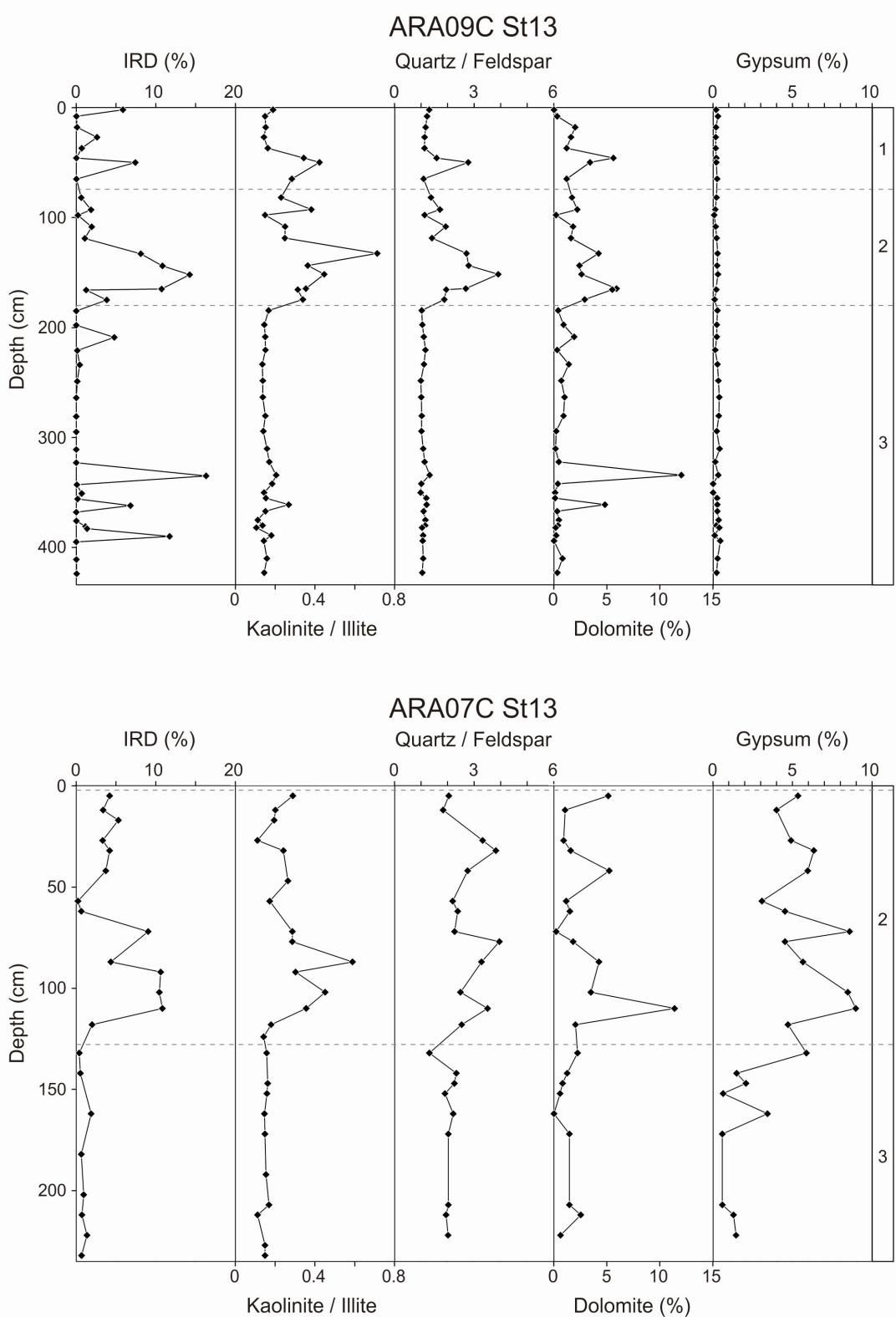


Fig. 44. Downcore profiles of the IRD contents (%), Kaolinite/Illite ratio, Quartz/Feldspar ratio, Dolomite contents (%), and Gypsum contents (%) for ARA09C ST13 and ARA07C ST13 cores.

사면코어와 마운드코어에서 공통적으로 유닛 3에서 사장석과 일라이트의 함량이 높게 나타나며 카올리나이트, 빙운쇄설물 함량이 가장 낮게 측정되었다. 유닛 2는 석영, 백운석, 카올리나이트 함량과 빙운쇄설물의 함량이 가장 높게 측정되었다(Fig. 44). 유닛별 퇴적물의 색과 퇴적물의 특징이 동일할 뿐만 아니라, 벌크광물조성과 점토광물 특성이 일치하는 것으로 보아 사면 코어에서 나타나는 층서가 마운드 코어에서도 동일한 것으로 판단된다(Fig. 44).

바. 유닛별 퇴적물의 기원지 및 고환경 변화

서북극해의 퇴적물은 대부분 육성 기원의 퇴적물이므로, 기원지와 공급 방법에 따라 광물조성이 다른 특성을 가진다. 연구 지역인 척치해저고원 쇄설성 퇴적물의 주요 기원지로는 캐나다 북극 군도, 맥肯지 삼각주 지역, 동시베리아 등이 있다(Naidu and Mowatt, 1983; Wahsner et al., 1999; Darby et al., 2011; Fagel et al., 2014).

북극의 빙기에 서북극해에 넓게 확장된 로렌타이드 빙상의 주 기원지 중 하나인 캐나다 북극 군도의 벌크광물조성은 석영 18%, 장석 9%, 백운석 22.9%이며, 캐나다 북극 군도 중 엘레프팅네스 섬의 점토광물조성은 일라이트 52.9%, 녹니석 12.9%, 카올리나이트 19%, 스멕타이트 15.1%로 나타난다(Darby et al., 2011). 캐나다 군도는 높은 석영/장석 비와 매우 높은 백운석 함량, 낮은 일라이트 함량과 카올리나이트/녹니석 비가 매우 큰 특징이다.

보퍼트해로 유입되는 맥肯지 강 퇴적물의 벌크광물조성은 석영 46.2%, 장석 9.9%, 백운석 14.6%이며, 점토광물조성은 일라이트 65%, 녹니석 12.5%, 카올리나이트 17%, 스멕타이트 5.5%로 나타난다(Silverberg, 1972; Naidu et al., 1982; Naidu and Mowatt, 1983; Wahsner et al., 1999; Darby et al., 2011). 맥肯지 강 퇴적물은 매우 높은 석영/장석 비와 높은 카올리나이트/녹니석 비를 가진다.

동시베리아해로 유입되는 인디기르카 강의 벌크 광물 조성은 석영 28% 장석 21.7%, 백운석 0.2%이며, 점토광물조성은 일라이트는 71%, 녹니석 21%, 카올리나이트 5%, 스멕타이트 3%이다. 콜리마 강의 점토광물 함량은 일라이트가 59%. 녹니석 27%, 카올리나이트 9%, 스멕타이트 5%이다(Silverberg, 1972; Naidu et al., 1982; Naidu and Mowatt, 1983; Wahsner et al., 1999; Darby et al., 2011). 동시베리아해로 유입되는 강 퇴적물은 높은 석영/장석 비와 낮은 카올리나이트/녹니석 비를 가지는 것이 특징이다.

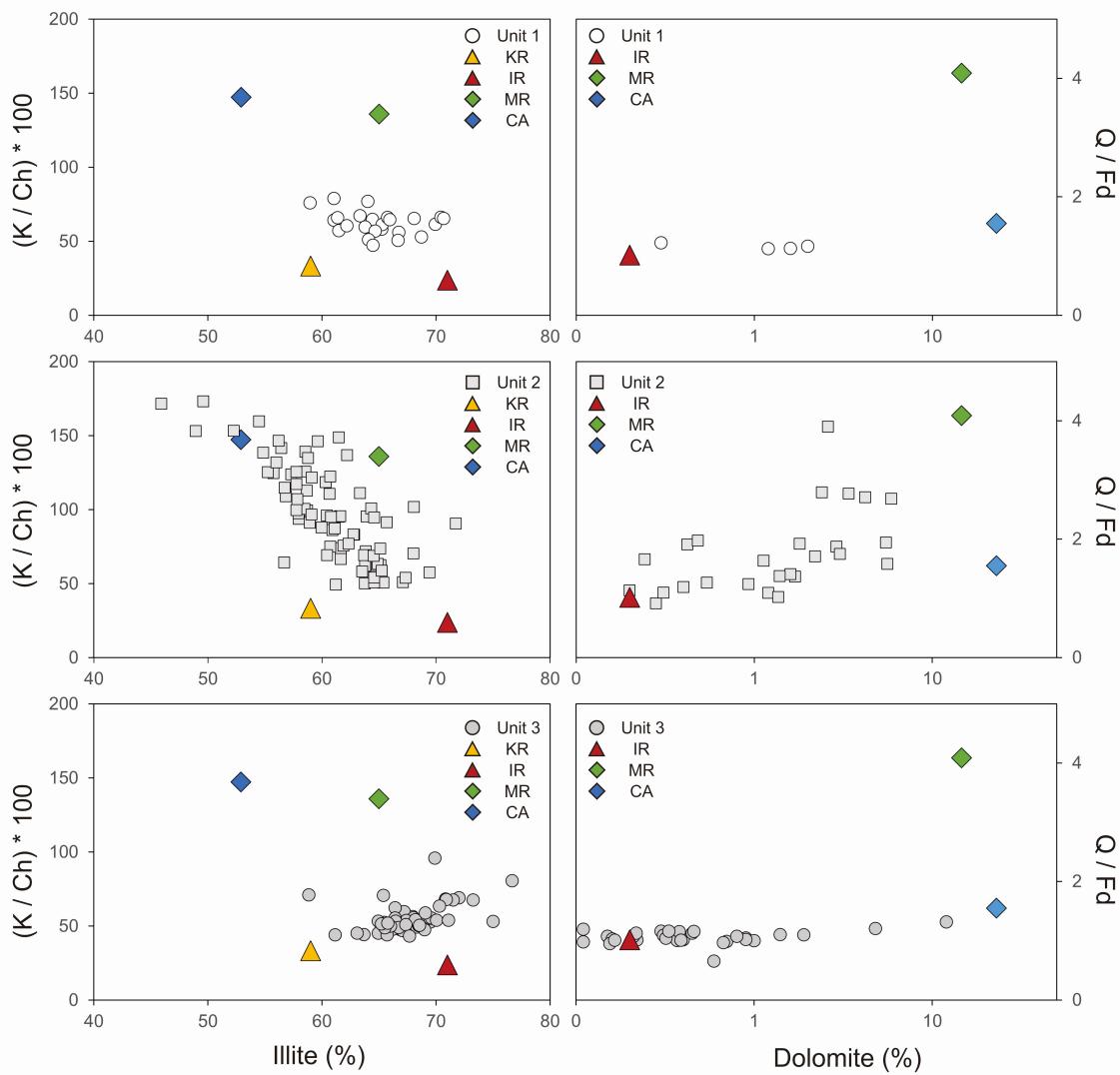


Fig. 45. Binary plot of $(K / Ch) * 100$ and Illite (%), and Q / Fd ratio and Dolomite (%) by unit.: Values of potential provenance sediments comprising the bulk minerals and clay minerals are plotted for comparison(Silverberg et al., 1972; Naidu et al., 1982; Naidu and Mowatt, 1983; Wahsner, 1999; Darby et al., 2011). (K; Kaolinite, Ch; Chlorite, Q; Quartz, Fd; Feldspar, KR; Kolyma River, IR; Indigirka River, MR; Mackenzie River, CA; Canad Archipelago)

앞에서도 살펴본 바와 같이 척치해저고원에 위치한 아라온 마운드와 사면 코어 퇴적물은 벌크광물조성과 점토광물조성이 유닛 별로 상이함을 알 수 있는데, 아라온 마운드 퇴적물의 기원지를 알아보기 위하여 유닛 별 광물 함량과 주요 기원지들의 광물 함량을 같은 도표에 도시하여 비교해 보았다(Fig. 45).

일반적으로 북극해의 제4기 해양 퇴적물은 빙기, 퇴빙기, 간빙기의 3가지 유형으로 구분할 수 있다. 해수면이 낮고 얕은 대륙붕들이 노출된 빙기의 퇴적물은 녹회색 내지 황색을 띠는 세립질 퇴적물이고, 퇴빙기의 퇴적물은 조립질의 빙운쇄설물 입자가 다량으로 포함되어 있으며, 간빙기의 퇴적물은 빙운쇄설물이 조금 포함되어 있는 갈색 퇴적물이 주를 이룬다(Darby et al., 1997; 2006; Polyak et al., 2004; 2009; Mckay et al., 2008; Adler et al., 2009; Stein et al., 2010; Polyak and Jakobsson, 2011; Park et al., 2017). 이러한 연구 결과를 아라온 마운드와 사면 코어 본퇴적물의 특징과 비교하면 유닛 1, 2, 3은 각각 간빙기, 퇴빙기, 빙기에 상응하는 것을 확인할 수 있으며, 척치해저고원 주변의 코어 퇴적물 연구 결과와 결부시켜 해석하면, 유닛 1, 2, 3은 각각 홀로세, 최후빙기극대기(LGM, Last Glacial Maximum)의 퇴빙기, 최후빙기극대기에 해당한다는 것을 확인할 수 있다.

(1) 최후빙기극대기

극지연구소

해수면이 낮고 얕은 대륙붕들이 노출된 빙기의 퇴적물은 녹회색 내지 황색을 띠는 세립질 퇴적물이다(Darby et al., 1997; Polyak et al., 2004; Polyak et al., 2009; Stein et al., 2010). 유닛 3은 빙운쇄설물의 함량이 매우 낮은 세립질의 녹회색, 회색 퇴적물이며, 이는 빙기 퇴적물의 특징과 일치한다(Darby et al., 1997; Phillips and Grantz, 2001; Polyak et al., 2004; Polyak et al., 2009; Stein et al., 2010; Park et al., 2017). 유닛 3은 일라이트와 장석의 함량이 높으며, 백운석과 석영의 함량이 낮게 나타난다. 높은 일라이트와 장석 함량은 시베리아 대륙붕의 특징이다 (Wahsner et al., 1999; Viscosi et al., 2003). 카올리나이트/녹니석-일라이트 도표를 볼 때 카올리나이트/녹니석 비가 평균 58.4(43.3-173.2), 일라이트가 평균 67.0(49.6-76.7)%로 쿨리마 강, 인디기르카 강과 가까이 도시된다(Fig. 4). 석영/장석 - 백운석 도표에서 석영/장석 비가 평균 1.1(0.7-1.3), 백운석이 평균 0.9(0-12.0)로 인디기르카 강과 가까이 도시된다(Fig. 45). 두 도표를 통해 유닛 3은 동시베리아의 인디기르카 강, 쿨리마강의 영향을 받은 것으로 보인다.

빙기에는 로렌타이드 빙상이 캐나다 북부 전체로 확대되었으며, 빙산과 해빙이 서북극해 전체에 분포했다(Andrews et al., 1995). 유닛 3의 퇴적물은 콜리마 강과 인디기르카 강의 영향을 받은 것으로 나타나지만 빙기에는 해수면이 낮아지고 강이 얼어 강 퇴적물의 공급이 중단되기 때문에 강으로부터 직접적인 유입은 불가능할 것이다(Darby et al., 1997; Polyak et al., 2004; Polyak et al., 2009; Stein et al., 2010). 동시베리아해 대륙붕은 주로 콜리마, 인디기르카 강의 영향을 받은 것으로 알려져 있다(Kalinenko, 2001; Wahsner et al., 1999). 동시베리아해 대륙붕의 세립질 입자가 연구지역으로 유입되기 위해서는 대륙붕의 세립질 입자가 재부유하거나 바람에 의해 유입되어 해빙이 형성될 때에 해빙에 부착되어 이동하거나, 재부유된 입자가 해류에 의해 이동하여 유입될 수 있다(Campbell and Collin, 1958; Reimnitz et al., 1992; Dethleff et al., 1993). 따라서 빙기에 동시베리아해 대륙붕에 퇴적된 세립질 퇴적물이 재동되어 해빙에 부착되거나 해류에 의해 이동하였으며, 연구지역에 퇴적된 것으로 판단된다(Fig. 46a).

(2) 퇴빙기

해수면이 상승하며 기후가 온난화하는 퇴빙기에는 빙하나 빙상이 후퇴하며 빙운 쇄설물의 퇴적이 많아진다(Phillips and Grantz, 2001; Stocker, 2014). 유닛 2는 빙운 쇄설물의 함량이 높은 조립질 진회색 퇴적물로 퇴빙기 퇴적물로 생각된다(Fig. 2, 3; Phillips and Grantz, 2001). 유닛 2의 퇴적물은 다른 유닛에 비하여 높은 카올리나이트, 백운석, 석영의 함량을 보인다. 카올리나이트/녹니석-일라이트 도표를 볼 때는 유닛 2의 퇴적물은 카올리나이트/녹니석 비가 평균 100.2 (49.4–364.1), 일라이트가 평균 61.3 (45.9–86.9)으로 콜리마 강, 인디기르카 강, 맥肯지강, 캐나다 군도 등 도시된 모든 기원지에 걸쳐 넓게 도시된다(Fig. 45). 석영/장석-백운석 도표에서 석영/장석 비가 평균 1.74 (0.9–3.9), 백운석이 평균 1.9 (0.1–5.9)로 점토광물 비 도표와 같이 모든 기원지에 걸쳐 넓게 도시되며 다양한 기원지들의 영향을 받은 것으로 보인다(Fig. 46).

서북극해에서 퇴적물 코어 내의 백운석은 캐나다 북부의 고생대 탄산염 지층으로부터 로렌타이드 빙상에 의해 주로 유입되었으며, 북아메리카 기원의 지시자로서 사용된다(Okutitch, 1991; Phillips and grantz, 2001; Stokes et al, 2005; Harrison et al., 2008; Polyak et al., 2009; Dong et al., 2017). 석영/장석 비율도 캐나다 북극에

석영이 풍부하며 장석의 함량이 매우 낮기 때문에 북아메리카 기원의 지시자로서 사용된다(Zou, 2016; Kobayasi et al., 2016). 석영/장석 비율은 일반적으로 백운석과 유사한 경향을 보인다(Bazheonva et al., 2017; Dong et al., 2017).

유닛 2는 석영/장석 비율이 다른 유닛에 비해 높게 나타나고 카올리나이트의 함량이 높게 나타나기 때문에 북아메리카 기원의 특성을 띤다(Fig. 4). 빙운쇄설물 함량의 패턴도 카올리나이트, 석영과 유사한 경향을 보이므로 카올리나이트, 석영 등의 광물은 빙운쇄설물로써 빙하에 의해 운반 되었을 것으로 보인다. 따라서, 유닛 2의 퇴적물은 북아메리카로부터 확장된 로렌타이드 빙상 기원의 빙산과 해빙들이 대량으로 녹으면서 맥肯지 강, 캐나다 군도의 퇴적물이 대거 포함된 빙운쇄설물이 유입되었으며, 일부 콜리마 강과 인디기르카 강 기원의 세립질 퇴적물이 함께 유입된 것으로 보인다(Fig. 46b).

(3) 간빙기

간빙기 퇴적물은 갈색층을 띠며 빙운쇄설물이 조금 포함되어 있다(Phillips and Grantz, 2001). 유닛 1은 갈색층과 함께 적은 양의 빙운쇄설물을 포함하고 있어 간빙기 퇴적물의 특징과 일치한다(Fig. 2; Phillips and Grantz, 2001). 유닛 1은 카올리나이트/녹니석-일라이트 도표에서 카올리나이트/녹니석 비가 평균 62.2 (47.4-79.0), 일라이트가 평균 64.8 (59.0-70.7)로 콜리마 강, 인디기르카 강, 맥Ken지 강과 가까이 도시된다(Fig. 45). 석영/장석-백운석 도표에서 석영/장석 비가 평균 1.2 (1.1-1.3), 백운석이 평균 1.0 (0-2.0)으로 인디기르카 강, 캐나다 군도와 가까이 도시된다(Fig. 45). 점토광물 도표에서는 콜리마 강, 인디기르카 강, 맥Ken지 강의 복합기원으로 나타나지만, 벌크광물 도표에서는 맥Ken지 강의 영향은 나타나지 않고 캐나다 군도의 영향이 있는 것으로 보인다(Fig. 45).

두 도표에서 기원지의 영향이 다르게 나타나는 것은 입자의 크기에 따라 점토광물이 많이 포함된 세립질 입자와 벌크광물이 많이 포함되는 조립질 입자의 기원이 다른 것으로 판단된다. 점토광물로 주로 구성되어 있는 세립질 입자는 동시베리아의 인디기르카 강, 콜리마강과 북미의 맥Ken지강으로부터 주로 공급된 것으로 보이며, 벌크광물로 주로 구성되어 있는 조립질 입자는 동시베리아의 인디기르카 강과 캐나다 북극 군도로부터 기원된 것으로 보인다(Fig. 46c).

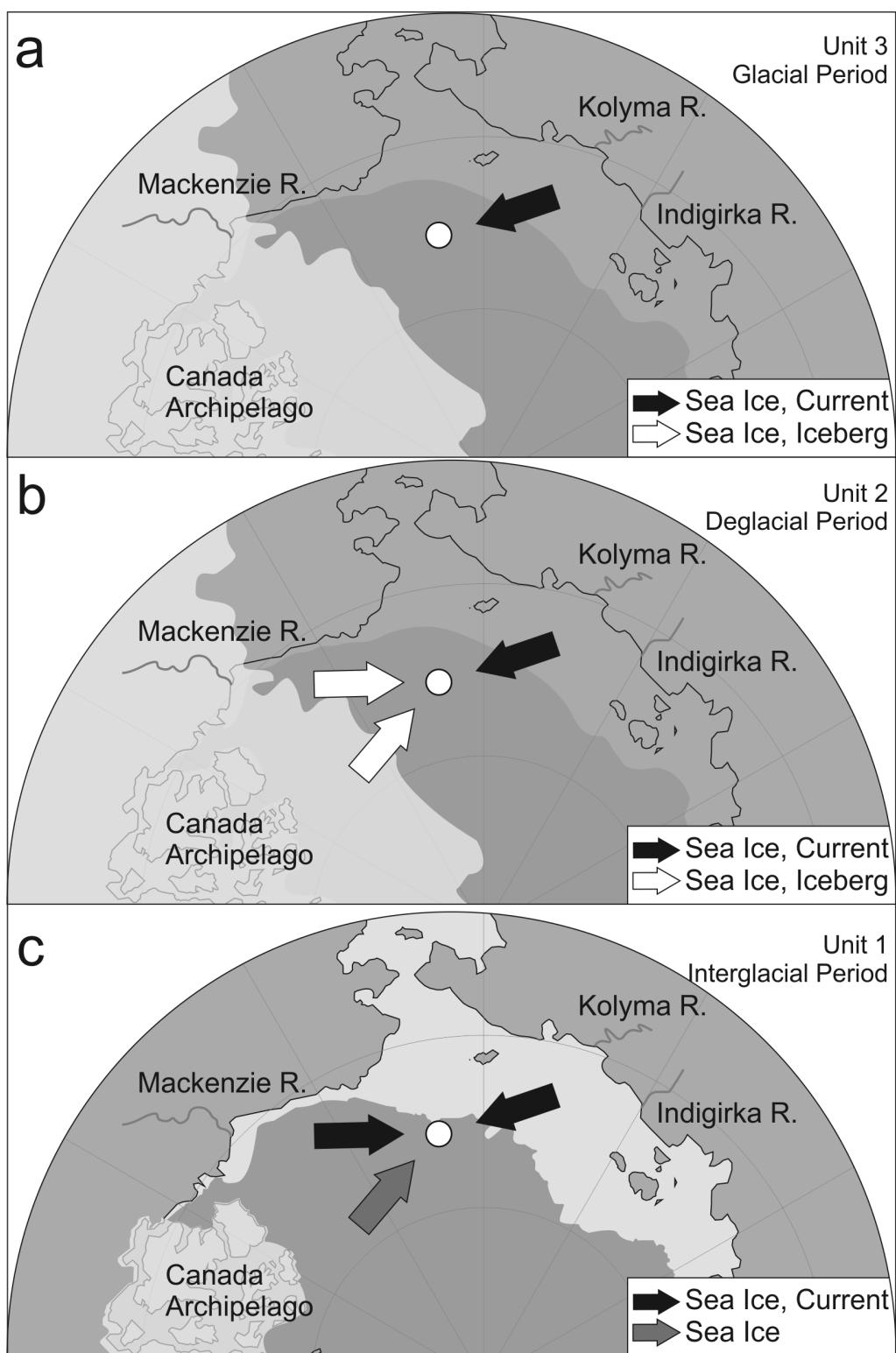


Fig. 46. Schematic reconstruction of environments in the Chukchi Sea and factors controlling sedimentation at the Araon mound (white circle). (a) glacial inputs; (b) deglacial inputs; (c) interglacial inputs. (Black arrow; sea ice and current input, White arrow; iceberg input, Gray arrow; sea ice input)

세립질 입자는 해빙과 해류에 의해 유입될 수 있지만 빙운체설물은 해류에 의해 먼 거리를 이동하기 힘들기 때문에 해빙이나 빙산과 같은 빙하에 의해서만 유입될 수 있다(Kuijpers et al., 2014). 하지만 캐나다 북극 군도의 로렌타이드 빙상은 약 7-8천년 전 없어졌기 때문에 간빙기로 보이는 유닛 1 시기에는 빙산에 의한 유입이 힘들 것으로 보인다(Andrews et al., 1995). 따라서, 유닛 1의 퇴적물에서 나타나는 적은 양의 빙운체설물은 로렌타이드 빙상 기원의 빙산이 아닌 해빙에 의해 운반되었을 것으로 보인다(Fig. 46c; Andrews et al., 1995; Tantillo et al., 2012; Kuijpers et al., 2014; Park et al., 2017).



4. 보퍼트해(Beaufort Sea) 해양 퇴적물

가. 코어 퇴적물

2013년 수행된 ARA04B 탐사 동안 보퍼트해의 다중빔 심층 탐사를 통해 수심 740m에서 3개, 282m와 420m에서 1개씩의 진흙화산(Mud Volcano, MV)이 발견되었으며, 각 진흙화산들은 수심에 따라 MV의 이름이 부여되었다. 420 MV에서는 ROV (remoted operated vehicle) 탐사를 통해 해저로부터의 메탄 방출을 실제로 확인하였다(Paull et al., 2015). 또한, 2017년 수행된 ARA08C 탐사에서 420 MV에 대한 재탐사를 실시하였으며, MV의 지속적인 메탄 방출과 규모의 확대를 확인하였다 (Jin et al., 2018).

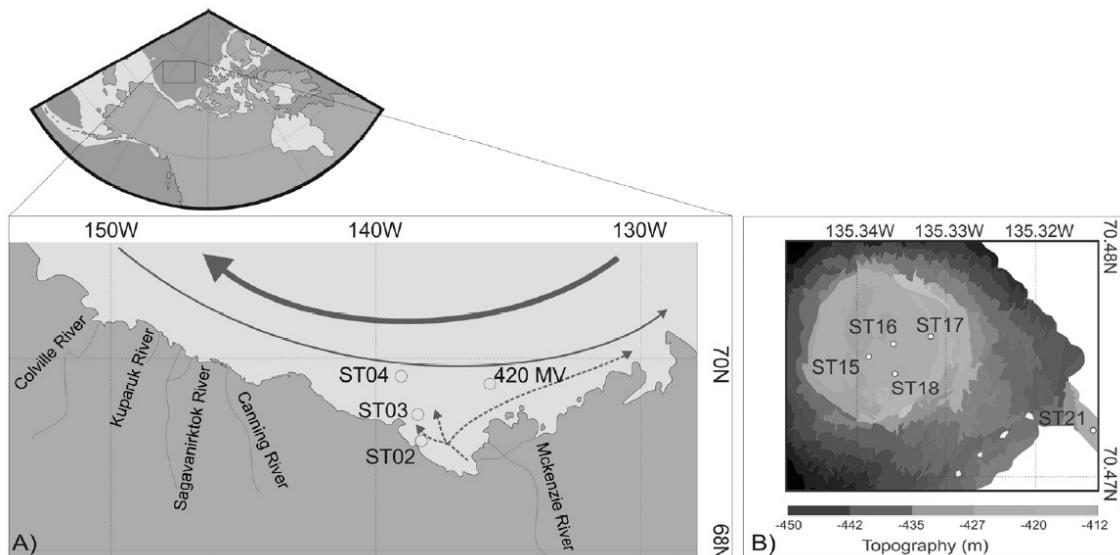


Fig. 47. A) Map showing the locations of sediment core and rivers. Modified from Stabeno et al. (1995). B) 420 mud volcano in Beaufort Sea. The thick arrow represents Beaufort Gyre, the narrow arrow represents Alaska coastal current, and the dashed arrows represent Mackenzie River plume.

본 연구에 사용한 시료는 2017년 8월 26일부터 9월 16일까지 극지연구소 쇄빙선 아라온호를 이용해 Arctic Expedition ARA08C 탐사에서 채취된 것으로 총 8개의 박스코어(Box Core; BC)로부터 187개의 부시료를 채취하였다. 코어 퇴적물은 보퍼트해 맥肯지 대륙붕 내의 맥肯지곡에 속하는 3개 코어(ST02, ST03, ST04), 420 MV 내의 4개 코어(ST15, ST16, ST17, ST18) 그리고 420 MV 근처의 비교 코어

(ST21)로 구분된다. 맥켄지곡 코어들은 ST02, ST03, ST04순으로 맥켄지강으로부터 멀어진다(Fig. 47). 420 MV의 코어들은 ST15가 420 MV의 중심에 가깝고 ST18이 420 MV의 중심에서 가장 멀다. 비교 코어 ST21은 420 MV와의 비교를 위해 인근의 동일한 수심에서 채취되었다(Fig. 47). 점토광물분석은 박스코어를 1 cm 간격으로 채취한 187개 부시료 중 97개의 부시료를 이용하였다.

나. 점토광물 조성

맥켄지곡의 3개 코어(ST02, ST03, ST04)의 4가지 중요한 점토광물 함량은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 감소한다. 점토광물 중 일라이트는 57.5 %에서 66.0 %까지 포함되어 있으며 평균 61.5 %이다. 녹니석은 14.3 %에서 21.7 %로 평균 18.2 %이며, 카올리나이트는 13.8 %에서 18.7 %까지 포함되어 있으며, 평균 16.8 %이다. 스멕타이트는 1.5 %에서 6.5 %까지 포함되며 평균 3.6 %이다 (Table 16).

420 MV의 4개 코어(ST15, ST16, ST17, ST18)의 점토광물 함량은 일라이트가 가장 많으며 그 다음으로 카올리나이트와 녹니석이 많고 스멕타이트는 가장 적다. 일라이트는 평균 54.0 %(49.3-57.7 %), 카올리나이트는 평균 19.9 %(17.7-22.1 %), 녹니석은 평균 19.1 %(16.7-22.0 %)이다. 스멕타이트는 3.4 %에서 9.2 %의 범위를 가지며 평균 7.1 %이다(Table 16).

비교 코어 퇴적물의 점토광물함량은 맥켄지곡과 같이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트의 순서로 감소한다. 일라이트는 53.0 %에서 62.3 %로 평균 56.7 %, 녹니석은 16.8 %에서 24.0 %로 평균 20.8 %, 카올리나이트는 18.0 %에서 20.7 %로 평균 18.9 %이며 스멕타이트는 2.2 %에서 5.4 %로 평균 3.6 %이다(Table 16).

420 MV와 비교 코어의 일라이트, 녹니석, 카올리나이트의 함량은 거의 비슷하지만, 스멕타이트의 함량은 420 MV가 비교 코어와 비교하여 약 2배 높다. 또한, 420 MV의 점토광물함량을 맥켄지곡과 비교해보면 녹니석은 비슷하며 카올리나이트는 3.1 %, 스멕타이트는 3.5 % 높으며, 일라이트는 7.5 % 낮다(Table 16).

Table 16. Average clay mineral compositions (%) of study area

	Station	n	Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite
Mackenzie trough	St02	11	62.0	18.9	16.4	2.7
	St03	13	61.9	17.4	16.6	4.1
	St04	11	60.5	18.3	17.2	4.0
420 mud volcano	St15	12	54.9	19.3	20.0	5.8
	St16	12	54.8	18.4	19.4	7.4
	St17	13	54.0	19.1	19.8	7.1
	St18	13	52.2	19.4	20.4	8.1
Reference core	St21	12	56.7	20.8	20.8	3.6

다. 입도 분석

퇴적물 코어의 입도 분석 결과, 맥肯지곡 퇴적물의 조립질 퇴적물은 0.0 %에서 6.0 %로 평균 1.1 %, 실트는 12.0 %에서 30.4 %로 평균 20.2 %, 점토는 67.9 %에서 87.6 %로 평균 78.7 %이다. 맥肯지강과 가장 가까운 ST02의 조립질 퇴적물은 평균 1.1 %, 실트는 24.0 %, 점토는 74.9 %이다. ST03은 조립질 퇴적물 1.2 %, 실트 22.4 %, 점토 76.4 %이며, 맥肯지강에서 가장 멀리 위치한 ST04는 조립질 퇴적물 1.0 %, 실트 14.5 %, 점토 84.5 %이다. 맥肯지강으로부터 멀어질수록 실트의 양은 감소하고 점토의 양은 증가한다. 조립질 퇴적물은 1 %내외로 육지와 거리에 따른 함량 변화는 없다(Table 17, Fig. 48a).

420 MV의 조립질 퇴적물은 2.8 %에서 9.0 %로 평균 4.5 %, 실트는 26.2 %에서 31.8 %로 평균 29.6 %, 점토는 61.3 %에서 70.9 %로 평균 65.8 %이며, 중심과 주변부의 입도 차이는 거의 없다(Table 17, Fig. 3a). 비교 코어는 조립질 퇴적물을 0.1 %에서 0.6 %로 평균 0.3 %, 실트는 16.9 %에서 20.6 %로 평균 18.7 %, 점토는 79.2 %에서 83.0 %로 평균 81.0 %이다(Table 17).

모든 코어퇴적물은 대부분 점토로 구성되어 있으며, 일부 코어들은 소량의 조립질 퇴적물 입자를 포함한다. 맥Kenzie곡과 비교 코어의 조립질 퇴적물은 평균 0.9 %이지만, 420 MV는 평균 4.5 %로 약 3.6 % 높다. 맥Kenzie곡 퇴적물은 맥Kenzie강에서 멀어질수록 실트의 함량이 감소하며 점토는 증가한다. 420 MV는 실트와 점토의 평균 함량이 420 MV 중심부와 거리에 상관없이 일정하며 맥Kenzie곡의 퇴적물보다 420 MV의 퇴적물이 조립질 퇴적물과 실트의 함량이 높고 점토의 함량은 작다(Fig.

48a). 비교 코어는 조립질 퇴적물이 소량 존재하고 실트의 함량 또한 낮아, 420 MV 와 차이가 있다(Table 17).

Table 17. Average grain size contents (%) of study area

	Station	n	Sand	Silt	Clay
Mackenzie trough	St02	10	1.1	24.0	74.9
	St03	13	1.2	22.4	76.4
	St04	11	1.0	14.5	84.5
420 mud volcano	St15	12	4.5	30.0	65.5
	St16	12	5.2	30.5	64.2
	St17	11	4.3	30.1	65.6
	St18	12	4.1	28.0	67.9
Reference core	St21	12	0.3	18.7	81.0

라. 맥켄지곡

맥켄지곡 코어 퇴적물의 4가지 주요 점토광물의 상대적인 함량비는 맥켄지강과의 거리에 상관없이 거의 일정하지만 입도는 맥켄지강으로부터 멀어질수록 점점 세립화하는 경향을 나타낸다. 즉, 맥켄지강에 제일 가까운 ST02부터 ST03, ST04 순으로 멀어질수록 실트의 함량은 감소하는 반면, 점토의 함량은 증가한다(Table 16).

맥켄지곡은 맥켄지강 유역의 서쪽에 위치하여, 보퍼트해에서는 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류가 흐르면서 알래스카 강의 퇴적물이 맥켄지곡으로 유입될 수도 있다(Stabeno et al., 1995). 맥켄지곡 퇴적물의 기원지를 알아보기 위하여 보퍼트해로 유입되는 강 퇴적물들의 점토광물 특성을 비교해보았다. 일라이트는 캐나다의 맥켄지강에서 64 %에서 66 %의 함량을 가진다. 알래스카의 캐닝강에서 82 %로 가장 높은 값을 가지며 알래스카의 나머지 강들은 46 %에서 58 %로 맥켄지강보다 낮은 값을 가진다(Table 18, Naidu and Mowatt, 1983). 보퍼트해 내에서 스멕타이트는 상당한 지역적 차이를 가진다. 콜빌 강은 약 30 %로 가장 높은 함량을 가진다. 쿠파룩, 사가바너크룩, 맥켄지강 등의 부근에서는 함량이 10 %이하로 소량 존재한다(Table 18, Naidu and Mowatt, 1983).

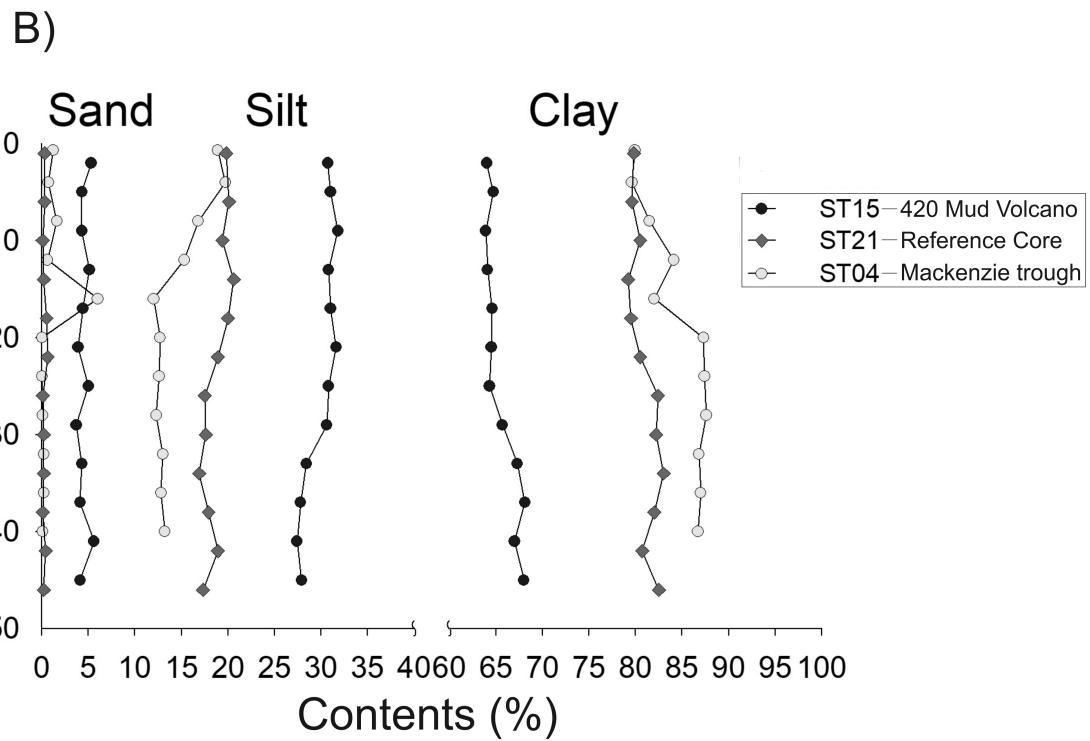
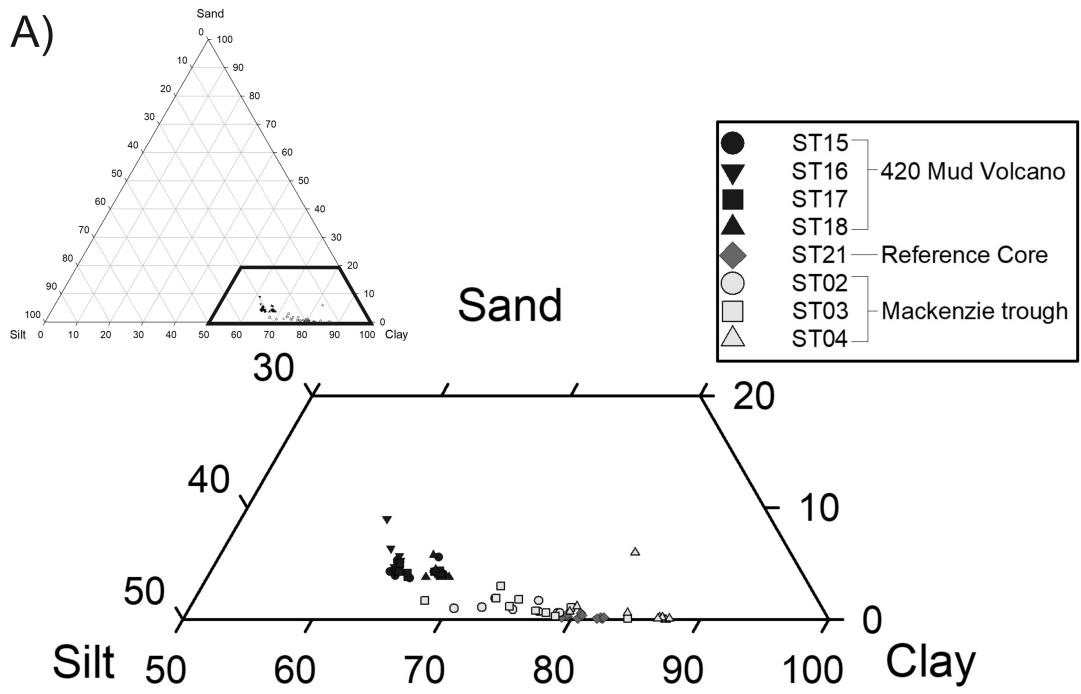


Fig. 48. (A) Ternary diagram of sand, silt, clay. (B) Vertical variations of grain size contents of core ST04, ST18, ST21.

보퍼트해로 유입되는 강(콜빌강, 쿠파룩강, 사가바너크툭강, 캐닝강, 맥켄지강)과 맥켄지곡의 일라이트, 카올리나이트, 스멕타이트 함량을 비교하기 위해 삼각도표에 도시하였다(Fig. 49). 맥켄지곡의 평균 일라이트 함량은 61 %, 스멕타이트 함량은 평균 4 %로 사가바너크툭강과 맥켄지강의 점토광물 함량에 가깝게 도시된다(Fig. 49).

맥켄지강과 사가바너크툭강은 일라이트와 녹니석, 스멕타이트의 함량에서 차이를 보이기 때문에, 두 강의 함량 차이는 (카올리나이트/녹니석) 비와 (스멕타이트/일라이트) 비를 이용한 그래프를 통해 구분할 수 있다(Fig. 50). 맥켄지곡 퇴적물은 (스멕타이트/일라이트) 비가 평균 6 (2-10)이고, (카올리나이트/녹니석) 비는 평균 93 (81-105)이다. 맥켄지강은 (스멕타이트/일라이트), (카올리나이트/녹니석)의 비가 각 9, 87의 값을 가지며, 맥켄지곡의 범위 안에 도시된다(Fig. 50). 그러나, 사가바너크툭강은 (스멕타이트/일라이트) 비가 17로 맥켄지곡의 2-10의 범위보다 높고, (카올리나이트/녹니석) 비는 60으로 맥켄지곡의 81-105의 범위보다 낮은 값을 가지기 때문에 맥켄지곡의 퇴적물과는 차이를 보인다(Fig. 50). 따라서, 맥켄지곡의 퇴적물들은 주로 (스멕타이트/일라이트)의 비가 낮고, (카올리나이트/녹니석)의 비가 높은 맥켄지강의 영향을 받은 것으로 판단된다.

맥켄지곡 퇴적물은 보퍼트해의 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류 때문에 보퍼트해 서쪽 강들의 영향을 받을 수 있다(Stabeno et al., 1995). 그러나, 점토광물 특성을 보았을 때 보퍼트해 서쪽의 강들과는 다르며, 맥켄지강에 가장 비슷하다. 더욱이 맥켄지강은 보퍼트해로 유입되는 강들 중 퇴적물 운반량과 담수 배출량이 가장 크다(Gordeev et al., 1996; Holmes et al., 2002; Rachold et al., 2004). 그러므로 맥켄지곡은 알래스카 연안류에 의한 영향보다는 맥켄지강의 직접적인 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 맥켄지곡의 퇴적물은 맥켄지강으로부터 멀어질수록 세립화된다(Table. 17, Fig. 48a). 이는 강 하구로부터 멀어지면서 조립질 퇴적물이 감소하고, 세립질 퇴적물은 많아지는 연안 퇴적물의 특징과 일치한다(Olariu and Bhattacharya, 2006).

Table 18. Average clay mineral compositions (%) of major river supplying clays to the Beaufort Sea

	River	n	Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite	Reference
West of Alaska	Kobuk	2	66	27	3	4	Naidu and Mowatt (1983)
	Noatak	2	66	34	0	0	
	Yukon	6	41	26	12	21	
	Kouskokwim	12	60	35	5	0	
North of Alaska	Colville	20	46	19	9	26	Mowatt
	Kuparuk	10	47	22	15	16	(1983)
	Sagavanirktok	10	58	20	12	10	
Canning	6	82	15	3	0		
Canada	Mackenzie	7	66	15	13	6	

마. 420 MV

420 MV의 코어는 점토광물의 함량이 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트 순으로 감소한다. 비교 코어는 점토광물 함량이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트 스멕타이트 순으로 차이가 있다(Table 16). 또한, 420 MV는 스멕타이트 함량이 5 %에서 10 %로 비교 코어의 2 %에서 5 %와 대조적으로 높으며, 조립질 퇴적물이 3 %로 비교 코어보다 높다(Table 16). 조립질 퇴적물, 실트, 점토의 함량은 표층부터 50cm까지 거의 일정한 경향을 보이지만, 맥肯지곡의 퇴적물은 깊이에 따라 입도가 변한다(Fig. 48b).

420 MV에서 S/I*100의 비는 평균 13(6–16), (카올리나이트/녹니석)의 비는 평균 105(89–113)의 값을 가져, 보퍼트해로 유입되는 강들 중, 맥Kenzie강(스멕타이트/일라이트 : 9, 카올리나이트/녹니석 : 87)에 가장 가깝다. 반면, 비교 코어는 420 MV의 스멕타이트/일라이트와 카올리나이트/녹니석 비의 분포가 구분된다(Fig. 50). 420 MV는 점토광물 중, 일라이트 다음으로 카올리나이트를 많이 함유하고 있으며, 스멕타이트는 비교 코어보다 약 2배 많이 함유한다. 현재까지 보고된 결과에 의하면, 보퍼트해로 유입되는 강 중 카올리나이트가 녹니석보다 많은 함량을 보이는 강이 없다(Table 17, Naidu and Mowatt, 1983).

비교 코어는 420 MV 부근에 위치하지만, Fig. 50에서 점토광물 함량이 맥Kenzie곡의 결과와 유사하다. 이는 맥Kenzie 강으로부터 유출된 퇴적물들이 비교 코어가 위치한 맥Kenzie 대류봉 지역까지 영향을 미치고 있음을 의미한다. 최근 수행된 맥Kenzie

대륙붕 퇴적물에 대한 지화학, 광물학적 연구 또한 맥肯지 대륙붕을 맥肯지 강의 영향을 받는 하나의 그룹으로 구분하였으며, 서에서 동으로 흐르는 알래스카 연안류에 의하여 공급된 것으로 판단하였다(Gamboa et al., 2017). 따라서, 비교 코어는 맥肯지강의 영향을 받았으며, 420 MV 주변 지역까지 맥肯지강의 영향을 받는 것으로 판단된다.

420 MV에서는 조립질 퇴적물 함량이 평균 5 %로 비교적 높다. 조립질 퇴적물을 공급할 수 있는 공급원은 해류, 빙하운반퇴적물(Ice Rafted Debris), MV에 의한 분출 등이 있다(Clark and Hanson, 1983; Yassir, 1989; Baumann et al., 1995; Hebbeln et al., 1998; Spilhagen et al., 2004). 일반적으로 빙하운반퇴적물은 호수나 해양에서 빙하에 의해 운반되고, 빙하가 녹을 때 퇴적되는 육성퇴적물로(Kuijipers et al., 2014), 조립질 퇴적물의 함량이 높은 특징을 가진다. 420 MV의 조립질 퇴적물 함량은 비교적 높지만, 동일한 퇴적 작용을 받았을 거라 생각되는 비교 코어의 조립질 퇴적물 함량은 1 % 이하로 낮기 때문에 빙하운반퇴적물의 영향은 제외될 수 있다. 강 퇴적물에 의해 공급되었다면, 거리에 따라 퇴적물이 세립화되며 맥肯지곡 퇴적물과 같이 조립질 퇴적물의 함량이 낮아야 한다. 하지만, 420 MV의 조립질 퇴적물의 함량이 맥肯지곡의 코어 퇴적물 중 육지에 가장 가까운 ST02보다도 높으므로 강 퇴적물의 공급도 제외될 수 있다. 깊이에 따라 일정한 입도와 보퍼트해로 유입되는 강들과의 점토광물 함량 차이를 통해 조립질 퇴적물이 공급될 수 있는 공급원은 MV의 분출하는 유체에 의한 퇴적물로 유추된다.

420 MV가 있는 지역에서 수행된 탄성파를 이용한 층서 연구와 해저 MV 분포 연구에 의하면, 보퍼트해 MV는 홍적세 세립질 빙퇴토(glacial till)가 분출하여 재동된 퇴적체이다(Hill et al., 1991; Paull et al., 2007; Batchelor et al., 2013; Blasco et al., 2013; Paull et al., 2015; Gamboa et al., 2017).

ARA08C의 ROV 탐사를 통해 420 MV는 현재도 계속 분출하고 있는 것을 확인하였다(Jin et al., 2018). 기존 연구 결과와 ARA08C 탐사로 보아 420 MV의 깊이에 따라 입도가 변화가 없는 이유는 분출하는 유체에 의해 MV 내에서 위아래의 혼합작용 때문인 것으로 유추된다. 북극의 MV 중, 바렌츠해의 하콘 모스비 MV의 입도 분석 결과에서도 깊이에 따라 조립질 퇴적물, 실트, 점토의 함량이 거의 일정한 경향을 보인다(Ginsburg et al., 1999).

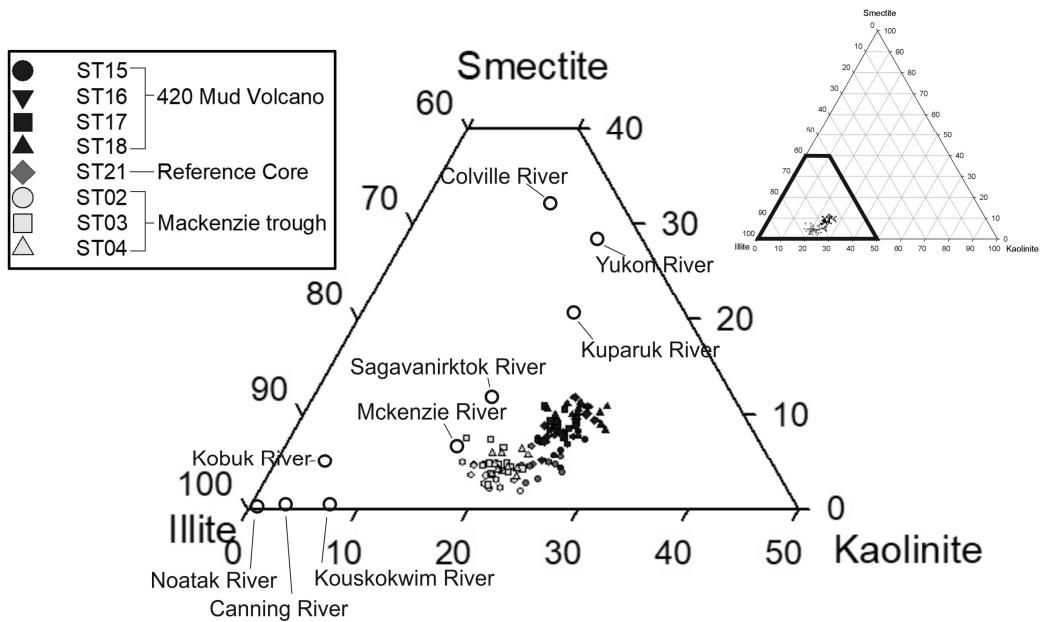


Fig. 49. Ternary diagram of major clay mineral groups, illite, kaolinite, smectite. Data regarding the potential source sediments comprising the major river supplying clays to the Beaufort Sea. (Naidu and mowatt, 1983) are plotted for comparison.

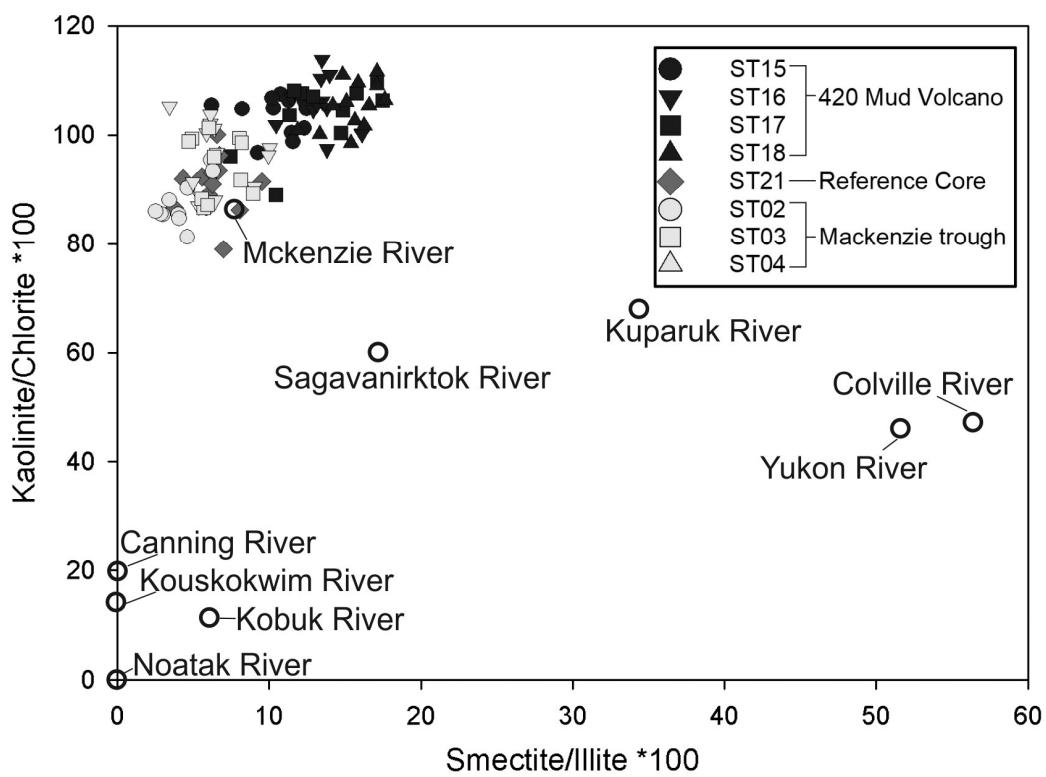


Fig. 50. Discrimination plot between smectite/illite ratio and kaolinite/chlorite ratio.

5. 메탄 하이드레이트와 자생 석고의 연관성

가. XRD 분석

아라온 마운드와 420 MV는 메탄 하이드레이트의 해리와 연관성을 가질 것으로 유추되어 왔다. 광물 분석 결과, 메탄 방출과 연관된 이들 지역에서는 다른 해양 퇴적물에서는 발견되지 않은 석고가 다량 포함되어 있다. 기존 북극 퇴적물 내에서 석고가 발견된 사례는 보고된 바 없다. 석고는 가장 흔한 황산염 광물 중 하나로, 퇴적암의 일반적인 구성 성분이며 주로 증발에 의해 형성되어, 석회석, 세일 등의 퇴적상(sedimentary deposit)과 증발광상에서 산출된다(Anthony and John W. et al., 2003).

최근 석고는 메탄 하이드레이트 함유 지역에서 샘플링된 혐기성 환경의 퇴적물에서 발견되었으며, 많은 연구자들의 관심을 받고 있다(Sassen et al., 2004; Wang et al., 2004; Chen et al., 2007; Larrasoana et al., 2007; Pierre et al., 2012; Kocherla, 2013; Pierre et al., 2014; Novikova et al., 2015; Lin et al., 2016a; Lin et al., 2016b; Pierre, 2017; Liu et al., 2019). Hydrate ridge와 남중국해 등에서 메탄 하이드레이트와 함께 석고가 발견되며 메탄과 석고의 생성 메커니즘이 연구되어왔다. 석고의 기원은 이러한 연구에서 관심이 집중되며, 현재의 의견은 석고 과포화 현상이 초기 속성 작용에서 황화물의 산화를 통해 발생할 가능성이 높다고 보고하였다(Larrasoana et al., 2007; Pierre et al., 2012; Kocherla, 2013; Pierre et al., 2014; Lin et al., 2016a; Lin et al., 2016b; Pierre, 2017).

북극은 메탄 하이드레이트가 지속적으로 발견되었으며, 자원과 메탄 방출 현상과 관련하여 많은 관심을 받고 있다(Paull et al., 2015; Hong et al., 2017; Kim et al., 2020). 퇴적물 내의 메탄 하이드레이트 해리에 의해 발생하는 메탄은 대기로 방출되며 지구 온난화에 나쁜 영향을 끼친다. 메탄 하이드레이트의 존재를 지시하는 광물학적 프록시는 황철석, 탄산염 광물, 석고 등이 사용될 수 있다(Wang et al., 2004; Pierre and Bayon 2014; Lin et al., 2016). 하지만 메탄 하이드레이트가 지속적으로 발견되는 북극해에서 메탄 하이드레이트와 관련된 광물학적 연구는 보고되지 않았다.

석고는 마운드 코어의 Unit 1부터 Unit 2에서 높게 나타나고 Unit 3에서 감소한다. 하지만 사면코어에서는 나타나지 않는다. 또한 420 MV 코어에서도 발견되지만 보퍼트 대륙붕 코어에서는 발견되지 않는다. XRD 분석 그래프에서 메탄 방출 지역

과 비배출 지역 간의 차이로 $11.65^{\circ}2\theta$ 에서 샤프한 석고 피크를 관찰할 수 있다(Fig. 58).

TOPAS를 이용한 정량 분석 결과, ARA 마운드에서는 석고의 함량이 약 1 %에서 9 %로 측정되었다. 420 MV에서는 약 1 %내외로 매우 낮은 함량이지만, XRD 회절선에서 석고의 피크가 분명하게 나타된다(Fig. 58). 그러므로 ARA 마운드와 420MV의 퇴적물에서는 기준 코어들과는 다르게 석고가 존재한다는 것을 알 수 있다.

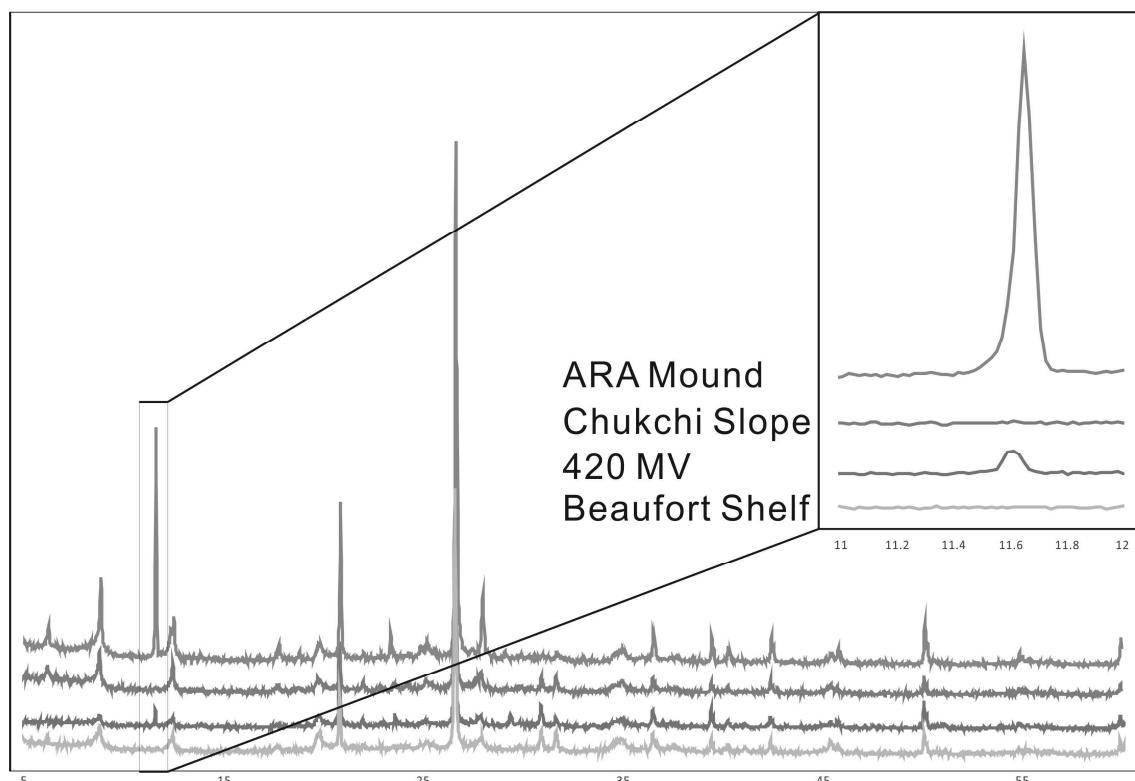


Fig. 51. Typical XRD patterns of ARA07C-St13 (ARA Mound), ARA09C-St13 (Chukchi Slope), ARA08C-St15 (420 MV), ARA08C-St21 (Beaufort Shelf), showing major bulk mineral species. Gypsum peak of $11.65^{\circ}2\theta$ degree exists in the XRD analysis results of ARA mound and 420 MV.

나. SEM-EDS 분석

SEM 이미지 관찰 결과, 마름모꼴과 침상의 석고 결정이 가장 일반적인 형태로 나타난다. 침상 석고는 얇고 긴 모양의 석고가 비교적 큰 탁상형 석고를 중심으로 방사상으로 자라났다. 두 가지 형태 모두 표면이 깨끗하고 쪼개짐이 010 면으로 완전하게 나타난다. Rhombic 형태는 SO_3/CaO 비가 평균 1.6이며, Clusters of bladed 형태는 SO_3/CaO 비가 평균 1.6으로 유사하다(Table 19).

Table 19. Contents of SO_3 , CaO and SO_3/CaO ratio

Shape	SO_3	CaO	SO_3/CaO
Bladed	2.1	1.6	1.3
	4.5	2.5	1.8
	3.7	2.4	1.6
	5.3	3.1	1.7
Bladed-Average	3.9	2.4	1.6
Rhombic	3.0	1.9	1.5
	3.6	2.2	1.7
	3.6	2.3	1.6
	4.0	2.4	1.7
	3.9	2.3	1.7
	2.8	1.9	1.5
	3.3	1.9	1.7
	4.9	2.8	1.8
	5.2	2.9	1.8
	0.9	0.8	1.2
	4.6	2.6	1.7
	4.0	2.5	1.6
	3.6	2.2	1.6
Rhombic-Average			

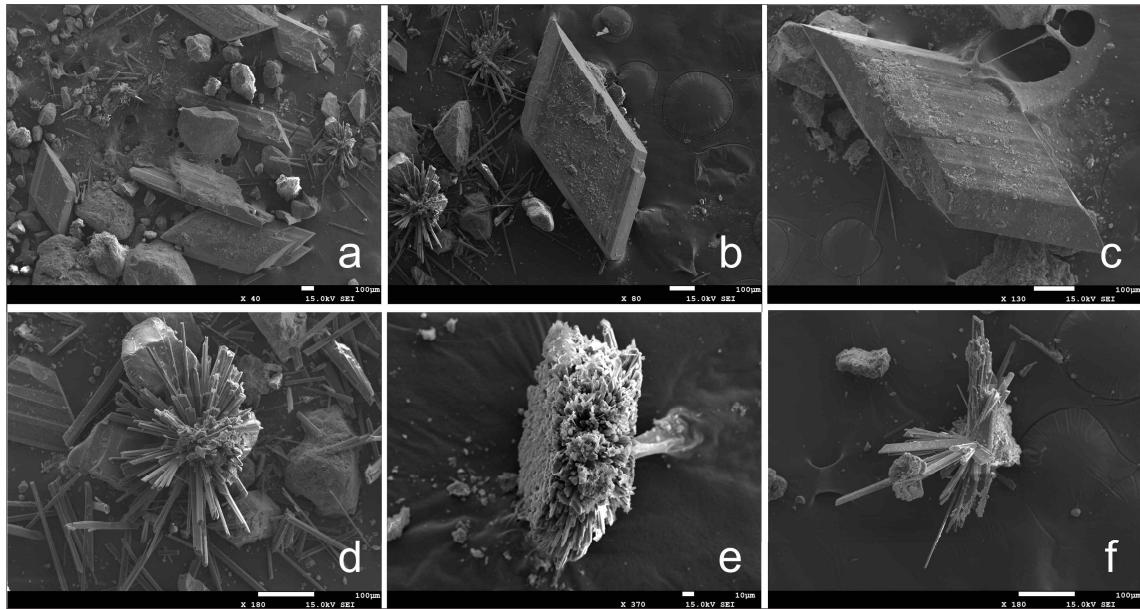


Fig. 52. SEM photographs of ARA07C St13 sediments. (a) gypsum and clastic minerals (b), © rhombic gypsum (d), (e), (f) cluster of bladed gypsum.

다. 자생 석고의 기원

일반적으로 쇄설성 석고는 외형적 특징에 의해 자생석고와 구별되며, 메탄 하이드레이트와 함께 발견되는 석고 입자의 성장을 황 동위원소 분석을 통해 자생석고를 판단 할 수 있다(Lin et al., 2016, Liu et al., 2019). 본 연구에서는 황 동위원소 분석은 수행하지 않았지만, 기준 코어들과 비교를 통해 석고의 기원을 알아보고자 한다.

퇴적물에서 발견된 석고 입자들은 쇄설성으로 유입되었는지, 자생으로 형성되었는지 구분이 필요하다. 캐나다 북극 군도에 위치하는 액슬하이버그 섬(Axel Heiberg Island)의 집섬 힐(Gypsum Hill)은 증발성 다이어피르(evaporitic diapir)이며, 주로 석고로 구성되어 있다(Pollard et al., 2009). 아라온 마운드와 420 MV의 석고도 백운석과 카올리나이트 등의 캐나다 북극 기원의 광물들과 함께 유입될 수 있을 것으로 생각할 수 있다. 다른 기원으로는 북극의 해빙이 성장하면서 석고가 침전되어 형성된다는 연구도 보고되었다(Geulfus et al., 2013). 하지만, 이 경우 석고는 아라온 마운드와 420 MV뿐만 아니라 기준 코어에서도 석고의 함량이 측정되어야 한다. 기준 코어들과 비교해보면 백운석, 석영, 카올리나이트 등의 트랜드가 유사하고 기원이 같게 해석되는 반면 석고는 기준 코어들에서는 나타나지 않는다. 또한 주사전자

현미경 관찰 결과, 표면이 깨끗하고 자형 마름모꼴 석고 입자로 나타난다(Fig. 52). 이는 자생광물의 특징이며 쇄설성 광물의 특징인 마모 등의 흔적은 보이지 않는다. 이러한 자생광물의 특징은 퇴적물 보관 중 견조에 의해 생성된 석고에서도 나타날 수도 있다. 따라서, 석고 결정이 시료 보관 중에 인공적으로 생성되었는지에 대해서도 고려해보아야한다. 석고 결정은 퇴적물 코어의 시료 보관 중에 황화물의 산화 또는 시료 견주를 통해 침전 될 수 있다(Liu et al., 2019). 하지만 모든 시료가 동일한 조건에서 보관되고 동일한 방법을 사용해 처리되었고, 코어의 위치와 시료의 채취된 깊이에 따라 존재 유무가 다르기 때문에 시료 처리 과정에서 침전된 것은 아닌 것으로 판단된다. 본 연구에서 발견되는 석고 입자들은 메탄 하이드레이트가 발견되는 ARA 마운드와 420 MV에서만 발견되므로 메탄 하이드레이트의 유무와 석고의 생성이 관련된 것으로 생각된다.

라. 자생 석고의 형성 과정

메탄 하이드레이트 환경에서 석고가 자생적으로 형성되는 것은 남중국해, 북태평양, 멕시코만, 남서 아프리카, 인도의 뱅골만, 지중해 등에서 보고되었다(Sassen et al., 2004, Wang et al., 2004, Larrasoana et al., 2007, Pierre et al., 2012, Kocherla 2013, Pierre et al., 2014, Lin et al., 2016, Pierre, 2017). 해양 환경에서 석고 침전이 가능한 칼슘과 황산염 이온의 기원은 해수가 가장 일반적인 공급원이다(Hoareau et al., 2011). 해수 자체에서 석고가 포화되지는 않지만 퇴적물의 공극수 내에서 황산염의 농도를 증가시킬 수 있다(Lin et al., 2016). 해양 환경에서 기존 연구에서는 황산염 메탄 전이대(Sulfate–Methane Transition Zone; SMTZ)에서 박테리아에 의해 생성된 황화수소가 철이온과 반응하여 황철석이 생성된다. 황철석은 다시 산화되면서 황산염 이온이 공극수로 공급된다. 황철석의 산화 과정에서 유공충과 같은 생물 기원 탄산염이 용해되면서 칼슘이 공급된다(Lin et al., 2016). 칼슘 이온의 농도는 메탄 하이드레이트가 형성되면서 이온 배제 효과에 의해 증가할 수 있다(Ussler and Paull, 1995). ion exclusion 효과에 의해 증가한 칼슘 이온 농도에 의해 메탄하이드레이트 환경에서 자생석고가 형성 될 수 있다(Wang et al., 2004, Lin et al., 2016). 기존 연구들과 다르게 본 연구에서는 EPMA 분석 결과 황철석이 발견되지 않았다. XRD 분석 결과 또한 황철석 피크가 발견되지 않는다.

메탄 하이드레이트가 형성되면서 이온 배제 효과에 의해 주변의 이온 농도가 증

가 한다. 황철석이 산화되어 생성된 황산염 이온들이 과포화된 칼슘 이온과 결합하여 석고를 형성한다(Wang et al., 2004). 하지만 본 연구에서는 메탄 하이드레이트 발견 위치는 코어의 제일 하부인 2.4m에서 발견되었지만 석고는 표층부터 1.4m 까지 나타난다. 메탄 하이드레이트에 의한 이온 배제 효과에 의해 생성이 되었다면 메탄 하이드레이트가 발견된 2.4m에서 석고가 나타나야한다. 하지만 석고는 1.4m부터 발견되기 때문에 이온 배제 효과는 석고 형성에 영향을 주지 못하였다. 기존 연구들에서는 칼슘의 공급은 대부분 유공충과 생물기원 탄산염이나 칼슘 광물(방해석, 백운석 등)이 용해되어 공급되었지만 본 연구에는 방해석의 공급원이 주변 기원지에 풍부한 곳이 없으며 북극의 기후 특성상 유공충과 같은 생물기원 탄산염이 매우 부족하다. 본 연구의 Unit 2에서 백운석이 풍부하다. 기준 코어의 백운석 함량은 평균 3%이며, 마운드 코어의 백운석 함량은 평균 1% 미만으로 나타난다. 백운석은 황화 수소(H_2S)나 황산과 반응하여 용해하며 석고를 생성할 수 있다 (Alvarez-Rodriguez and Clemente-Jul, 2009).

본 연구에서는 SMT는 1.3m로 백운석이 풍부한 Unit 2와 백운석이 나타나지 않는 Unit 3의 경계와 일치한다. 기존 연구와 마찬가지로 SMT 부근에서 석고가 생성되었다. 기존 연구에서 발견된 황철석이나 다른 철광물은 발견되지 않았으며, 칼슘의 기원인 생물기원 탄산염은 거의 나타나지 않는다. 따라서, 본 연구의 메탄 하이드레이트가 발견된 코어에서 형성된 자생석고에 사용된 칼슘과 황산염의 기원은 기존과 다른 것으로 생각한다. 퇴적층 하부의 메탄 하이드레이트가 용해되며 메탄 플러스가 상승하면 SMTZ가 Unit 2까지 상승하면서 미생물의 호흡에 의해 황화 수소가 생성된다. Unit 2에 황화 수소가 생성된 이후, 메탄 플러스가 약해지며 SMTZ가 하강함에 따라 Unit 2는 혐기성 환경에서 아혐기성 환경으로 변화한다. 아혐기성 환경에서 황화 수소는 산화하여 공극수를 산성화하고 산성화된 공극수에 의해 Unit 2의 백운석이 용해된다. 백운석 용해와 황화수소의 산화에 의해 방출된 칼슘 이온과 황산염 이온의 농도가 증가하며 공극수 내에서 과포화된다. 과포화된 두 이온이 결합하여 석고가 형성된다.

제 5 절 요 약

미래의 유망 자원으로 주목받고 있는 망간단괴는 태평양이나 인도양의 심해저뿐만 아니라 북극해에서도 여러 곳에서 발견되고 있다. 망간단괴는 성장과정에 따라 외형, 내부조직, 화학조성 및 광물조성 등 여러 가지 특성이 달라진다. 망간단괴의 성장과정에 따른 내부조직과 화학조성은 다양한 연구를 통해 비교적 잘 알려져 있으나, 정량적인 광물조성은 분명하게 밝혀진 바가 없다. 망간단괴를 구성하는 산화망간광물들은 입자가 매우 작고 결정도가 낮기 때문에, 정량적인 분석이 어려워 전체 시료에 대한 정성적인 결과만이 보고되고 있다. 이번 연구에서는 북극 동시베리아해 망간단괴의 내부조직을 관찰하고, 조직에 따른 광물조성의 변화를 알아보았으며, X선회절분석 그래프의 피크 면적비를 이용하여 망간단괴를 구성하는 3가지 주요한 산화망간광물 즉, 토도로카이트, 부서라이트, 베네사이트의 반정량 분석을 시도하였다. 동시베리아해 망간단괴의 내부조직은 다공질대(porous structure), 층상대(layered structure), 산화철층(Fe-oxide layer), 핵(nucleus)로 분류되었다. 단괴의 내부조직은 대부분 다공질로 구성되며, 층상대와 산화철층은 다공질대 사이에서 수 mm 이내로 관찰된다. 핵은 2개의 단괴에서만 확인되었으며, 미고결 멀드로 구성된다. 다공질대와 층상대는 조직은 서로 다르지만, 유사한 화학조성과 광물조성을 타나낸다. 두 조직의 Mn/Fe 비는 21.7로 망간의 함량이 매우 높으며 속성기원으로 구분되었다. 산화철층은 Mn/Fe 비가 0.1로 철이 매우 풍부하며 수성기원으로 구분되었다. 동시베리아해 망간단괴는 베네사이트, 부서라이트, 토도로카이트 순으로 함량비가 감소하며, 내부조직과는 뚜렷한 연관성을 나타내지 않았다. 그러나 단괴 내부에서 표면으로 갈수록 토도로카이트의 함량이 감소하는 경향을 나타내는데, 그 이유는 초기 침전 이후의 재결정작용 또는 단괴 내외부의 성장 속도 차이에 의한 것으로 간주된다. 피크 면적비를 이용한 산화망간광물의 반정량분석은 단괴 내부에서의 광물조성 차이를 비교하는데에 좋은 방법으로 여겨지므로, 앞으로 망간단괴의 광물학적 연구에 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

점토광물은 진흙화산(MV)을 구성하는 중요 광물로서, 진흙화산의 특성 및 형성 메커니즘을 밝히는 데에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되지만, 이에 대한 연구는 거의 수행된 바가 없다. 본 연구에서는 북극 보퍼트해 420 MV와 주변 해역 퇴적물들의 점토광물학적 차이를 규명하여, 진흙화산의 특성 및 형성과 점토광물과의 관계를 규명하고자 하였다. 420 MV와 맥켄지곡에서 8개의 박스 코어에

대해 점토광물과 입도 분석을 실시하였다. 맥켄지곡의 4가지 주요 점토광물의 상대적인 함량비는 맥켄지강과의 거리에 상관없이 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순으로 거의 일정하지만, 입도는 맥켄지강으로부터 멀어질수록 점점 세립화하는 경향을 나타낸다. 맥켄지곡의 퇴적물들은 주로 스멕타이트/일라이트의 비가 낮고 카올리나이트/녹니석의 비가 높은 맥켄지강의 특징을 가진다. 420 MV의 퇴적물은 점토광물의 함량이 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트 순으로 감소하며, 깊이에 따른 입도가 거의 일정하다. 스멕타이트와 조립질 퇴적물의 함량은 비교 코어보다 약 2배 높다. 녹니석보다 카올리나이트의 함량이 높은 강은 보퍼트해 내에서는 연구된 결과가 없으며, 맥켄지강과 스멕타이트/일라이트, 카올리나이트/녹니석의 비가 같은 비교 코어와 구분된다. 비교 코어보다 많은 조립질 퇴적물과 깊이에 따라 일정한 입도는 MV에 의한 분출로 인한 것으로 유추된다. 비교 코어의 퇴적물은 맥켄지강 기원, 420 MV의 퇴적물은 MV의 분출에 의한 것으로 해석된다.

북극해는 기후 변화에 따라 북극의 해빙과 빙상의 분포가 달라지며 쇄설성 퇴적물 내 광물의 특성이 변화한다. 따라서 해빙이나 빙산에 의해 운송된 해양 퇴적물을 연구하는 것은 지구 기후 변화를 이해하는 데에 매우 중요하다. 본 연구에서는 척치해저고원의 아라온 마운드에서 채취한 4개의 중력코어와 아라온 마운드 사이 사면에서 채취한 1개의 중력코어를 사용하여, 벌크광물조성, 점토광물조성, 빙운 쇄설물 연구를 통해 쇄설성 퇴적물의 기원지를 알아보고 이를 바탕으로 서북극해의 고환경 변화를 재구성하였다. 코어 퇴적물들은 갈색, 회색, 녹회색을 띠며 서북극해에서 나타나는 간빙기/빙기 순환에 따른 퇴적물 색의 특성을 잘 나타내고 있다. 척치해저고원에서 획득한 코어 퇴적물을 광물 특성과 주변에서 수행된 기준 연구와 비교하여 총 3개의 유닛으로 구분하였다. 최후빙기극대기에 퇴적된 유닛 3 퇴적물은 동시베리아해로 유입되는 콜리마 강과 인디기르카 강 퇴적물들이 동시베리아해 대륙붕에 퇴적된 후, 해빙이나 해류에 의해 유입된 것으로 보인다. 퇴빙기에 해당하는 유닛 2 퇴적물은 동시베리아해로 유입되는 콜리마 강, 인디기르카 강, 보퍼트해로 유입되는 맥켄지강과 캐나다 군도로부터 함께 공급된 것으로 보이며, 로렌타이드 빙상의 용해에 의하여 다량의 빙운 쇄설물들이 유입되었다. 간빙기 퇴적물인 유닛 1의 경우, 세립질 퇴적물들은 캐나다 북부와 동시베리아해로부터 해빙과 해류에 의해 공급되었으며, 조립질 퇴적물들은 캐나다 군도로부터 해빙에 의해 유입된 것으로 여겨진다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 연구의 최종 목표는 북극해 해저자원의 광물학적 특성을 규명하는 것이다. 첫 번째 세부 목표는 북극해 망간단괴의 광물학적-지화학적 특성을 알아보는 것이다, 두 번째 세부 목표는 해양 퇴적물의 광물 조성을 알아보는 것이다. 세 번째 세부 목표는 광물학적 데이터를 기반으로 해양 퇴적물의 기원지를 규명하고 고환경 변화를 해석하는 것이다.

첫 번째 세부 목표인 북극해 망간단괴의 광물학적-지화학적 특성을 달성하기 위해 ARA07C Expedition, ARA09C Expedition, ARA10C Expedition 기간 동안 동시베리아해에서 망간단괴 탐사를 실시하였으며, 다량의 망간단괴 시료를 확보하였다. 획득한 2천여개의 망간단괴는 형태적인 특성을 알아보기 위해, 육안 및 현미경 관찰을 통해 형태와 내부조직을 기재하였다. 분류된 내부조직 결과를 기반으로 상세한 부시료 획득 후, XRD 분석과 SEM-EDS 분석을 통해 광물학적-지화학적 특성을 알아보았다. 동시베리아해 망간단괴의 형태학적 특징과 내부조직, 그리고 내부조직에 따른 광물-지화학 조성 분석 결과는 본 보고서에 충분히 제시되었다. 또한, 분석된 결과를 기반으로 동시베리아해 망간단괴의 성인을 결정하였다.

두 번째 세부 목표는 해양 퇴적물의 광물 조성을 알아보는 것으로, 목표를 달성하기 위해 동시베리아해, 쳉치해, 보퍼트해에서 다량의 코어 퇴적물을 확보하였다. 각 코어는 5-10 cm 간격으로 부시료를 획득하였으며, 광물 조성을 알아보기 위해 XRD 분석을 실시하였다. 부시료들은 벌크 파우더 시료와 점토 분리 시료로 준비되어, 벌크 광물 조성과 점토 광물 조성을 분석하였다. 코어 퇴적물 분석 결과를 통해 가스 하이트레이트와 연관성을 가지는 자생 석고의 분포를 규명하였으며, 연구해역의 전반적인 광물 조성을 규명하였다. 해양 퇴적물의 광물 조성은 상세하게 분석되었으며, 본 보고서에 충분하게 제시되었다. 해양 퇴적물 내에서 해저자원으로서 가치를 가질 수 있는 광물들을 발견하지 못하였으나, 많은 북극해 해양 퇴적물에 대한 광물 조성 분석을 수행하였으며, 이 결과들은 추후 북극해 이해를 위한 기초자료로서 충분한 가치를 가질 것으로 판단된다.

세 번째 세부 목표는 광물학적 데이터를 기반으로 해양 퇴적물의 기원지를 규명하고 고환경 변화를 해석하는 것이다. 동시베리아해에서 4개의 코어 퇴적물을 분석하였으며, 동시베리아해 대륙붕에서부터 대륙사면으로 이어지는 구간의 광물조성을

분석하였다. 또한, 척치해에서는 아라온 마운드를 포함하여 5개의 코어 퇴적물을 분석하였으며, 보페트해에서는 맥肯지 트리프와 420 MV에서 다량의 박스 코어 퇴적물을 확보하고 광물 조성을 분석하였다. 연구 결과는 해역에 따른 퇴적물의 특성과 퇴적 시기에 따른 퇴적물의 기원지 변화를 규명하였으며, 세 번째 세부 목표를 충분히 달성하였다.

현재까지 전 세계적으로 북극해 연구는 탄성파 탐사 및 수층 해수의 특성 연구가 주로 실시되었으며, 해저 망간단괴와 퇴적물의 광물 조성에 대한 연구는 드물다. 따라서 본 연구에서 제시된 동시베리아해 망간단괴에 대한 형태, 광물, 지화학적 데이터와 퇴적물의 광물 조성 데이터는 향후 북극 연구를 위한 전세계적인 기초자료로서 이용될 수 있다. 또한, 미래 광물 자원개발 및 전 지구적인 기후 변화에 대한 중요한 자료로서 이용 가능하다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발에서는 동시베리아해 망간단괴, 보퍼트해 코어 퇴적물, 동시베리아해 코어 퇴적물에 대한 연구를 실시하였다. 동시베리아해 망간단괴 연구는 전반적인 형태학적 특징들을 기재하였으며, 내부조직에 대한 분석을 실시하였다. 또한 내부조직에 따른 광물조성과 화학조성의 차이를 알아보고 단괴의 성인을 결정하였다. 코어 퇴적물 연구는 일반적인 해저 퇴적물과 가스 하이드레이트와 연관된 마운드 구조의 퇴적물로 구분될 수 있으며, 퇴적물의 기원지 연구를 통한 고환경 해석과 마운드 구조의 광물학적 특징을 연구하였다. 최근 급속한 지구 온난화로 인해 북극 자원개발 및 수송 여건이 크게 개선되었으며, 북극해 연안국들은 국가적 차원에서 북극의 자원개발과 인프라 건설 사업을 활발히 추진하고 있다. 북극에는 지금까지 발견되지 않은 가스와 석유의 약 22%가 매장되어 있을 것으로 추산되었으며, 망간 단괴를 비롯한 광물자원 또한 세계 매장량의 16%가 북극에 있을 것으로 추산된다. 본 연구 주제는 동시베리아해에서 발견된 망간단괴에 최초의 연구결과로서 추후 북극해 망간단괴의 탐사 개발에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 북극해 망간단괴는 기존에 알려진 심해저 망간단괴와 달리 수심 200 m 내외의 얕은 해양환경에서 형성된다. 이들의 형성환경을 이해한다면 해저의 금속 침전과정에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

북극은 전지구적 기후변화의 증폭된 신호를 나타낸다. 코어 퇴적물의 기원지 변화 연구는 퇴적물의 기원암을 알아낼 수 있으며, 이 정보는 퇴적 당시의 기후 환경과 밀접하게 연관된다. 이번 연구에 이용된 코어 퇴적물들은 동시베리아해와 척치해의 마지막 최대 빙하기 이후의 기록을 잘 보존하고 있으며, 이 해석을 통해 빙하기 이후 북극의 기후와 퇴적환경을 해석할 수 있다. 추후 추가적인 코어 퇴적물에 대한 연구가 이루어진다면 빙하기 이후 전지구적 기후 변화에 대한 이해를 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 북극에는 다량의 가스 하이드레이트가 매장되어 있을 것으로 예상되고 있어, 자원적으로 많은 관심을 받고 있다. 그러나, 가스 하이드레이트의 해리에 의한 메탄 방출 현상은 지구 온난화의 가속화를 야기할 수 있어, 환경적으로도 많은 관심을 받고 있다. 이번 연구에서 밝혀진 메탄 하이드레이트의 방출과 석고의 연관성은 추후 북극의 메탄 방출 또는 가스 하이드레이트를 지시할 수 있는 광물로서 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

제 6 장 참고문헌

- Banerjee, R., Roy, S., Dasgupta, S., Mukhopadhyay, S., and Miura, H. (1999) Petrogenesis of ferromanganese nodules from east of the Chagos archipelago, Central Indian Basin, Indian Ocean. *Marine Geology*, 157, 145-158.
- Batchelor, C.L., Dowdeswell, J.A., and Pietras, J.T. (2013) Seismic stratigraphy, sedimentary architecture and palaeo-glaciology of the Mackenzie Trough: evidence for two Quaternary ice advances and limited fan development on the western Canadian Beaufort Sea margin. *Quaternary Science Reviews*, 65, 73-87.
- Baturin, G.N., and Dubinchuk, V.T. (2011) The composition of ferromanganese nodules of the chukchi and East Siberian Seas. *Doklady Earth Sciences*, 440, 1258-1264.
- Baturin, G.N., Dubinchuk, V.T., and Novigatsky, A.N. (2016) Phase distribution of elements in ferromanganese nodules of the Kara Sea. *Doklady Earth Sciences*, 471, 1199-1203.
- Baturin, G.N., Dubinchuk, V.T., Ovsyannikov, A.A., and Rashidov, V.A. (2017) Ferromanganese nodules from the East Siberian Sea near Bennett Island. *Oceanology*, 57, 707-715.
- Baturin, G.N. (2018) Distribution of elements in ferromanganese nodules in seas and lakes. *Lithology and Mineral Resources*, 54, 362-373.
- Bau, M., Koschinsky, A., Dulski, P. and Hein, J. R. (1996) Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1709-1725.
- Baumann, K.-H., Lackschewitz, K.S., Mangerud, J., Spielhagen, R.F., Wolf-Welling, T.C.W., Henrich, R., and Kassens, H. (1995) Reflection of Scandinavian Ice Sheet fluctuations in Norwegian Sea sediments during the last 150,000 years. *Quaternary Research*, 43, 185-197.
- Benites, M., Millo, C., Hein, J., Nath, B.N., Murton, B., Galante, D. and Jovane, L., (2018) Integrated Geochemical and morphological data provide insights into the genesis of ferromanganese nodules. *Minerals*, 8, 488.

- Blasco, S., Bennett, R., Brent, T., Burton, M., Campbell, P., Carr, E., Covill, R., Dallimore, S., Davies, E., Hughes-Clarke, J., Issler, D., Leonard, L., MacKillop, K., Mazzotti, S., Patton, E., Rogers, G., Shearer, J., and White, M. (2013) 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea Seabed Geohazards Associated with Offshore Hydrocarbon Development. Geological Survey of Canada, Open File 6989, 340p.
- Biscaye, P.E., (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geological Society of America, Bullentin, 76, 803-832.
- Bogdanova, O.Yu., Gorshkov, A.I., Novikov, G.V., and Bogdanov, Yu.A. (2008) Mineralogy of morphogenetic types of ferromanganese deposits in the world ocean. Geology of Ore Deposits, 50, 462-469.
- Bonatti, E., Kraemer, T., and Rydell, H. (1972) Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In: Horn, D.R. (Ed.), Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. NSF. Washington D.C., pp. 149-166.
- Bonini, M. (2008) Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pede-Apennine margin, northern Italy). Geology, 36, 131-134.
- Bonini, M. (2012) Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. Earth-Science Reviews, 115, 121-152.
- Boswell, R. and Collett, T.S. (2011) Current perspectives on gas hydrate resources. Energy & Environmental Science, 4(4), 1206-1215.
- Bredehoeft, J.D. and Hanshaw, B.B. (1968) On the maintenance of anomalous fluid pressures: Thick sedimentary sequences. Geological Society of America Bulletin, 79, 1097-1106.
- Choi, H.S., Chang, S.-W., and Lee, S.-R. (2000) Correlation between mineralogical and chemical compositions of the micro-textures in manganese nodules. Journal of the Mineralogical Society of Korea, 13, 205-220 (in Korean with English abstract).
- Clark, D.L. and Hanson, A. (1983). Central Arctic Ocean sediment texture: A key to ice transport mechanism. In: Molnia B.F. (eds) Glacial-Marine Sedimentation.

- Springer, Boston, MA, 301–330.
- Dimitrov, L.I. (2002) Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews*, 59, 49–76.
- Etiope, G. (2015) Natural Gas Seepage. The Earth's Hydrocarbon Degassing. Springer International Publishing, Switzerland, 199p.
- Etiope, G. and Milkov, A.V. (2004) A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environmental Geology*, 46, 997–1002.
- Gamboa, A., Montero-Serrano, J.C., St-Onge, G., Rochon, A., and Desiage, P.A. (2017) Mineralogical, geochemical, and magnetic signatures of surface sediments from the Canadian Beaufort Shelf and Amundsen Gulf Canadian Arctic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 488–512.
- Ginsburg, G.D., Milkov, A.V., Soloviev, V.A., Egorov, A.V., Cherkashev, G.A., Vogt, P.R., Crane, K., Lorenson, T.D., and Khutorshkoy, M.D. (1999) Gas hydrate accumulation at the Hakon Mosby Mud Volcano. *Geo-Marine Letters*, 19, 57–67.
- Giovanol, R., 1985, A review of the todorokite-buserite problem: implications to mineralogy of marine manganese nodules: discussion. *American Mineralogist*, 70, 202–204.
- Gordeev, V.V., Martin, J.M., Sidorov, I.S., and Sidorova, M.V. (1996) A Reassessment of the Eurasian River input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. *American Journal of Science*, 296, 664–691.
- Gretener, P. (1985) The National Conference on Earth Science, Banff, November 5–9, 1984: “Geopressures and Hydrocarbon Occurrences”. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 33, 269–273.
- Guliyev, I.S. and Feizullayev, A.A. (1997) All About Mud Volcanoes. Nafta Press, Baku, 52p.
- Hebbeln, D., Henrich, R., and Baumann, K.-H. (1998) Paleoceanography of the last interglacial/glacial cycle in the Polar North Atlantic. *Quaternary Science Review*, 17, 125–153.
- Hensen, C., Wallmann, K., Schmidt, M., Ranero, C.R., and Suess, E. (2004) Fluid

expulsion related to mud extrusion off Costa Rica—A window to the subducting slab. *Geology*, 32, 201-204.

Halbach, P., and Puteanus, D. (1988) Geochemical trends of different genetic types of nodules and crusts. In *The manganese nodule belt of the Pacific Ocean: Geological environment, nodule formation, and mining aspects* (eds. Halbach, P., Friedrich, G. and von Stackelberg, U.), Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 61-69.

Hein, J.R., and Koschinsky, A. (2014) Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), vol.13, Elsevier, Oxford, 273-291.

Hein, J.R., Mizell, K., Koschinsky, A. and Conrad, T.A., (2013) Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1–14.

Hein, J.R., Spinardi, F., Okamoto, N., Mizell, K., Thorburn, D. and Tawake, A. (2015) Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions. *Ore Geology Reviews*, 68, 97–116.

Hein, J.R., Koschinsky, A. and Kuhn, T. (2020) Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1, 158-169.

Hill, P.R., Blasco, S.M., Harper, J.R., and Fissel, D.B. (1991) Sedimentation on the Canadian Beaufort Shelf. *Continental Shelf Research*, 11, 821-842.

Holems, R.M., McClelland, J.W., Peterson, B.J., Shiklomanov, I.A., Shiklomanov, A.I., Zhulidov, A.V., Gordeev, V.V., and Bobrovitskaya, N.N. (2002) A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1849-1862.

IMA (International Mineralogical Association), (2020) The new IMA list of minerals – A work in progress – updated: September 2020. 222p.

Ingri, J., 1985, Geochemistry of ferromanganese concretions in the Barents Sea. *Marine Geology*, 67, 101-119.

Jakobsson, M., Grantz, A., Kristoffersen, Y., and Macnab, R. (2003) Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor. *Geological Society of America Bulletin*, 115, 1443-1455.

- Jakubov, A., All-Zade, A., and Zehnalov, M. (1971) Mud Volcanoes of the Azerbaijan SSR. Publishing House of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR, Baku, 256p.
- Jin, Y.K. and Shipboard Scientific Party (2018) ARA08C Cruise Report: 2017 Korea-Canada-USA Beaufort Sea Research Program. Korea Polar Research Institute. 214p.
- Kholodov, V.N. (2002) Mud volcanoes, their distribution regularities and genesis: Communication 1. Mud volcanic provinces and morphology of mud volcanoes. *Lithology and Mineral Resources*, 37, 197–209.
- Kim, C.-M., Jeong, J.O., Gu, D. and Han, R. (2017) Identification of materials in principal slip zones of faults by X-ray diffraction analysis using a small amount of sample. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 873-883.
- Kolesnik, O.N. and Kolesnik, A.N. (2013) Specific chemical and mineral composition of ferromanganese nodules from the Chukchi Sea. *Russian Geology and Geophysics*, 54, 653–663.
- Koo, H.J., Cho, H.G., Yoo, C.M. and Jin, Y.K. (2017) Characteristics of manganese nodule from the East Siberian Sea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 30, 219-227 (In Korean with English abstract).
- Koo, H., Lee, Y., Kim, S., and Cho, H. (2018) Clay mineral distribution and provenance in surface sediments of Central Yellow Sea Mud. *Geosciences Journal*, 22, 989-1000.
- Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2010) Present state and future of the Arctic resource development, research report, 10-03, 105p.
- Kopf, A.J. (2002) Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40(2), 2-1-52.
- Kuhn, T., Bostick, B.C., Koschinsky, A., Halbach, P. and Fendorf, S., 2003, Enrichment of Mo in hydrothermal Mn precipitates: possible Mo sources, formation process and phase associations. *Chemical Geology*, 199, 29–43.
- Kuhn, T., Wegorzewski, A., Röhleemann, C., and Vink, A. (2017) Composition, formation, and occurrence of polymetallic nodules. In deep-sea mining (ed. Sharma, R.), Springer, Cham, 23-63.

- Kobayashi, D., Yamamoto, M., Irino, T., Nam, S., Park, Y., Harada, N., Nagashima, K., Chikta, K., and Saitoh, S. (2016) Distribution of detrital minerals and sediment color in western Arctic Ocean and northern Bering Sea sediments: Changes in the provenance of western Arctic Ocean sediments since the last glacial period. *Polar Science*, 10, 519-531.
- Kuijpers, A., Knutz, P., and Moros, M., (2014) Ice-Rafted Debris (IRD). *Encyclopedia of Marine Geosciences*, 1-7.
- Kvenvolden, K.A. (1988), Methane hydrate-A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?. *Chemical Geology*, 71(1), 41-51.
- Lee, C.H., Lee, S.R. and Chang, S.W. (1996) Internal texture, geochemistry and mineralogy of manganese nodules from the Clarion-Clipperton fracture zones, Pacific. *Journal of the Geological Society of Korea*, 32, 187-198 (In Korean with English abstract).
- Macdonald, R.W., and Gobeil, C. (2012) Manganese sources and sinks in the Arctic Ocean with reference to periodic enrichments in basin sediments. *Aquatic Geochemistry*, 18, 565-591.
- Marz, C., Stratmann, A., Matthiessen, J., Meinhardt, A.-K., Eckert, S., Schnetger, B., Vogt, C., Stein, R., and Brumsack, H.-J. (2011) Manganese-rich brown layers in Arctic Ocean sediments: Composition, formation mechanisms, and diagenetic overprint. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 7668-7687.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (MOMAF) (2003) A report on 2002 deep seabed mineral resources exploration. CRPM137-00-1503-5, Seoul, 683p.
- Murray, J., and Renard, A.F. (1891) Report on deep-sea deposits. *Report on the Scientific Result of the Voyage of H.M.S. challenger During the Years 1873-1876*. Neil and Co., Edinburgh, 520p.
- Mazzini, A., and Etiope, G. (2017) Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*, 168, 81-112.
- Mazzini, A., Ivanov, M.K., Parnell, J., Stadnitskaia, A., Cronin, B.T., Poludetskina, E., Mazurenko, L., and van Weering, T.C.E. (2004). Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea: geochemical characterisation and relation to seeping

- fluids. *Marine Geology*, 212, 153–181.
- Mazzini, A., Svensen, H., Planke, S., Guliyev, I., Akhmanov, G.G., Fallik, T., and Banks, D. (2009) When mud volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1704-1715.
- Mhammedi, N.A., Moumni, B.E., Hmaidi, A.E., Raissouni, A., and Arrim, A.E. (2008) Mineralogical and geochemical study of mud volcanoes in north Moroccan atlantic margin. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2, 387-396.
- Milkov, A.V., Sassen, R., Novikova, I., and Mikhailov, E. (2000) Gas hydrates at minimum stability water depths in the Gulf of Mexico: Significance to geohazard assessment. *Gulf Coase Association of Geological Societies Transactions*, L, 217-224.
- Milkov, A.V., (2004) Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there?. *Earth Science Reviews*, 66(3-4), 183-197.
- Murton, B.J., 2001, A global review of non-living resources on the extended continental shelf. *Brazilian Journal of Geophysics*, 18, 281-306.
- Naidu, A.S. and Mowatt, T.C. (1983) Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 841-854.
- Nordenskjold, A.E. (1881) *The voyage of the Vega round Asia and Europe*. Vol. 1, Macmillan and Co., London, 564p.
- Olariu, C., and Bhattacharya, J.P. (2006) Terminal Distributary Channels and Delta Front Architecture of River-Dominated Delta Systems. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 212–233.
- Pal'chik, N.A., Grigor'eva, T.N., and Moroz, T.N. (2013) Natural and synthetic manganese minerals. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 58, 138-143.
- Paull, C.K., Dallimore, S.R., Caress, D.W., Gwiazda, R., Melling, H., Riedel, M., Jin, Y.K., Hong, J.K., Kim, Y.G., Graves, D., Sherman, A., Lundsten., E., Anderson, K., Lundsten, L., Villinger, H., Kopf, A.S., Johnson, B., Clarke., J.H., Blasco, S., Conway, K., Neelands, P., Thomas, H., and Cote, M. (2015) Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 3160-3181.

- Paull, C.K., Ussler, W., Dallimore, S.R., Blasco, S.M., Lorenson, T.D., Melling, H., Medioli, B.E., Nixon, F.M. and McLaughlin, F.A. (2007) Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. *Geophysical Research Letters*, 34, L01603.
- Plumley, W.J. (1980) Abnormally high fluid pressure: Survey of some basic principles. *Bulletin of American Association of Petroleum*, 64, 414-422.
- Rachold, V., Eicken, H., Gordeev, V.V., Grigoriev, M.N., Hubberten, H.W., Lisitzin, A.P., Shevchenko, V.P., and Schirmeister, L. (2004a) Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean. In: R. Stein & R.W. Macdonald (Eds), *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Springer, Berlin, Heidelberg, 33–56.
- Royer, T.C. and Emery, W.J. (1987) Circulation in the Gulf of Alaska, 1981. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 34, 1361-1377.
- Ruppel C.D. (2011) Methane Hydrates and Contemporary Climate Change. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 29p.
- Ruppel, C.D. and Kessler, J.D. (2017) The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55(1), 126-168.
- Soloviev, V.A. and Mazurenko, L.L. (2000) Sea floor venting and gas hydrate accumulation In: Max, M. (eds) *Natural Gas Hydrate. Coastal Systems and Continental Margins*, vol 5. Springer, Dordrecht.
- Spilhagen, R., Baumann, K., Erlenkeuser, H., Nowaczyk, N., Nørgaard-Pedersen, N., Vogt, C., and Weiel, D. (2004) Arctic Ocean deep-sea record of northern Eurasian ice sheet history. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1455-1483.
- Stabeno, P.J., Reed, R.K., and Schumacher, J.D. (1995) The Alaska Coastal Current: Continuity of transport and forcing. *Journal of Geophysical Research*, 100(C2), 2477-2485.
- Sorem, R.K. and Fewkes, R.H., 1979, Manganese nodules, research data and methods of investigation. Plenum, New York, 732p.
- Szamałek, K., Uścinowicz, S. and Zglinski, Karol., 2018, Rare earth elements in Fe-Mn nodules from the southern Baltic Sea – A preliminary study. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 472, 199–212.

U.S. Geological Survey (USGS) (2008) Circum-Arctic Resource Appraisal; Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle. USGS Fact Sheet 2008-3049, Washington D.C.

Vereshchagin, O.S., Perova, E.N., Brusnitsyn, A.I., Ershova, V.B., Khudoley, A.K., Shilovskikh, V.V. and Molchanov, E.V., 2019, Ferro-manganese nodules from the Kara Sea: Mineralogy, geochemistry and genesis. *Ore Geology Reviews*, 106, 192-204.

Vogt, P.R., Cherkashev, G., Ginsburg, G., Ivanov, G., Milkov, A., Crane, K., Lein, A., Sundvor, E., Pimenov, N., and Egorov, A. (1997) Haakon Mosby Mud Volcano provides unusual example of venting. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78, 549-557.

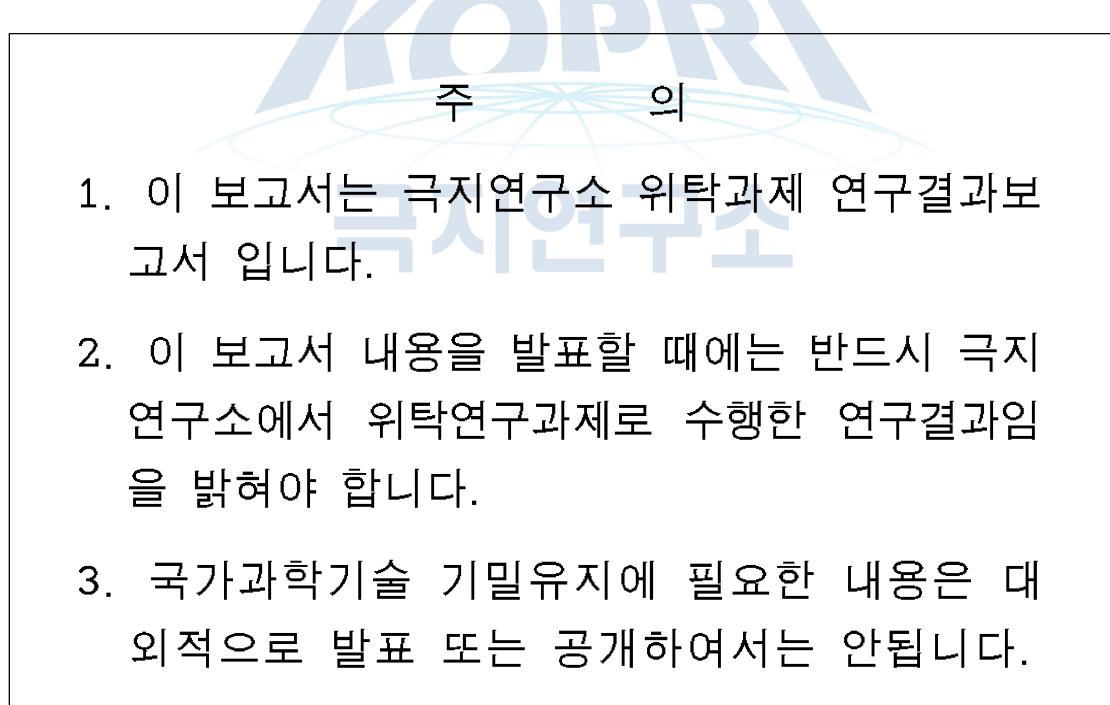
Wegorzewski, A.V. and Kuhn, T., 2014, The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean. *Marine Geology*, 357, 123-138.

Wegorzewski, A.V., Kuhn, T., Dohrmann, R., Wirth, R. and Grangeon, S., 2015, Mineralogical characterization of individual growth structures of Mn-nodules with different Ni+Cu content from the central Pacific Ocean. *American Mineralogist*, 100, 2497-2508.

Yassir, N.A. (1989) Mud Volcanoes and the Behaviour of Overpressured Clays and Silts. Doctoral thesis, University of London.

Zhong, Y., Chen, Z., Gonzalez, F.J., Hein, J.R., Zheng, X., Li, G., Luo, Y., Tian, Y., and Wang, S. (2017) Composition and genesis of ferromanganese deposits from the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 110-128.

Zoporowski, A. and Miller, S.A. (2009) Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1879-1887.



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