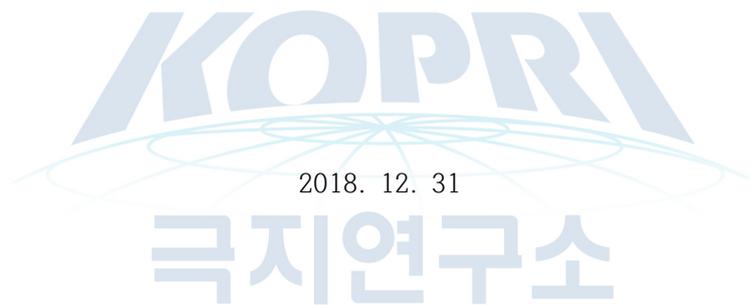


북극다산기지 주변 후기고생대 빙하기(LPIA)
퇴적체에 기록된 고환경변화와 조절요인

Changes in paleoenvironments and their controlling
factors recorded in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA)
sedimentary rocks around the Arctic Dasan Station



극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극다산기지 주변 후기고생대 빙하기(LPIA) 퇴적체에 기록된 고환경변화와 조절요인”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 12. 31

연구책임자 : 우주선

참여연구원 : 최문영, 박태윤,
이미정, 김대영, 유인성, 백종민,
오창환, 김지훈, 오재룡, 이승호,
한승희, 이미리내, 심민섭, 이상민,
김현문

보고서 초록

세부사업 구분	Seed형 선행과제			
과제명	국문	북극다산기지 주변 후기고생대 빙하기(LPIA) 퇴적체에 기록된 고환경변화와 조절요인		
	영문	Changes in paleoenvironments and their controlling factors recorded in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA) sedimentary rocks around the Arctic Dasan Station		
주관연구기관	극지연구소		과제성격	
공동연구기관	-		기초(V), 응용(), 개발()	
연구책임자	소속 및 부서명	극지지구시스템연구부	직위	선임연구원
	성명 (한문)	우주선(禹周善)	전공	퇴적학
	소내전화	5436	핸드폰	010-2721-4764
총연구기간	2016. 12. 30 - 2018. 10. 29 (2년)			
연구개발비	정부출연금	200,000 천원	참여연구원	16명 내부: 13 , 외부: 3명
	(직접비)	200,000 천원		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)			보고서 면수	41
<p>○ 과거 빙하기 극지방 빙하의 증감이 중위도 환경에 미친 영향을 규명하기 위해, 3 억 년 전 다산기지 주변 고환경변화 추적과 조절요인(빙하의 증감, 전지구적 해수면변동, 초대륙 형성, 지체구조운동)을 밝히는 것이 필요함</p> <p>○ 연구결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 이를 위해 다산기지 현장조사와 오슬로 자연사박물관 협조를 통한 후기고생대 퇴적층 주상도 작성 및 시료를 확보 - 다산기지 주변 후기고생대 퇴적층의 퇴적상 분석과 순차층서 기초연구 - 후기고생대 퇴적층의 동위원소분석을 통해 전지구적인 시그널과 비교할 수 있는 기초자료 축적 - 후기고생대 퇴적층의 발달 양상이 큰 진폭을 가지는 빠른 해수면 변동에 의한 것임을 규명 <p>○ 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3억년전 전지구적인 환경변화와 다산기지 주변 퇴적환경과의 비교연구에 활용 - 유사한 지질시대 빙하기 관련 연구로 연구영역(빙하퇴적체 퇴적작용, 지구화학, 빙하거동 모델링, 고생물학 등)과 연구지역(그린란드, 스발바르 북동부 등)을 확대한 대형과제 기반 구축 				
색인어 (각 5개 이상)	한글	후기고생대빙하기, 다산기지, 순차층서학, 동위원소, 3차원지질모델		
	영어	Late Paleozoic Ice Age, Dasan Station, sequence stratigraphy, isotope, 3D geological model		

요 약 문

I. 제 목

북극다산기지 주변 후기고생대 빙하기(LPIA) 퇴적체에 기록된 고환경변화와 조절요인

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 3억년전 다산기지 주변 고환경변화 추적과 조절요인(빙하의 증감, 전지구적 해수면변동, 초대륙 형성, 지체구조운동)규명
 - 1차년도 목표: 다산기지현장 조사를 통한 분석시료 확보
 - 2차년도 목표: 후기고생대 퇴적층의 순차층서학적 연구 및 퇴적암, 화석 시료의 화학분석
 - 3차년도 목표: 순차층서연구결과와 동위원소 지시자 분석을 통한 고환경 변화와 조절요인 규명

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 다산기지 현장조사
- 후기고생대 퇴적층의 순차층서 기초연구
- 후기고생대 퇴적층의 지화학/동위원소분석 기초연구
- 후기고생대 퇴적층의 고환경변화 및 조절요인 규명

IV. 연구개발결과

- 다산기지 주변 후기고생대 킵스달렌 층군 전체의 상세주상도를 작성함
- 주요 지질노두에 대한 3차원 지형모델 작성, virtual geology 기초자료 확보
- 후기고생대 퇴적층의 순차층서 연구로 퇴적층 발달의 조절요인(해수면변동-빙하의 증감)연구
- 스발바르 다른 지역 더 나아가 그린란드, 캐나다북부 등 동시대 다른 퇴적분지에 대비할 수 있는 층서틀 마련
- 다산기지 주변 석회암시료에 대해 동위원소를 이용한 층서분석을 최초로 실시
- 자료축적이 부족한 석탄기-페름기 경계부에 대한 황동위원소 자료를 확보함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 유사한 지질시대 빙하기 관련 연구로 연구영역(빙하퇴적체 퇴적작용, 지구화학, 빙하거동 모델링, 고생물학 등)과 연구지역(그린란드, 스발바르 북동부 등)을 확대한 대형과제 기반 구축
- 연구 중 구축한 국외 네트워크를 북극 자원개발 현황 정보 획득에 활용
- 북극권 유일한 우리나라 연구기지인 다산기지 주변의 지질에 대한 이해 증진과 이를 통한 북극에 대한 국민관심 고취에 활용

S U M M A R Y

Global sea-level change and global tectonics are major extrinsic factors for controlling depositional style of a basin. Expansion and shrinkage of polar ice-sheets in the polar region significantly influence global environments by means of changes in sea level. In order to understand such processes in the Late Paleozoic time, longest ice age in the geological time and close analogue to the present ice age, sedimentary strata near Dasan Station, Svalbard were studied through facies analysis, sequence stratigraphy, and isotopic analysis.

Field works for two seasons resulted in logging of the entire Late Paleozoic strata around Dasan Station and rock samples for facies analysis and isotope analysis were acquired. For comparison, rock samples and fossil samples with stratigraphic information were acquired from Oslo Natural History Museum. Based on the field data and rock samples, facies analysis was conducted. From the detailed sedimentary logs and mapping, sequence stratigraphic boundaries were recognized and interpreted in terms of relative sea-level change. The results indicate that the stratigraphic occurrence of the facies was controlled by high-frequency, large-amplitude cyclic changes in sea-level, most likely induced by expansion and shrinkage of polar ice-sheet. Oxygen, carbon, and sulfur isotopes from the succession provide a basis of further analysis on the global environmental changes and stratigraphic developments.

The results will be utilized for comparison studies to the correlatable successions in the other part of the world. Furthermore, this research will be a foundation stone of the multi-discipline studies for the glacial deposits of the geological history.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Previous studies	4
Chapter 3 Results	7
Chapter 4 Achievements against plan	33
Chapter 5 Utilization plan	34
Chapter 6 Scientific information acquired from other countries	35
Chapter 7 References	40



목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	4
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	7
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	33
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	34
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	35
제 7 장 참고문헌	40



제 1 장 서론

빙상의 용해는 극지역에서 일어나지만 그 영향은 전지구적이다. 빙상의 용해로 인한 다양한 환경변화 특히 해수면 상승은 적도를 비롯한 중위도 지역의 인간의 삶에도 큰 영향을 끼칠 것으로 예상된다. 이 때문에 현재 지구환경의 가장 큰 변동요인이자, 극지 연구의 중심 관심사는 남북극의 빙상 용해와 이로 인한 해수면 상승이라고 할 수 있다. 이와 같은 관점으로 현재 빙하기 남북극 빙상변화의 기록을 퇴적물 또는 얼음 코어에서 찾는 연구가 수행되고 있으며, 이것은 궁극적으로 인간의 가장 많이 거주하고 있는 중위도에 끼치는 영향을 파악하기 위함이라고 할 수 있다.

극지역의 빙하기 과거 지질시대에 항상 존재했던 것은 아니다. 지질역사에 걸쳐 극지방에 넓은 빙상이 존재했던 총 다섯 번의 중요한 빙하기가 보고되고 있으며 (그림 1-1) 후기고생대 이전의 빙하기는 지금 지구환경과는 매우 다른 환경에서 형성되었기에, 과거 지구시스템의 유지에 대한 흥미로운 정보를 제공한다. 첫번째 선캄브리아기의 빙하기는 산소호흡을 하는 생물에 의해 지구상 산소가 증가하는 Great Oxidation Event 뒤이어 발달한 빙하기로서 지구대기가 지금과 같은 산소농도를 가지게 되는 것과 관계가 있어 중요하다(Holland, 2006). 두번째 선캄브리아기 빙하기는 Snowball Earth로도 불리며 적도지역을 포함한 전지구가 빙하로 뒤덮여있던 시기로 알려져 있다(Hoffman et al., 1998). 빙하기이후 여러 동물, 특히 광물골격을 가진 동물이 다양하게 출현하였다(Zhuravlev and Wood, 2008). 오르도비스기말 빙하기는

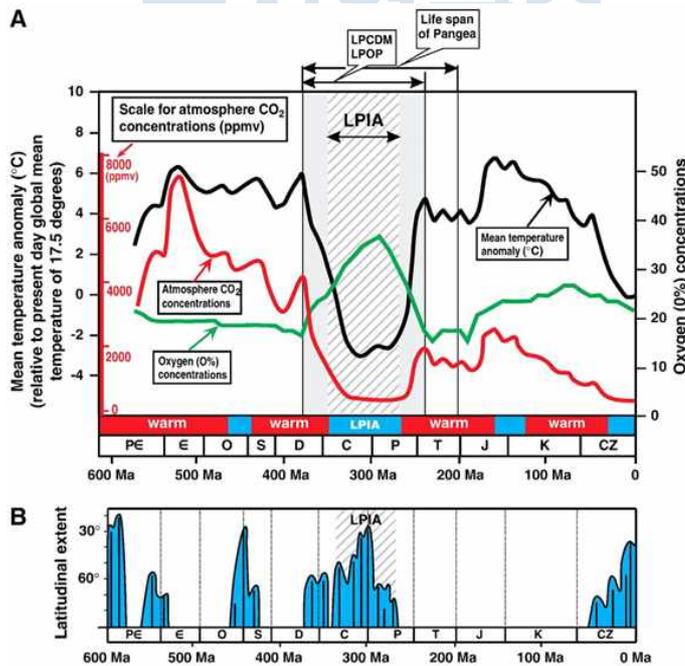


그림 1-1. 지질시대에서 빙하기 존재하던 시기와 이와 관련된 환경변화를 표시한 도표(Shi and Waterhouse, 2010)

짧지만 당시 번성하던 따뜻한 바다의 생물들의 절멸을 가져와 후기오르도비스기 대멸종을 촉발시킨 원인으로 여겨진다(Hammarlund et al., 2012). 오르도비스기말 대멸종은 5번의 대멸종 사건 중 유일하게 빙하가 개입된 사건이다. 이와 같이 지질시대 빙하가 일어난 시대는 현재 빙하기와는 매우 다른 대기조성, 해수조성, 물질순환 특성을 가지고 있었으며, 이들의 변화에 의해 빙하가 촉발되고 다시 빙하기에 의해 지구환경이 변화하는 특성을 보이기 때문에 지구역사를 이해하는데 매우 중요하다. 네 번째 후기고생대 빙하는 식물이 육상으로 진출한 이후의 빙하기라는 점에서 이전 빙하기와 현저히 다른 특징을 가지며 오히려 다섯 번째 빙하기인 현재 빙하기와 유사한 지구시스템에서 형성된 면이 있다. 또한 남반구에 넓은 대륙빙상이 존재한다는 점도 지금의 빙하기와 유사하다(그림 1-2).

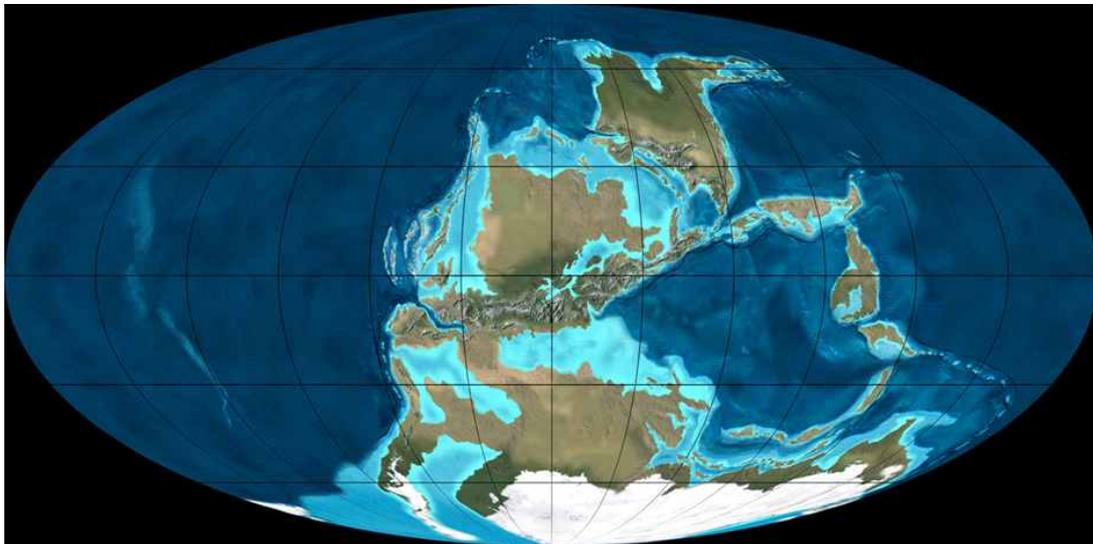


그림 1-2. 후기고생대 대륙의 분포와 남반구 빙하 분포를 나타내는 고지리도 (Blakey, 2008)

후기고생대 빙하의 증감은 남반구 대륙들(호주, 남아메리카, 남극)에 남아있는 빙하에 의해 형성된 퇴적암의 분포와 발달에 따라 많이 밝혀진 바 있다(Montanez and Paulsen, 2013). 빙하의 증감에 따른 결과로 전지구적으로 단주기의 큰 해수면 변동이 많았으며(Montanez and Paulsen, 2013), 이 해수면 변동은 빙하가 존재하지 않았던 북반구에도 영향을 미쳤다. 하지만 중위도 퇴적체에 대한 연구는 매우 적은편이며, 특히 다산기지가 위치한 스텔바르 지역에 대한 연구는 전무하다. 다산기지 주변에 존재하는 후기고생대 퇴적체는 당시 중위도 지방(위도 북위 40도)에서 형성된 석회암으로 다양한 규모와 특징을 지니는 반복층(cyclic deposit)으로 이루어져 있다. 이와 같은 반복층은 해수면의 주기적인 변동에 의해 형성된 것으로 해석되고 있으며, 빙하기의 해수면변동은 극지역 빙상의 증감에 따른 것이 일반적이다. 이와 같이 지질시대의 극지역-중위도 환경변화 사이의 관계를 파악하여 현재 빙하기의 환경변화 이해 증진을 도모하

는 것은 중요하다. 조사지역에 대해 산발적으로 이루어진 암층서(Saalmann and Thiedig, 2002), 생층서(Buggisch et al., 2001), 고생태 연구(Ludwig, 1991) 외에 체계적인 연구가 이루어지지 않았다. 이를 극복하고 빙하기의 전지구적인 환경변화가 빙하와 멀리 떨어진 곳에 어떤 방식으로 영향을 미치는지 이해하기 위해 다산기지 주변 후기고생대 퇴적체의 발달양상과 이를 조절한 요인에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 다산기지 주변 퇴적층의 암층서와 생층서를 정립하였고, 암석시료 채취와 탄소, 산소, 황동위원소를 분석하여, 물리적인 퇴적상과 관련된 또는 나타나지 않는 환경변화의 흔적을 추적하였다. 다산기지 주변 퇴적상과의 비교연구를 위해 오슬로자연사박물관에 수장된 중부 스발바르 지역의 석회암 시료를 입수하여, 퇴적상분석 및 동위원소 분석을 실시하였다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

후기고생대 빙하기는 캄브리아기 이후 가장 긴 빙하기로 알려져 있으며 그 기간과 빙하 발달 양상이 현재 빙하기와 비견되고 있다. 당시 빙하가 주로 발달했던 남반구 곤드와나 대륙의 빙하 퇴적층에 대한 연구로 빙하의 분포 범위와 지속기간에 대한 모델이 도출되어 있다. 또한 남반구 빙하의 증감과 관련된 북반구 탄산염 대지(그린란드, 캐나다 북부, 스발바르)의 발달에 대한 연구가 이루어진 바 있지만 다산기지 주변을 대상으로 한 연구는 전무한 실정이다. 후기고생대 석회암의 탄소, 산소, 스트론튬 동위원소 층서는 비교적 잘 정립되어있지만 최근 미생물대사작용, 지체구조 운동 등과 관련한 고환경지시자로 각광받고 있는 황동위원소자료는 매우 적은 상황이다.

석탄기 빙하기 퇴적체로 생각되는 국내 퇴적암에 대한 연구가 1990년대 수행되었으며, 2010년에 같은 퇴적암이 새로운 연대 및 구조 증거를 바탕으로 후기시생대 빙하퇴적체로 제안된 바 있다. 하지만, 변성/변형작용에 의해 일차퇴적구조가 지워져 해당 퇴적암의 빙하기원 여부가 논란의 대상인 상황에서 심도 깊은 연구는 불가능한 상황이다. 국내연구진에 의해 국내외 고생대 석회암에 대한 층서학적, 고생물학적 연구는 비교적 활발하게 이루어지고 있으며, 산소 탄소 등 동위원소를 이용한 층서 및 환경 해석 연구를 비롯한 지화학 분석이 대학과 출연연에서 활발하게 이루어지고 있다.

극지연구소의 선행 연구에 의해 다산기지 북서쪽 4-10 km 지점에 총 4개의 연구 지역을 확보하고 주상도를 완성한 상태이다(그림 2-1). 이에 의하면

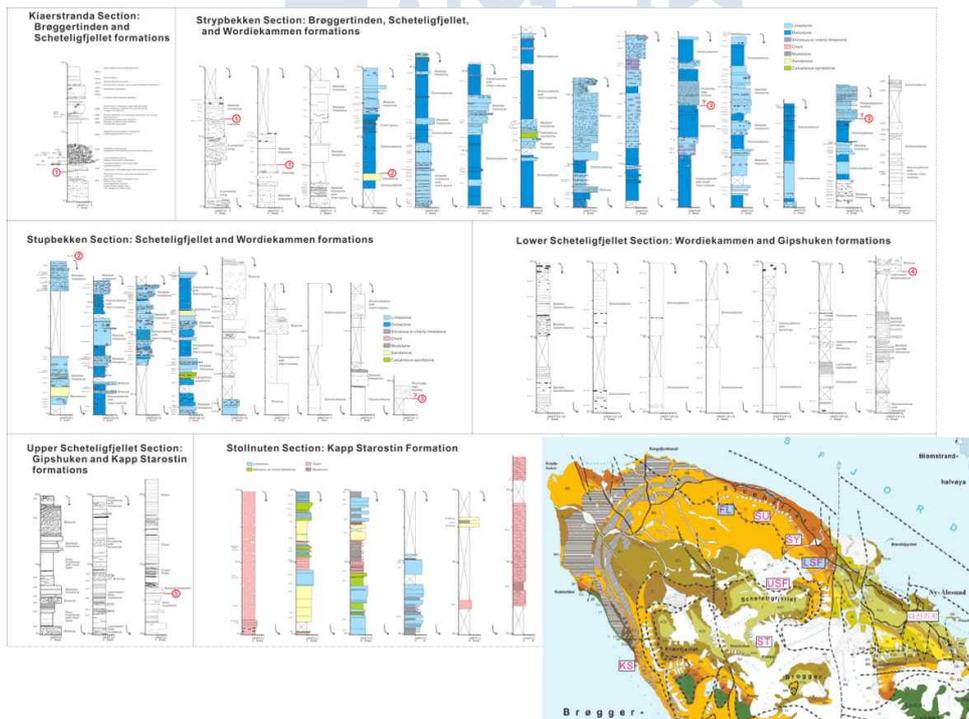


그림 2-1. 선행연구과제로 확보한 다산기지지주변 주요 후기고생대 단면과 주상도

다산기지 주변 후기고생대 퇴적층은 중기 석탄기에서 페름기에 이르는 시대에 걸쳐 형성되었으며 해당시기는 위에 언급한 빙하의 발달 이외에도 다양한 환경 변화가 일어났던 시기이다(그림 2-2, 2-3). 후기고생대는 초대륙판게아가 형성되기 시작하는 단계로 대륙의 충돌과 관련하여 전지구적으로 대륙의 융기와 풍화 작용이 활발했던 시기이다(Murphy et al., 2009). 당시 스발바르는 위도 북위 25도에서 45도까지 계속적으로 북상하고 있었으며 이에 따른 느린 기후변화가 동물군집 등에 의해 반영되었는 것으로 알려져 있다(Elvevold et al., 2007). 대륙의 형성과정에서 대륙간에 발달한 대양의 모양과 순환도 변화하였다. 스발바르와 저위도를 잇는 우랄해협이 초대륙 판게아의 형성과정에서 사라지며, 스발바르해역의 수온이 급격히 떨어짐이 동물군집 변화와 퇴적상변화로 나타난다(Beauchamp et al., 2002). 동위 원소기록의 측면에서 보면 황동위원소 기록이 매우 적은 구간이며, 현생이언에서 가장 낮은 황동위원소값을 타나낸다고 알려져 있다(그림 2-4, Kampschulte & Strauss, 2004)

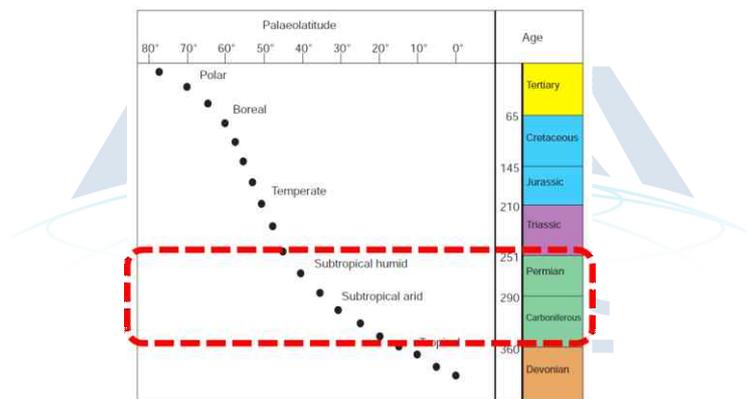


그림 2-2. 지질시대에 따른 스발바르의 위도를 표시한 도표(Elvevold et al., 2007). 후기고생대가 빨간 점선으로 표시되어있음

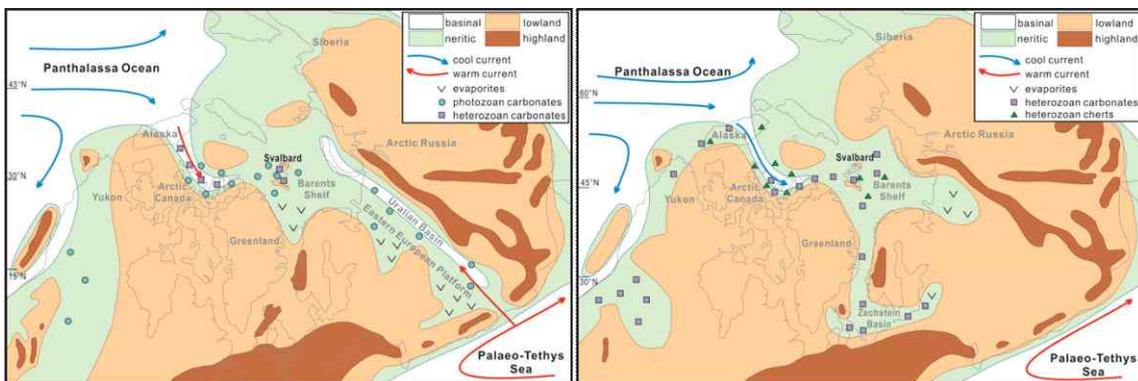


그림 2-3. 후기고생대 Ural Seaway의 폐쇄와 이와 관련된 고해양학적 변화.

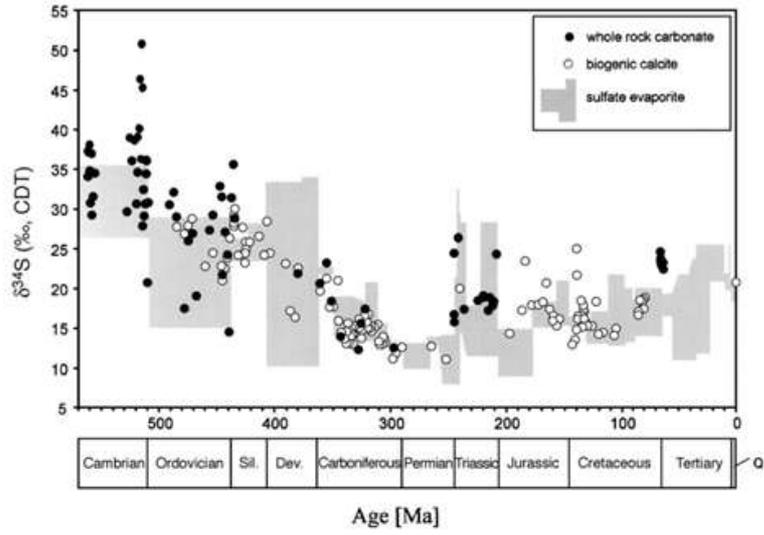


그림 2-4. 현생이언 동안의 황동위원소 비율변화. 후기고생대 자료가 절대적으로 부족함(Kampschulte & Strauss, 2004)



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

이 장에서는 연구개발내용을 (1) 다산기지 주변 현장조사, (2) 퇴적상분석, (3) 동위원소 분석의 세 가지 분야로 나누어 기술한다.

3.1 다산기지 주변 현장조사, 주상도 작성 및 맵핑

3.1.1 현장조사 개요

2년의 연구수행기간동안 총 연인원 9명이 투입되어 현장조사를 실시하였다. 총 인원의 구성은 퇴적상분석 6명, 동위원소 분석 1명, 3차원 지질조사 2명이다. 각 현장조사의 세부 사항은 아래와 같다.

- 일정 2017년 7월 11일 - 8월 9일 : 오재룡, 우주선 (극지연구소), 서명호 (소마디자인) 다산기지 주변 현장조사
- 일정 2018년 7월 15일 - 2018년 8월 19일 : 우주선, 최문영, 오재룡 (극지연), 김현문 (공주대), 심민섭 (서울대), 서명호 (소마디자인)

3.1.2 현장조사 내용

(1) 다산기지 주변 후기고생대 퇴적체 주상도 작성 및 시료 채취

기존에 확보한 단면들에 대한 추가조사를 실시하여 퇴적체 주상도를 보완하고 시료를 채취하였다. 이를 통해 분지형성초기 육상환경에서부터 해양환경으로 변해가는 과정에 대한 퇴적상 분석과, 분지에 영향을 끼친 지체구조운동, 해수면변동 등에 의한 순차층서 경계면 형성기작규명에 필요한 정보를 얻었다.

(2) 후기고생대 퇴적층 신규 단면 발견

기존 연구에서 다루지 않았던 새로운 퇴적단면에 대한 현장조사를 실시하였다(그림 3-1). 첫번째로 북서해안(Stuphallet) 단면에 대한 현장조사를 실시하였다. 석탄기 최하부 지층인 브뢰거틴덴층(Brøggertinden Formation)이 가장 길게 나타나는 단면으로 하부 경계는 노출되지 않았지만, 상부경계 즉 육상환경에서 해양환경으로 전이하는 부분의 잘 노출되어있다(그림3-2). 전체 섹션의 고해상 모자이크 사진(총 8 km)과 하부 주상도 작성하였다(그림3-3, 3-4). 단면에 노출된 브뢰거틴덴층은 총 200 m이며, 퇴적상분석과 연대결정을 위한 시료를 확보하였다. 브뢰거틴덴층을 구성하는 하성환경 퇴적층의 특징을 추가적으로 파악하고자 주상도 작성이외에, 해안 노두의 모자이크 사진을 대상으로 퇴적층의 형태구성요소 분석을 시도하였다.

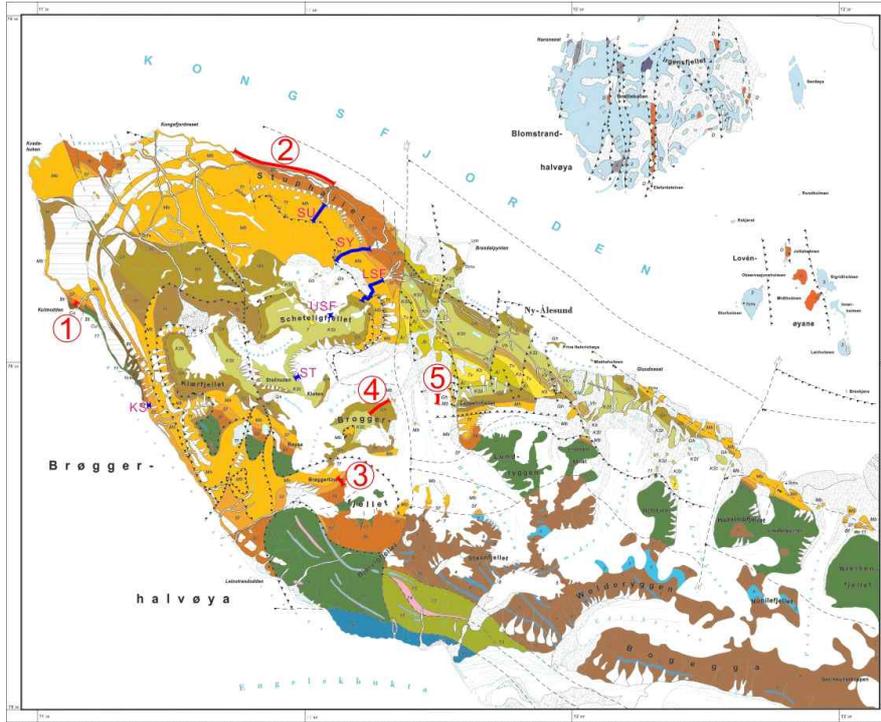


그림 3-1. 조사지역을 표시한 지질도. 파란색은 기존 단면, 빨간색은 신규 조사지역. 1: Kulmoden 단면, 2: Stuphallet coast 단면, 3: Broggertinden 단면, 4: Broggerfjellet 단면, 5: Broggerbreen 단면

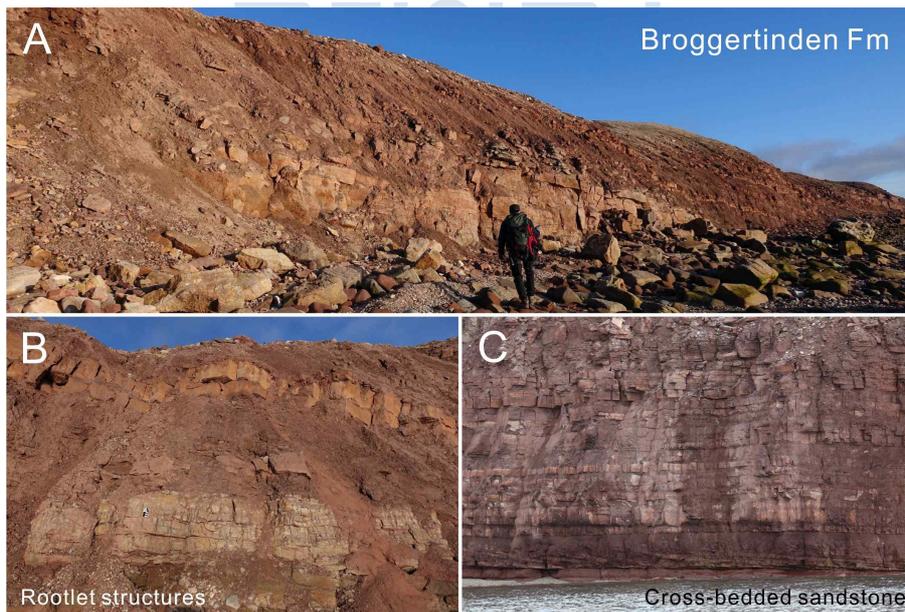


그림 3-2. 북서해안단면. A. 단면의 전경. 하부의 역암에서 상부의 사암/이암으로 변화하는 구간이 나타남. B. 뿌리자국이 남은 밝은색 사암과 위에 놓이는 이암/사암교호. C. 하부의 사층리(높이 약 1 m)가 잘 발달한 이질 사암과 위에 놓이는 수평층이 잘 발달한 사암

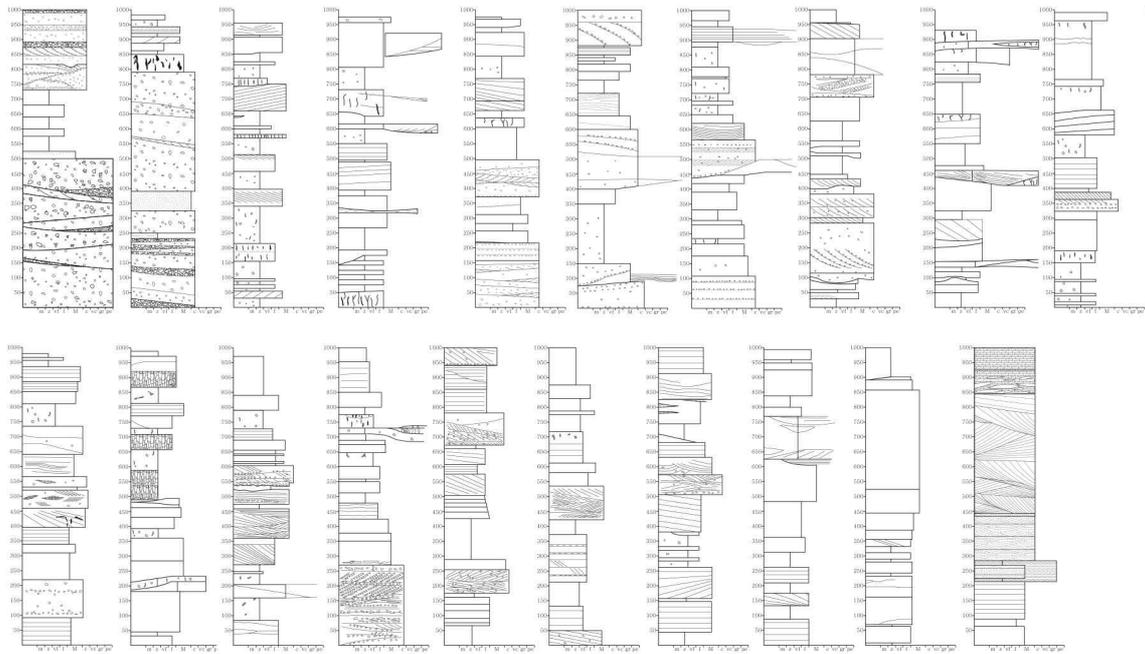


그림 3-3. 브리저텐반도 북서해안에 노출된 브리저텐층의 주상도



그림 3-4. 2년간의 현장조사로 획득한 북동해안 단면 모자이크사진 전체모습과 일부 확대된 일부분. 단면 총 길이 약 8 km, 노출 퇴적암 두께 약 200 m

두 번째로 석탄기층 최하부의 쇄설성 퇴적암이 석회암으로 전이되는 부분에 대한 현장조사를 실시하였다. 석탄기 깁스달렌층군(Gipsdalen Group)의 최하부층인 브뢰거틴텐(Broggerfjorden Formation)이 셰텔리그피예렛층(Scheteligfjellet Formation)으로 전이하는 퇴적환경을 복원하기 위해 주요 단면 3지역(쿨모덴, 브뢰거틴텐, 북부해안단면)에 대한 주상도를 작성하고 시료를 채취하였다.

쿨모덴 단면은 반도의 남서쪽 해안에 위치하고 있으며(그림3-1), 하부 오루스트달렌층과 상부의 셰텔리그피예렛층과의 경계를 포함한 단면이 노출되어있다고 알려져있다. 하지만 현장답사결과 작은 하천을 따라 층의 상부 약 10 m 구간만이 잘 노출되어있음을 확인하였다(그림3-5, 3-6). 전반적인 노출은 불량하지만, 하성환경에서 해성환경으로 전이되는 구간이 잘 나타난다. 특히 브뢰거틴텐상부에 나타나는 노출환경과 관련된 석회암 토양관련 구조들이 잘 나타난다.

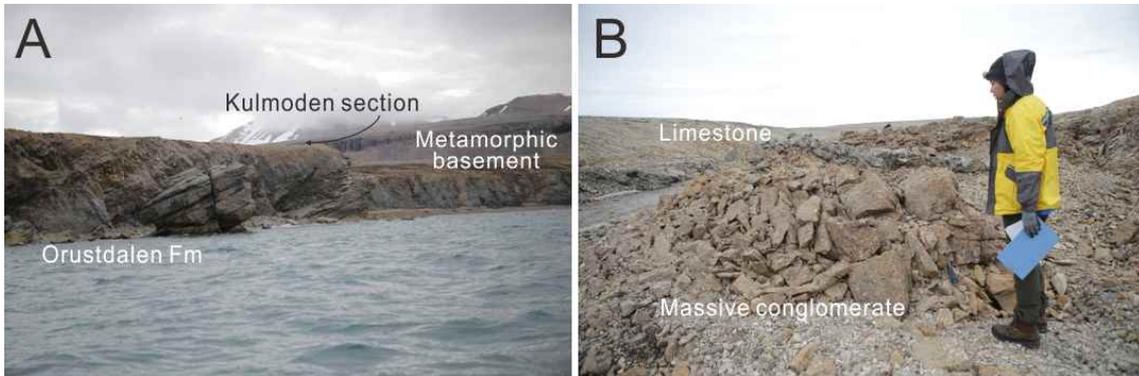


그림3-5. 쿨모덴 단면의 전경과 노두사진

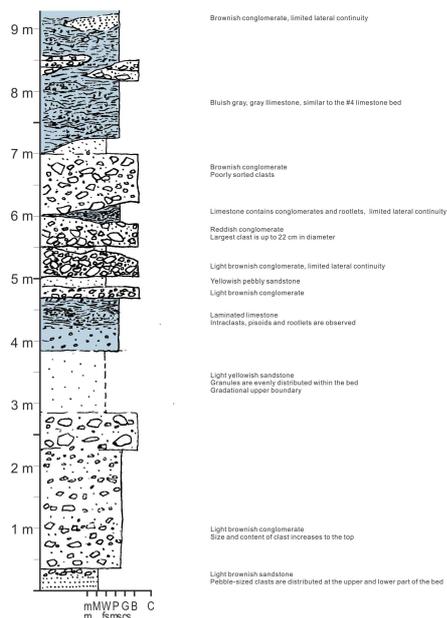


그림3-6. 쿨모덴단면의 브뢰거틴텐층-셰텔리그피예렛층 경계부 주상도. 역암층과 함께 토양화 흔적이 있는 석회암이 특징적으로 나타남

또한 브뢰거틴층의 표식지인 브뢰거틴 지역(그림3-1)에 대한 현장조사를 실시하였다. 표식지이지만 브뢰거틴층의 하부경계는 노출되어있지 않으며, 완만한 능선을 따라 노출된 노두는 연속성이 불량하다. 하부에 비해 상부는 노출이 양호하여 하성환경에서 해성환경으로의 전이과정과 노출환경과 관련된 석회암 토양 관련 구조들이 잘 나타난다. 주상도 작성과 시료채취를 실시하였다(그림3-7).

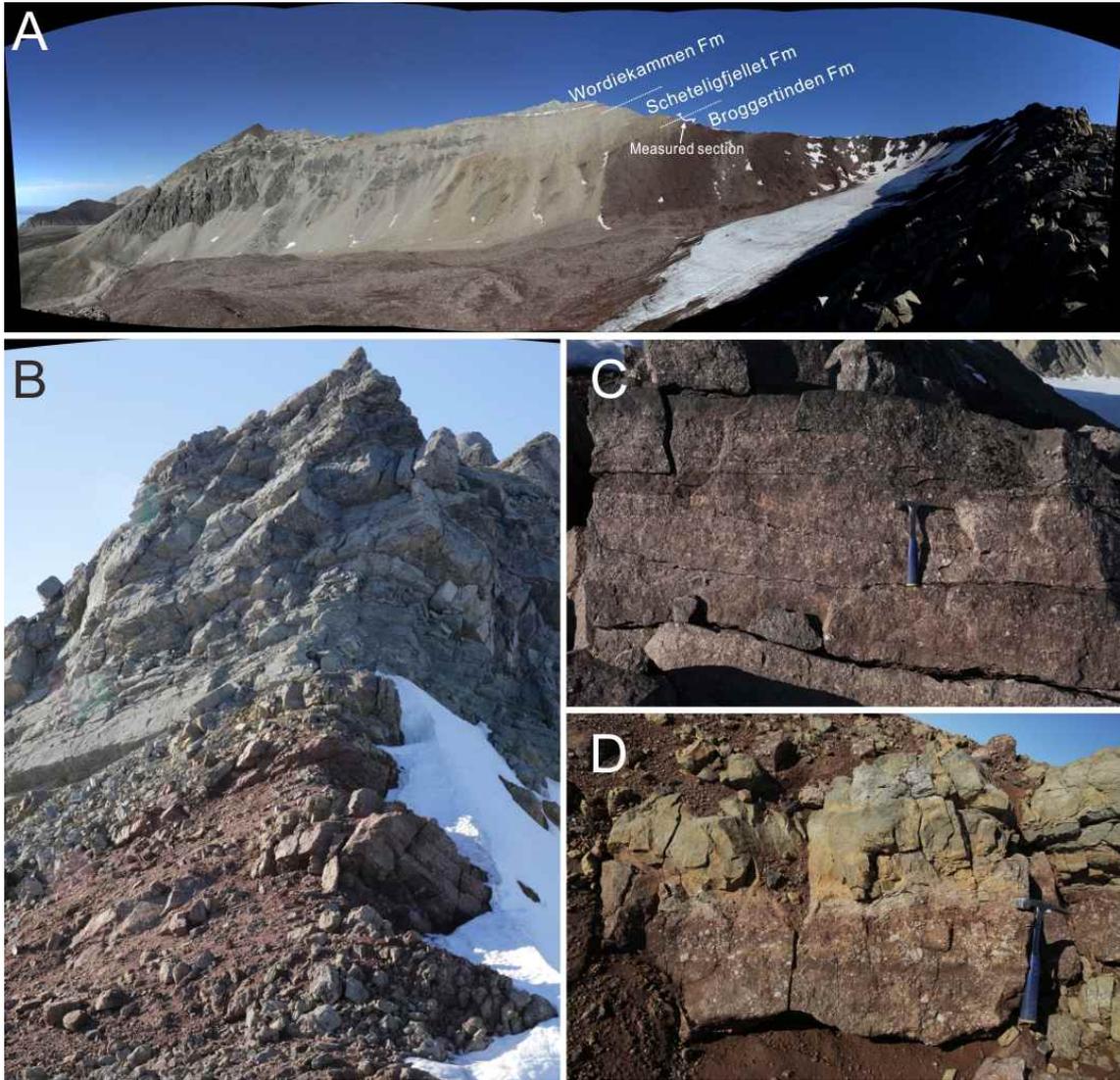


그림3-7. 브뢰거틴 단면. A. 브뢰거틴 단면에 노출된 브뢰거틴층, 세텔리그피예랫층, 웨디에카멘층 경계부. B. 브뢰거틴층, 세텔리그피예랫층 경계부. 붉은 색을 띠는 하성 쇄설성 사암과 역암이 회색을 띠는 해성층으로 전이하는 구간이 잘 드러나 있음. C. 하성 퇴적층에 특징적으로 나타나는 사층리가 발달하는 역암. D. 하성퇴적물에 포함되어있는 석회암 단괴. 과거 토양화작용에 의한 식물 뿌리자국 등이 나타남.

본 연구에 있어 가장 큰 성과중의 하나는 기존 이 지역 연구들에서 전혀 기재되지 않았던 김슈켄층 상하부를 포함한 전체구간에 대한 주상도 작성과 시료채취를 성공한 것이다. 브뢰거피예렛(Brøggerfjellet) 단면은 기존에 확보하지 못한 김슈켄층(Gipshuken Formation)의 상하부 경계를 포함한 전체구간이 노출된 단면이다(그림3-1, 3-8). 2년간의 현장조사로 주요퇴적상(그림3-9) 확인과 주상도 작성 및 샘플 채취를 완료하였다. 브뢰거피예렛 단면의 김슈켄층은 상하부 경계를 잘 노출하고 있으며, 전체구간은 총 두께 200 m이다. 급한 산악지형으로, 접근과 활동에 위험한 요소가 있어 극지산악활동 경험이 풍부한 전문가 동반하고 전문 등반장비를 활용해 충분한 안전 확보 후 작업하였다(그림3-10).



그림3-8. 브뢰거피예렛 단면 전경과 주상도를 작성한 루트(하얀선)

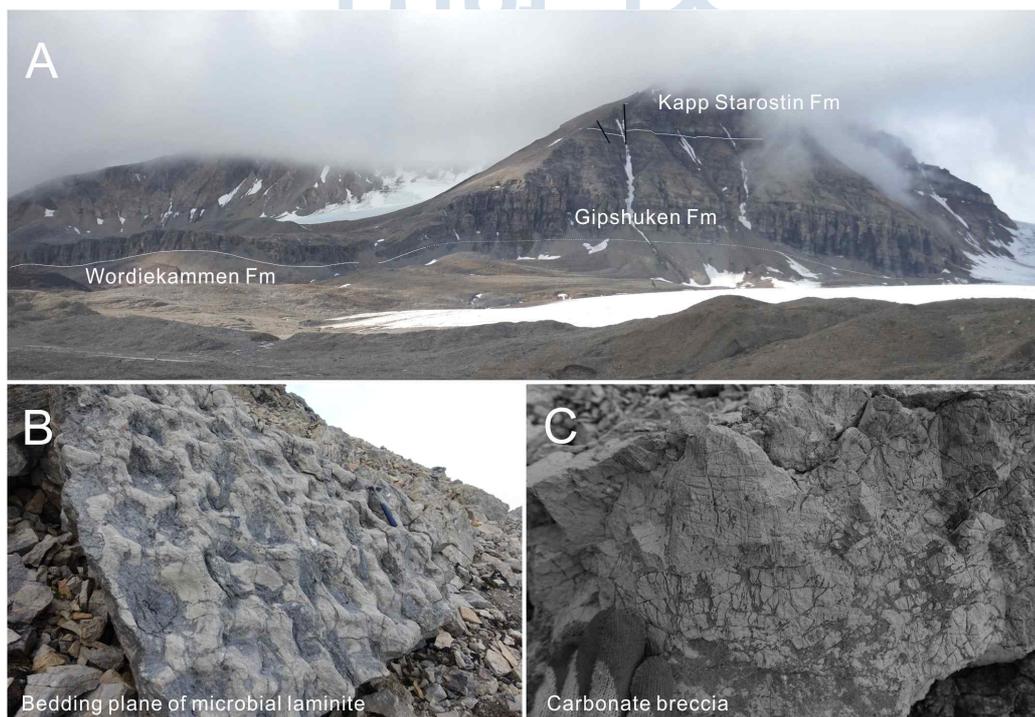


그림 3-9. 브뢰거피예렛 단면. A. 단면의 전경. B, C. 김슈켄층의 주요 퇴적상인

엽층리가 발달한 석회암과 석회 각력암

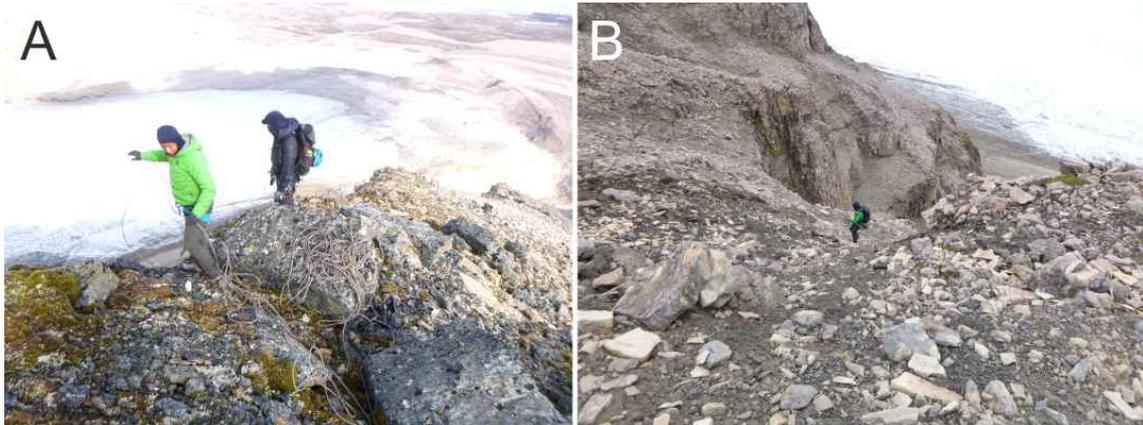


그림 3-10. 등반장비와 안전장비를 활용하여 안전을 확보하는 장면과, 고정된 로프를 이용해 현장조사를 실시하는 장면

브뢰거피예렛 단면 조사를 통해 암상과악 및 동위원소 분석용 암석시료 41점 획득하였다. 석회각력암과 엽리가 발달한 백운암으로 주로 이루어져 있으며, 조사 구간에 구조적 변형이 없다. 조사단면의 하부에는 위디에카멘층의 티렐피예렛층원이 약 20m 노출되어 있다. 티렐피예렛층원의 특징적인 암상인 엽리가 발달한 백운암, 작은 증발암 캐스트가 발달하는 백운암을 침식하며 발달하는 두꺼운 석회 각력암의 하부를 김슈켄층의 하부경계로 새로 정의하였다(그림 3-11).

김슈켄층은 두꺼운 석회각력암과 함께 티렐피예렛층의 암상과 유사한 엽리가 발달하거나 균질한 백운암이 교호하며 나타난다. 석회각력암은 대부분 단순한 역조성을 보이며 분급이 매우 불량하다. 역의 크기는 1m 에서 매우 작은 것까지 매우 다양하다. 기질부분은 작은 모래입자 크기의 석회질 암석이거나 균질한 석회암질로 이루어져 있다. 김슈켄층의 상부 경계는 두꺼운 규질 석회암 또는 처트암이 처음 나타나는 곳으로 새로 정의하였다(그림 3-11).

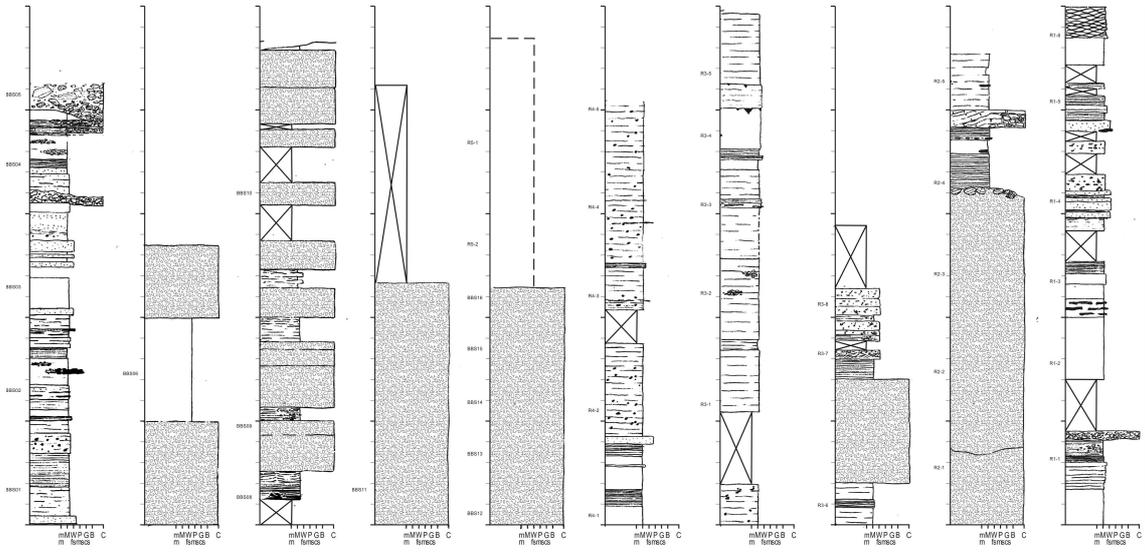


그림 3-11. 브뢰거피예렛 단면 깃슈켄층의 상하부 경계와 주상도. 주상도 왼쪽의 기호는 동위원소 분석을 위한 시료 채취 위치

마지막으로 조사한 브뢰거달렌(Brøggerdalen) 단면은 급격한 기후변화(한랭화)가 시작되는 지점의 퇴적기록을 보여주는 캅스타로스틴층(Kapp Starostin Formation) 하부가 잘 노출되어있다. 주상도작성과 시료채취를 완료하였으며, 특히 한랭한 환경에서 번성하는 해면동물화석이 드물게 잘 보존된 상태로 발견되었다.

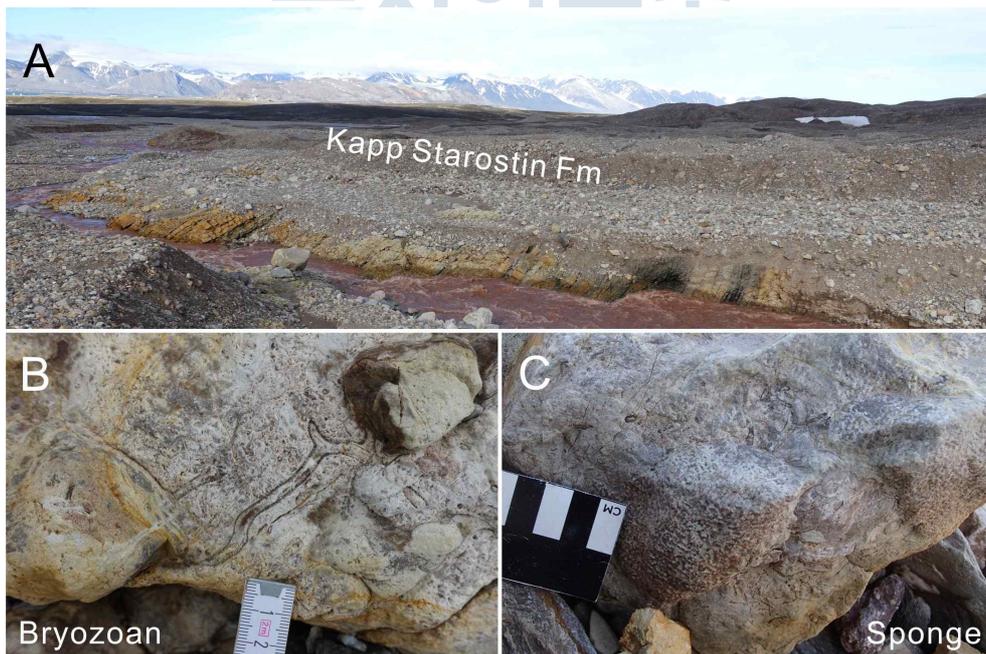


그림 3-12. 브뢰거달렌 단면. A. 하상에 드러난 단면의 전경. B, C. 잘 보존된 한랭성 해양 동물 화석

(3) 주요 단면에 대한 3차원 지형 모델 제작

다산기지주변의 퇴적체는 급경사 또는 경사면에 위치해 있어 퇴적체의 특성을 파악하기 어려운 면이 있어 일부 단면에 대해 3차원 모델을 제작하여 활용하였다. 일반적으로 3차원 모델 작성에는 드론을 사용하지만, 다산기지 주변에서 일반 드론사용이 불가능하여, 장대에 부착한 카메라를 이용한 방법을 활용하여 주요단면에 대한 3차원 지형 모델을 제작하였다(그림 3-13).

SY전경, SY상부, SYB64, HL, SFL, SFR, SU, KS, KM, SUC, BB, BF 12곳에 대한 모델을 제작하였다(그림 3-14). 주요 단면에 대해서 층서 경계를 표시하여 활용하였고, 향후 변형 퇴적층 복원 및 순차층서 경계면의 3차원적 도시에 활용할 예정이다. 현장에서 드론과 장대 등을 이용한 정지영상을 Photoscan을 이용해 3차원 모델로 제작하여 일반적인 현장조사를 통해 얻기 불가능한 각도의 노두 전경사진을 자유롭게 얻었으며 이를 바탕으로 주요한 지질학적 경계면과 정보를 도시하여 층서 단위의 3차원적인 분포 양상을 파악하였다(그림 3-15. 3-16. 3-17).

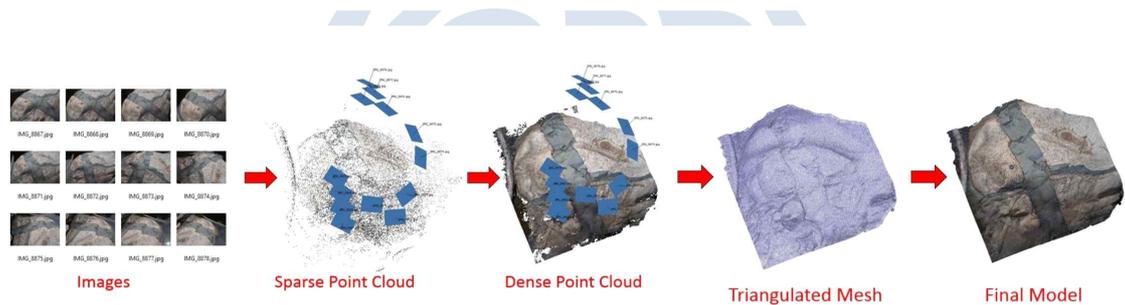


그림 3-13. 3차원 지형 모델 작성과정을 나타낸 모식도와 실제 현장작업 모습 (A, B)

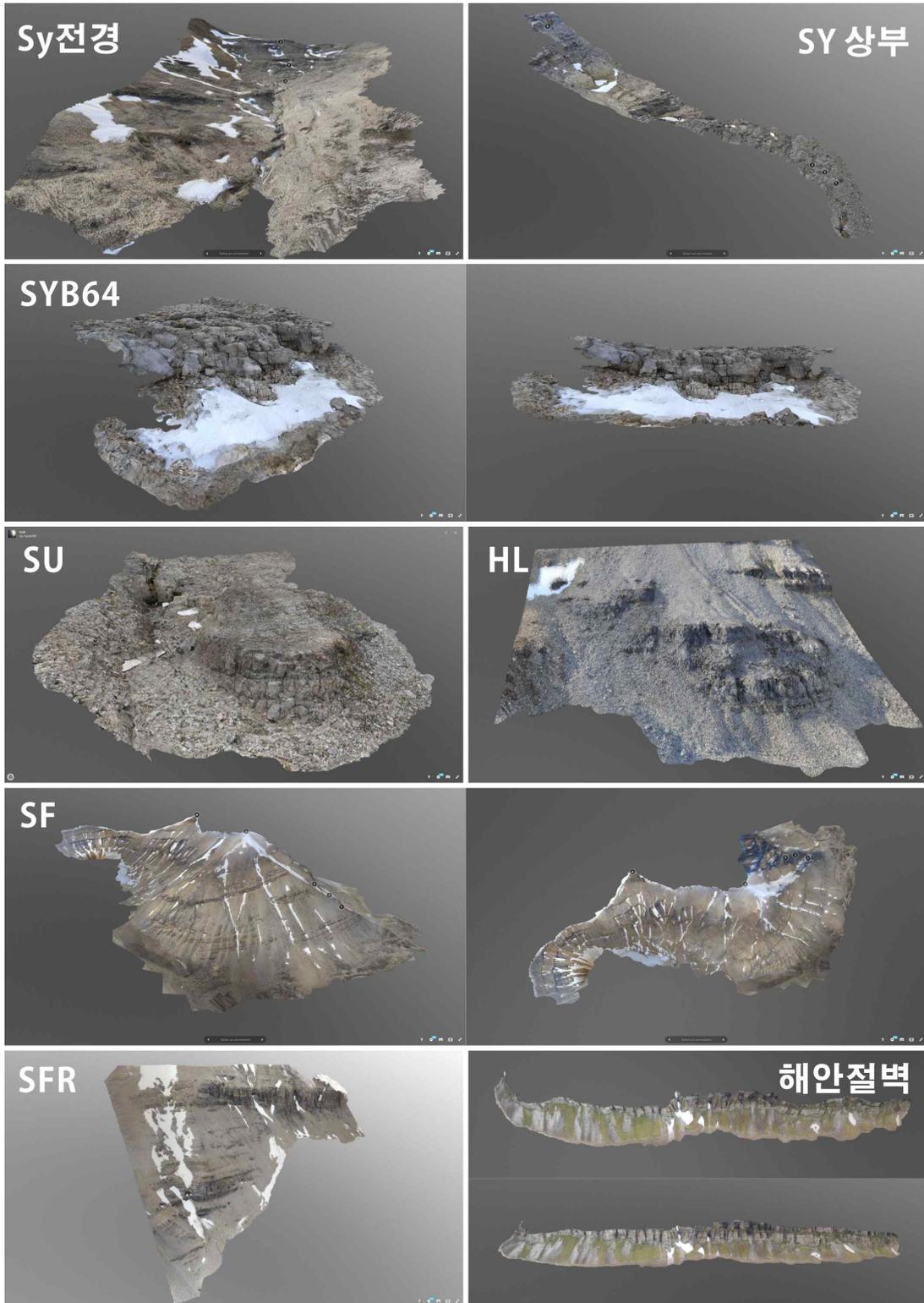


그림 3-15. 조사단면들의 3차원 지형모델



그림 3-16. SY 단면의 3차원지형모델과 그 위에 도시한 주요 지층과 그 경계면

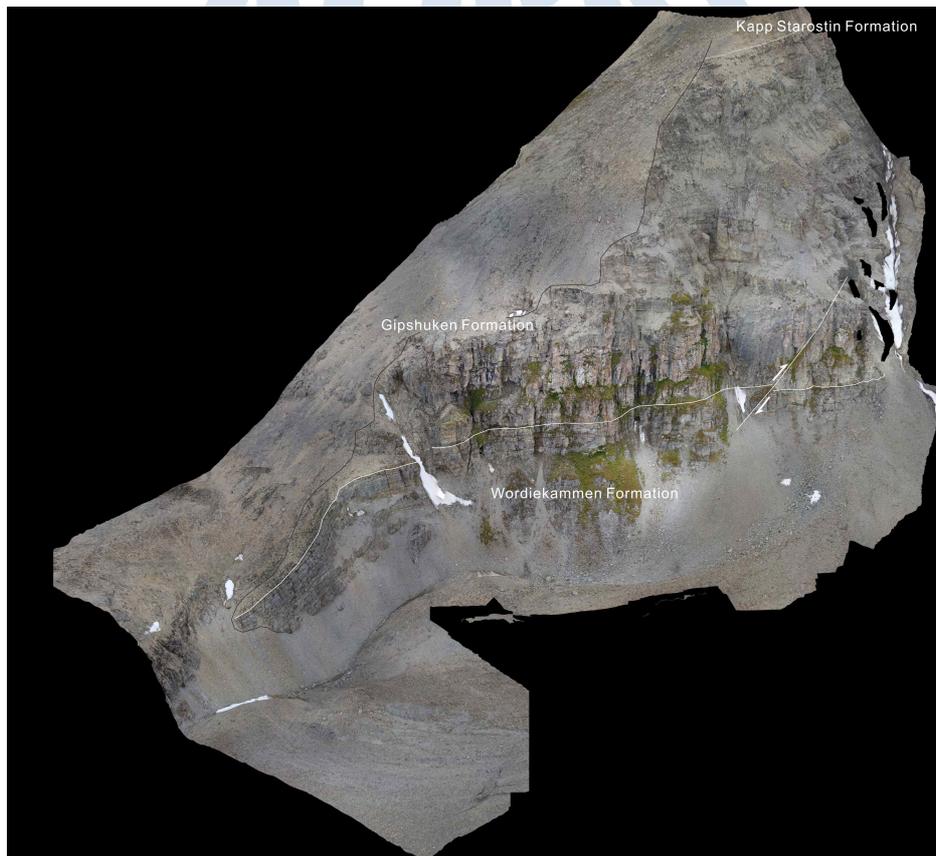


그림 3-17. 브뢰거피예렛 단면에 도시한 층경계와 단층 발달양상. 검은 선은 주상도를 작성한 루트임

(4) 지화학/동위원소 분석을 위한 시료 추가 확보

브뢰거피예렛 단면을 새로 조사함에 따라 기존에 확보하지 못했던 김슈켄층 시료를 획득했다. 평균 3-5 m 간격으로 김슈켄층 전체 두께 약 200 m를 대상으로 확보하였다. 세텔리그피예렛 섹션의 티렐피예렛 멤버에서도 추가 시료를 획득하여, 전체 두께 약 150 m에서 평균 3-5 m 간격으로 시료를 확보하였다. 이를 통해 다산기지 주변 탄산염 퇴적층 전체에 대한 지화학/동위원소 분석을 위한 시료 확보 완료하였다. 이는 전체두께 약 550 m에서 약 150개 시료 확보한 것으로, 시간으로 환산하면 약 3천7백만년 (중기 석탄기-중기 페름기) 기간을 대상으로 시간해상도 약 24만년에 해당하는 시료를 확보한 셈이다. 추가로 다산기지 주변 퇴적체와의 비교연구를 위해 중부 스발바르에 동시대 지층에 대한 자료를 오슬로 자연사 박물관을 통해 획득했다(그림 3-18). 박물관 리모델링과 관련하여 박물관과 외부 건물에 시료들이 흩어져 있었으나 공동연구자인 오슬로 자연사 박물관의 Dr. Hans Nakrem의 도움으로 적절한 시료를 정확히 획득할 수 있었다.



그림 3-18. 오슬로 대학 캠퍼스내에 위치한 오슬로 자연사박물관 전경

3.2 후기고생대 퇴적층의 순차층서 기초연구

3.2.1 퇴적상분석

현장조사 결과를 이용해 다산기지 주변 후기고생대 지층의 퇴적상을 정의하고 퇴적 환경을 해석하였다. 모두 19개의 퇴적상(4개 쇄설성 규산염 퇴적상, 13개 탄산염 퇴적상, 1개 처트 퇴적상)이 구분되었으며, 이의 층서적 발달을 분석해 암상의 반복으로 나타나는 반복층을 인지하였으며 구성하고 있는 퇴적상과, 두께변화를 분석하고 있다(그림 3-19). 각 퇴적상의 특성 그리고 해석은 표 1에 자세히 기재되어있다.

표1. 다산기지 주변 후기고생대 퇴적층의 퇴적상

Siliciclastic facies		
Reddish mudstone (Mr)	Reddish homogeneous mudstone frequently with pedogenic structures	Flood plain
Stratified sandstone (Ss)	Horizontal or cross stratified sandstone; tabular or trough-cross bedded	Fluvial channel-fill
Massive sandstone (Sm)	Sandstone without distinct sedimentary structures; commonly calcareous	Coast
Stratified conglomerate (Cs)	Pebbly conglomerate with planar or trough-cross bedding	Fluvial channel-fill
Carbonate and chert facies		
Calcareous shale (CS)	Homogeneous; greenish gray; thin inter bed between limestone beds	Offshore
Lime mudstone (LM)	Homogeneous; nodular texture in part; gray to black in color	Deep platform or lagoon
Skeletal wackestone (Ws)	Bryozoan, green algae, coral, brachiopods floated in muddy matrix	Lagoon
Skeletal pack-grainstone (P-Gs)	Bryozoan, green algae, coral, brachiopods stacked with certain amounts muddy matrix	Shallow platform
Skeletal grainstone (Gs)	Skeletal fragments without muddy matrix	Shallow platform or bank
Peloidal grainstone (Gp)	Peloidal fragments without muddy matrix	Shallow platform or bank
Breccia (B)	Limestone and dolostone breccia with disorganized fabric; buckled structures in part; sedimentary structures in matrix	Dissolution collapse breccia
Palaeoaplysina boundstone (BOpa)	Buildup made by stacking of Palaeoaplysina; muddy matrix	Shallow marine buildup
Phylloidal alge boundstone (BOph)	Buildup made by stacking of phylloidal algea; typical "pockets" of muddy matrix in the curved surface of the algea	Shallow marine buildup
Coral boundstone (BOco)	Large buildup made of combination of rugose coral and chatetids; low relief multithecopora and aulopora corals	Buildup on the initially flooded platform
Dolomudstone (DM)	Homogeneous light gray dolomudstone with common chert nodules and layers; remnant of original allochems observed in part	Dolomitized limestone
Laminated dolomudstone (DMI)	Finely laminated dolomudstone with common fenestrae willed with sparry cements	Inter- to supratidal microbial laminite
Homogeneous chert (CHh)	Unbedded homogeneous chert; bearing chert nodules with different color	Deep cold platform
Bedded chert (CHb)	Bedded homogeneous chert; thin to medium bedded	Deep cold platform
Microcodium-overprinted facies (-M)	Various carbonate facies with microcodium overprint	Overprint of subaerial exposure



그림 3-19. 조사지역의 석탄기와 페름기 층에서 나타나는 반복층. 백운암에서 석회암 (왼쪽) 이암에서 처트(오른쪽)로의 퇴적상 변화가 반복적으로 나타남.

3.2.2 순차층서 경계면 정의

주상도에 기록된 거시구조와, 현미경관찰을 통한 현미 퇴적상을 바탕으로 주요 순차층서 경계면(그림 3-20, 2차순차층의 육상노출면/해침면)을 인지하고 특성을 기재하였다. 이를 바탕으로 순차층내의 세부 퇴적경계면(그림 3-21, 3-4차 순차층경계) 설정을 하였다. 또한 2차 순차층 내에 존재하는 세부 순차층서면(그림 3-22, 해침면, 해퇴면, 최대해침면 등)을 정의하고 맵핑을 실시하였다.

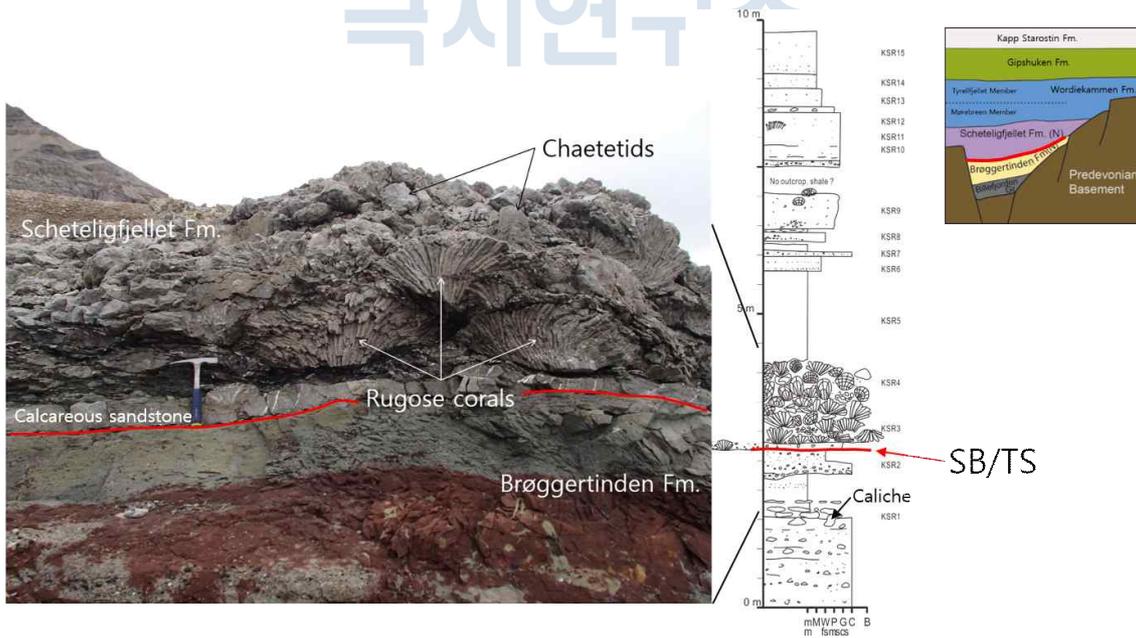


그림 3-20. 후기석탄기(Bashkiran)에 발달하는 2차 순차층의 순차층경계와 해침면. 지역적으로 발달한 육상하도 환경이 상대해수면상승에 의해 얕은 바다환경으로 변화하는 것을 지시함

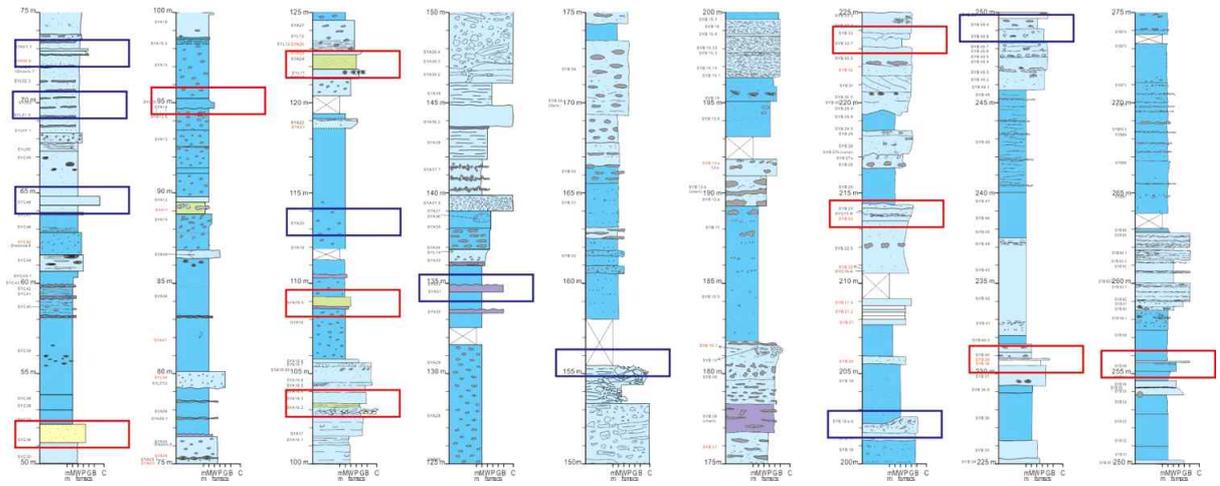


그림 3-21. 세부퇴적경계면 설정 결과. 붉은 구간은 큰 규모의 상대해수면 하강을 지시하는 사암, 각력암, 증발암, 고토양흔적 등이 나타나는 구간이며, 푸른 구간은 보다 부차적인 상대해수면 변동에 의한 구조들이 나타나는 구간임

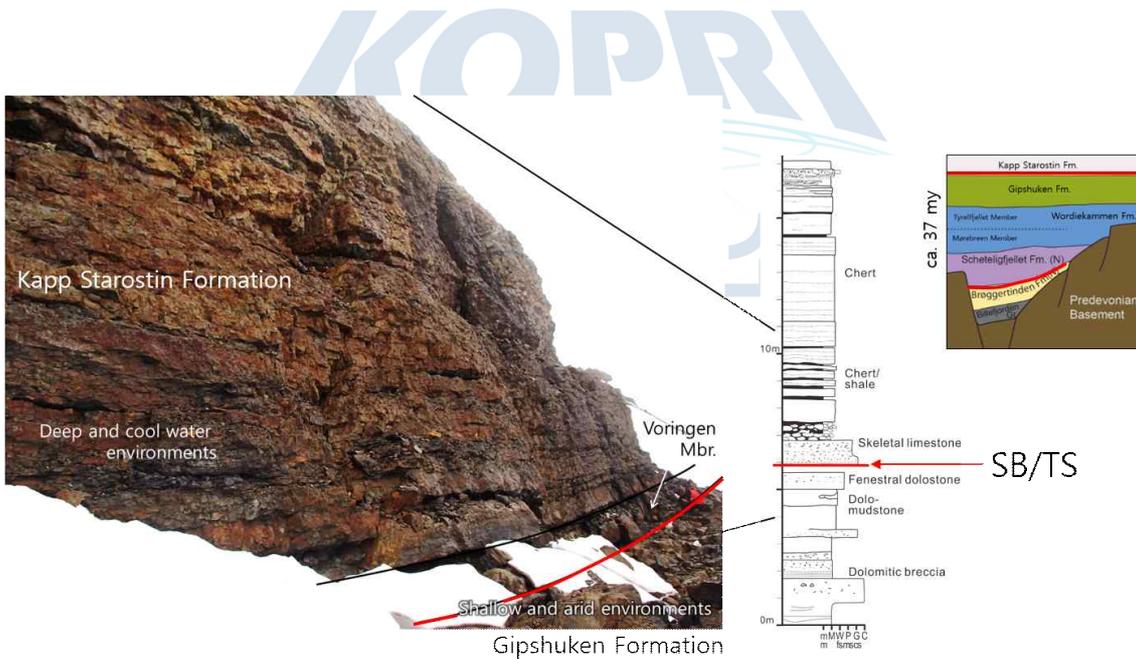


그림 3-22. 전기페름기(Artinskian)에 발달하는 2차순차층경계와 해침면. 상대해수면 상승과 기후변화로 건조한 천해탄산염 환경이 한랭하고 깊은 바다환경으로 변화함을 지시함. 깁슈켄층과 캅스타로스틴층의 경계면에 해당함. 많은 완족류 화석이 발견되는 층이 특징적으로 나타나며, 이는 다른지역의 Voringen 층원과 대비됨.

3.2.3 스발바르 중부 동부 순차층서 경계면과의 대비, 상대해수면변동 복원

다산기지 주변 후기고생대 지층에 대한 상세한 현장조사 자료를 바탕으로 스발바르 다른 지역 더 나아가 그린란드, 캐나다북부 등 동시대 다른 퇴적분지에 대비할 수 있는 층서틀을 마련하였다. 이를 이용해 본과제 연구지역인 다산기지 주변과 중부 스발바르에 나타나는 동시대 암석에 대한 대비를 실시하였다(그림 3-23).

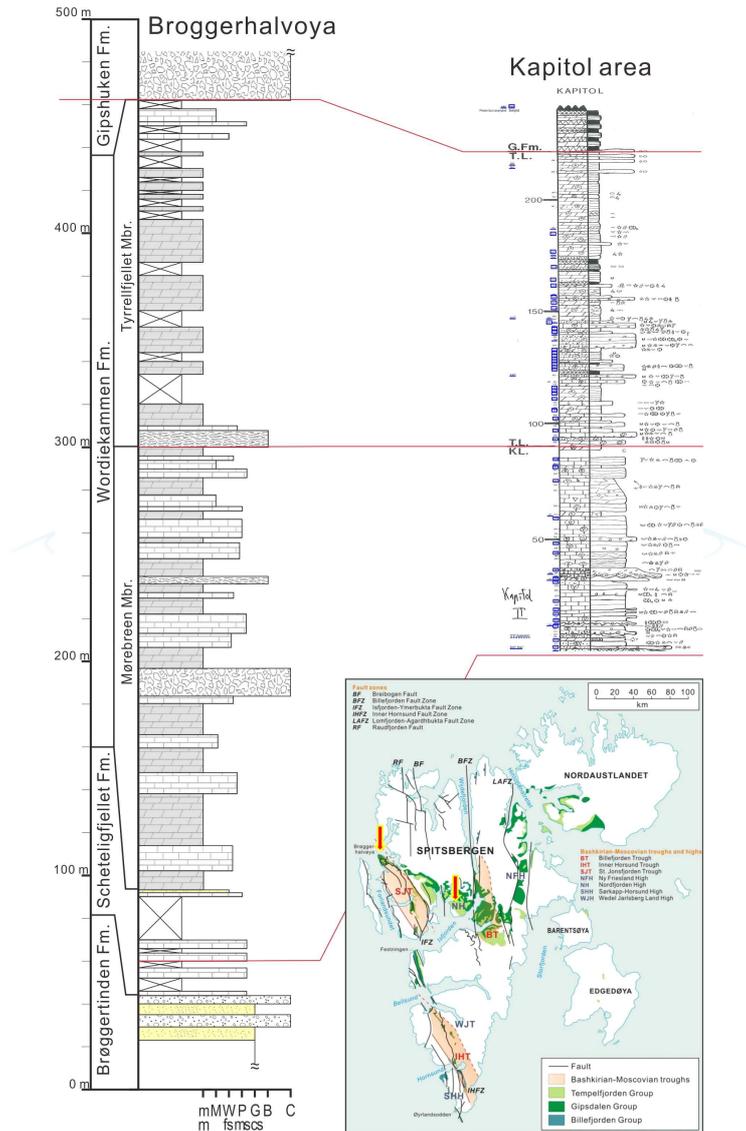


그림 3-23. 두 단면에서 공통으로 나타나는 암층서 층서 경계를 바탕으로 대비함. 이 중 티렐피예렛층원이 하부경계는 fusulinid에 의해 퇴적시간도 대비됨. 또한 다산기지가 포함된 브뢰저반도는 세인트존스피요르드 트러프, 중부스발바르지역은 노르드피요르드 하이에 해당되는 지역이기 때문에 하부층에서의 두께 차이가 심하게 나타남

기존 연구에서 수행한 순차층서경계면 발달과의 상대해수면 복원연구에 의하면, 2단계 순차층발달은 빙하기와 해빙기와 관련된 전지구적 해수면 변동으로 해석된다(Stemmerik, 1997; Frank et al., 2008). 스발바르 후기고생대 퇴적층에서 정의된 작은 규모의 반복층을 이용한 상대해수면 변동곡선은 전지구적인 해수면변동과 차이가 있음이 알려져, 빙하 변동에 의한 해수면변화와 분지 자체의 용기침강이 결합하였음을 지시한다(그림 3-14, Bond et al., 2015). 다산기지 주변의 퇴적층도 이와 비슷한 퇴적사를 가지고 있을 것으로 생각되지만, 기존 연구가 주로 이루어진 스발바르 중부 동부 지역과 어느정도 분리된 퇴적분지이기 때문에 다른 양상을 보일 가능성이 배제할 수 없다.

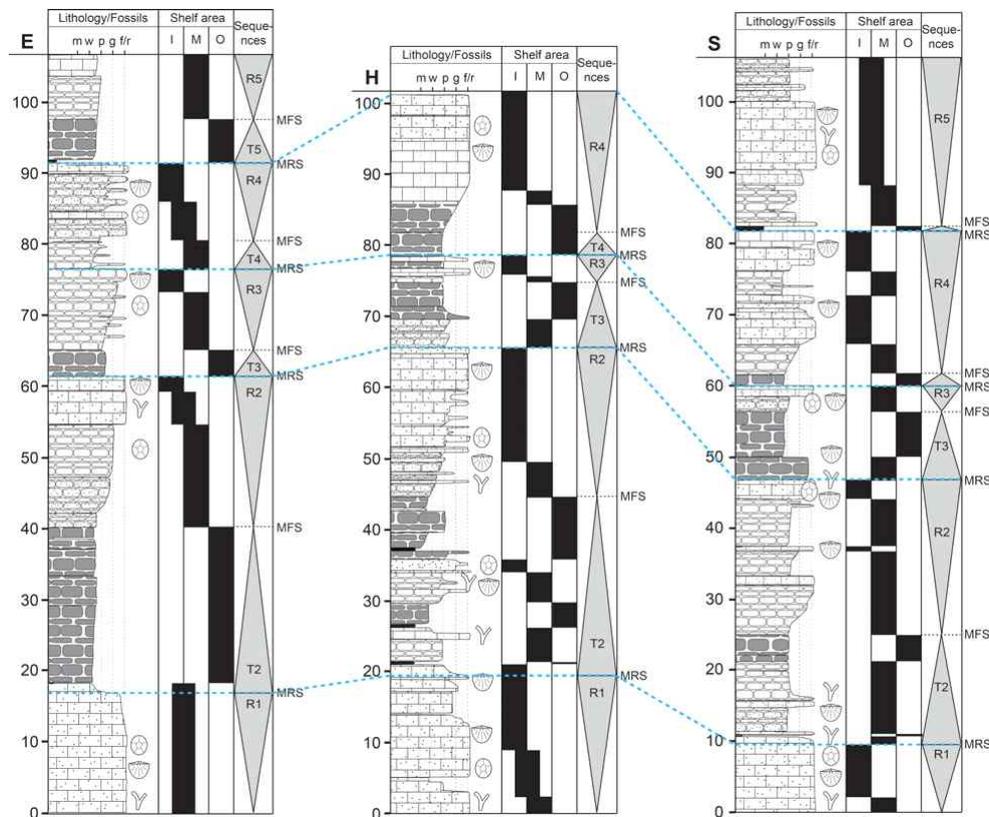


그림 3-24. 스발바르 북동부 페름기 지층에서 인지한 반복층과 순차층서 해석(Bond et al., 2015). 상대해수면 상승이 분지 전체에 걸쳐 인지되는 T2하부 경계는 대규모 빙하의 소멸과 관련된 전지구적인 환경변화로 해석되었지만(Stemmerik, 1997; Frank et al., 2008), 작은 규모의 반복층은 전지구적인 해수면 변동양상(Haq and Schutter, 2008)과 차이가 있어 분지자체의 침강과 용기와 관련이 있는 것으로 해석됨(Bond et al., 2015)

3.3 후기고생대 퇴적층의 지화학/동위원소 분석 기초연구

3.3.1 산소 탄소 동위원소 분석

퇴적상분석을 통해 파악할 수 있는 퇴적환경변화 이외의 환경변화 요소를 파악하기 위해 탄산염암의 탄소, 산소, 황 동위원소 분석을 실시했다. 본 연구를 통해 다산기지 주변의 전체퇴적층 중 변질이 적은 세립질 암석을 선택(총 550 m 구간에서 150 개 시료 분석)하여 산소와 탄소 동위원소 분석을 실시하였다(그림 3-25, 3-26, 표 2). 동위원소 분석은 모두 미국 Northwestern 대학의 IRMS Lab.을 통해 실시하였다. 이를 통해 다산기지 주변 석회암시료에 대해 동위원소를 이용한 층서분석을 최초로 실시하여 퇴적상연구결과와 결합해 빙하기발달 등 전지구적인 환경변화와 퇴적분지와의 상호작용을 연구할 수 있는 기반을 닦았다.

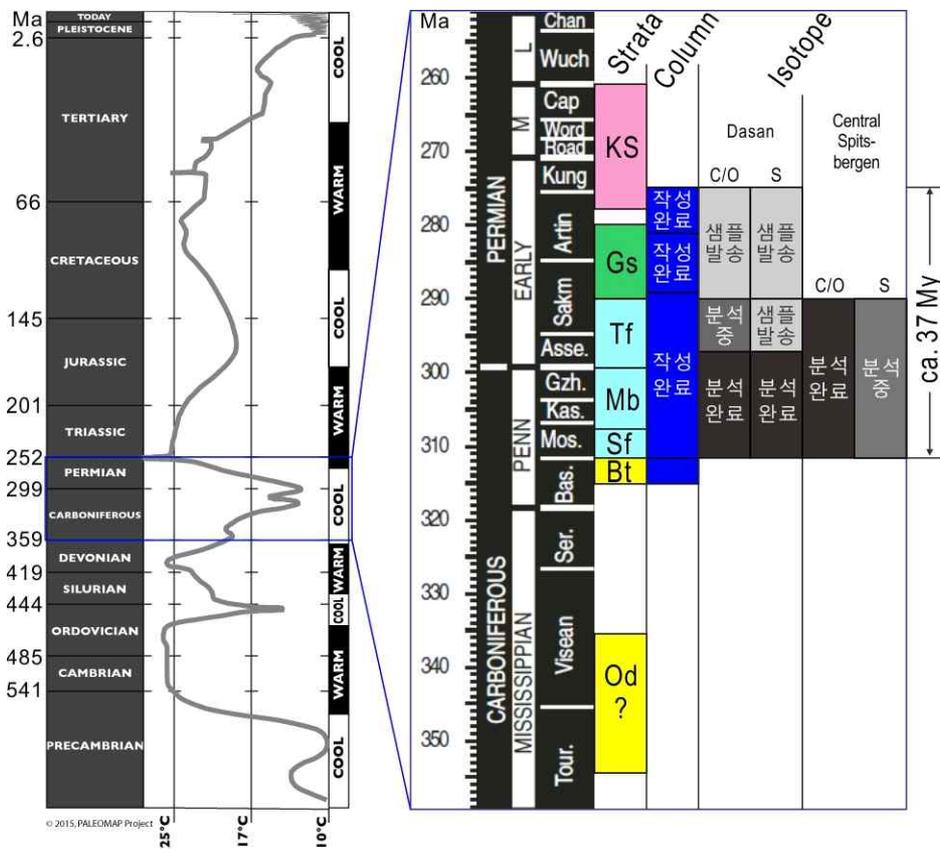


그림 3-25. 퇴적층 시료처리 및 동위원소 분석 현황과 층서대비

표 2. 다산기지 주변 석탄기 석회암 동위원소 분석결과

Analysis	ID1	Date	Time	Wt % CaCO ₃	d13C (VPDB)	d18O (VPDB)
34475	SYA-06	08/13/2017	01:21:25	82.73	3.34	-4.21
34468	SYA-12	08/12/2017	23:31:32	57.02	2.86	-5.09
34473	SYA-15	08/13/2017	00:50:01	85.68	3.97	-6.30
34474	SYA-18	08/13/2017	01:05:43	92.46	2.57	-4.48
34477	SYA-19	08/13/2017	01:52:49	79.45	3.17	-8.68
34478	SYA-19	08/13/2017	02:08:31	31.22	3.04	-9.55
34471	SYA-21	08/13/2017	00:18:37	71.40	1.28	-9.42
34472	SYA-21	08/13/2017	00:34:20	75.36	1.29	-9.38
34467	SYA-28	08/12/2017	23:15:49	85.96	2.07	-5.50
34476	SYA-38	08/13/2017	01:37:07	88.54	3.91	-3.76
34480	SYB-02	08/13/2017	02:39:55	57.56	3.07	-6.51
34499	SYB-05	08/13/2017	07:38:10	82.08	3.48	-6.70
34496	SYB-10-1	08/13/2017	06:51:05	88.08	3.53	-6.59
34498	SYB-11	08/13/2017	07:22:29	70.94	4.09	-4.32
34484	SYB-15-33	08/13/2017	03:42:43	77.39	3.70	-11.07
34487	SYB-19	08/13/2017	04:29:49	65.50	2.96	-5.05
34489	SYB-27A	08/13/2017	05:01:12	52.37	2.00	-3.21
34485	SYB-36	08/13/2017	03:58:25	95.11	4.91	-4.25
34486	SYB-36	08/13/2017	04:14:08	89.57	4.94	-3.81
34492	SYB-40	08/13/2017	05:48:17	50.67	2.32	-4.96
34497	SYB-42	08/13/2017	07:06:47	62.73	4.47	-4.58
34479	SYB-44	08/13/2017	02:24:13	88.40	4.18	-5.33
34495	SYB-47	08/13/2017	06:35:23	86.25	2.83	-5.25
34500	SYB-49	08/13/2017	07:53:53	61.45	2.68	-5.42
34501	SYB-49	08/13/2017	08:09:34	74.56	2.75	-5.61
34483	SYB-51	08/13/2017	03:27:01	79.80	3.73	-8.78
34490	SYB-56	08/13/2017	05:16:55	74.20	4.20	-8.85

34502	SYB-62	08/13/2017	08:25:16	72.54	4.44	-11.99
34488	SYB-77	08/13/2017	04:45:31	47.38	5.56	-7.26
34465	SYC-1	08/12/2017	22:44:25	92.06	-1.44	-7.38
34463	SYC-25	08/12/2017	22:13:01	101.11	1.83	-6.31
34464	SYC-25	08/12/2017	22:28:44	81.20	2.12	-6.14
34466	SYC-34	08/12/2017	23:00:08	59.47	1.96	-7.57
34462	SYC-37	08/12/2017	21:57:20	79.46	2.27	-3.36
34459	SYC-41	08/12/2017	21:10:16	110.16	2.66	-6.25
34460	SYC-49	08/12/2017	21:25:57	94.56	2.06	-11.59
34461	SYC-7	08/12/2017	21:41:38	86.01	-0.06	-6.77

그림 3-26에 다산기지주변 후기고생대 층의 탄소, 산소 동위원소 분석 결과를 주상도와 함께 도시하였다. 탄소동위원소는 전반적으로 가벼운 값에서 무거운 값으로 변화하는 경향을 보인다. 산소동위원소는 동시대 일반적인 값에 비해서 가벼운 쪽으로 치우쳐져 있어 담수의 영향을 받았거나 숙성작용에 의한 변화가 있었을 것으로 생각된다. 동위원소 분석결과와 퇴적상 변화와의 상관관계에 대한 추가 연구가 요구된다. 이를 토대로, 기후, 해수면변동 등 분지 외적인 요소가 퇴적작용에 어떻게 작용하는지 분석할 예정이다.

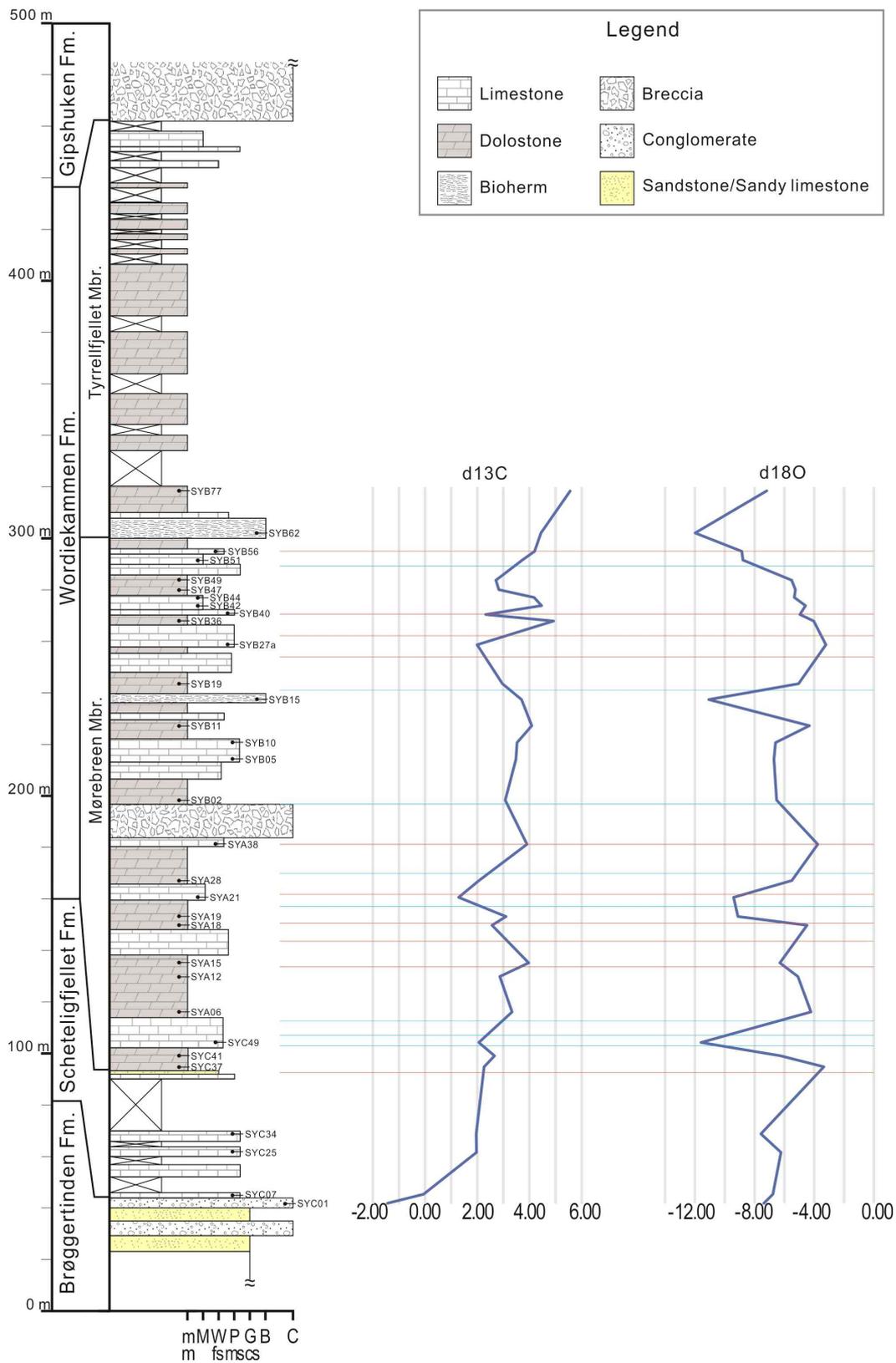


그림 3-26. 다산기지 주변 후기고생대 층의 주상도와 대비한 동위원소 분석 결과. 가로선은 주요 층서 경계면

다산기지 주변 후기고생대 층의 황동위원소 분석은 탄산염시료의 용해와 전처리를 통해 황화물을 침전시킨 후 전체 연구 지역 중 SY단면에 대한 분석을 실시하였다(표 3).

표 3. SY단면의 워디에카멘층 하부에 대한 황 동위원소 분석

Analysis	Identifier 1	Date	Time	d34S (VCDT)
38989	SYA-6	09/14/18	20:14:09	17.99
38990	SYA-6_dup	09/14/18	20:28:40	17.95
38992	SYA-18	09/14/18	20:57:42	16.70
38995	SYA-19	09/14/18	21:41:16	15.15
38996	SYA-28	09/14/18	21:55:47	15.39
38997	SYA-38	09/14/18	22:10:18	15.06
38988	SYB-2	09/14/18	19:59:38	15.46
38980	SYB-5	09/14/18	18:03:26	15.05
38987	SYB-10	09/14/18	19:45:06	15.74
38983	SYB-11	09/14/18	18:47:00	13.93
38986	SYB-15	09/14/18	19:30:35	14.54
38985	SYB-19	09/14/18	19:16:03	12.78
38984	SYB-27	09/14/18	19:01:32	17.14
38979	SYB-31	09/14/18	17:48:55	35.04
38965	SYB-40	09/14/18	14:25:37	14.39
38973	SYB-42	09/14/18	16:21:47	40.07
38974	SYB-44	09/14/18	16:36:18	40.03
38975	SYB-47	09/14/18	16:50:49	12.88
38976	SYB-51	09/14/18	17:05:20	15.74
38968	SYC-1	09/14/18	15:09:11	14.74
38971	SYC-4	09/14/18	15:52:45	15.67
38972	SYC-25	09/14/18	16:07:16	18.74
38967	SYC-34	09/14/18	14:54:40	18.40
38966	SYC-41	09/14/18	14:40:09	16.12
38977	SYC-49	09/14/18	17:19:52	21.11
38978	SYC-49_dup	09/14/18	17:34:23	21.12

3.3.2 오슬로 자연사 박물관 소장 완족 암석 및 완족 동물 시료 기재 및 확보

다산기지 주변 퇴적체와 같은 시기에 형성된 중부 스발바르 퇴적체와의 비교연구를 위해, 2017년 8월 오슬로자연사박물관 방문, 수장고의 후기고생대 암석시료와 화석시료(그림 3-27, Dons, 1982 collection과 Skaug, 1982 collection)를 기재하였으며, 일부 시료를 입수하여 산소, 탄소, 황 동위원소 분석을 실시하였다. 분석을 실시한 시료는 스발바르 중부의 Kapitoll 단면에서 채취된 것이다(그림 3-28). Kapitoll 단면은 워디에카멘 층원과 티렐피예렛 층원이 잘 노출되어있다. 전체 두께 200 m 단면에서 43개 시료를 확보하였다.

또한 전암의 동위원소 분석을 통해 얻은 수치와 비교하기 위해 해당 단면에서 산출된 완족동물시료를 확보하였다.

오슬로 자연사박물관에서 입수한 중부 스피츠베르겐 시료의 전처리 및 동위원소 분석을 실시하였다. 그 결과를 표 4에 기재하였다. 그리고 그 결과를 Kapitól 단면의 주상도와 함께 도시하였다(그림3-29).

표 4. 오슬로자연사박물관을 통해 입수한 중부 스발바르의 위디에카멘층 탄산염 암석의 탄소와 산소 동위원소 분석

Analysis	Identifier 1	Date	Time	<i>d</i> 13C (VPDB)	<i>d</i> 18O (VPDB)
38714	MSS-1	08/09/2018	16:10:34	0.44	-6.68
38782	MSS-2	08/10/18	11:40:18	1.01	-4.79
38783	MSS-3	08/10/18	11:54:24	0.44	-3.59
38784	MSS-4	08/10/18	12:11:09	0.41	-5.46
38785	MSS-5	08/10/18	12:26:20	0.83	-3.48
38722	MSS-6	08/09/2018	18:16:20	1.39	-6.26
38723	MSS-7	08/09/2018	18:31:21	0.72	-4.65
38724	MSS-8	08/09/2018	18:46:23	-0.48	-3.76
38725	MSS-9	08/09/2018	19:00:38	0.28	2.32
38726	MSS-10	08/09/2018	19:15:26	4.41	-4.33
38729	MSS-10_dup	08/09/2018	20:00:31	4.48	-3.42
38730	MSS-11	08/09/2018	20:16:33	2.20	-2.42
38731	MSS-12	08/09/2018	20:31:38	2.81	-0.20
38732	MSS-13	08/09/2018	20:45:47	3.52	-0.71
38733	MSS-14	08/09/2018	21:01:24	3.28	-3.82
38734	MSS-15	08/09/2018	21:16:44	3.90	-3.68
38735	MSS-16	08/09/2018	21:31:47	3.13	-6.45
38736	MSS-17	08/09/2018	21:46:50	2.60	-5.81
38737	MSS-18	08/09/2018	22:01:50	4.13	-6.14
38738	MSS-19	08/09/2018	22:16:52	1.93	-5.97
38741	MSS-20	08/09/2018	23:01:58	-0.99	-6.57
38742	MSS-20_dup	08/09/2018	23:16:59	-0.98	-6.53
38743	MSS-21	08/09/2018	23:32:01	2.04	-3.63
38744	MSS-22	08/09/2018	23:47:03	1.55	-2.52
38788	MSS-23	08/10/18	13:11:26	4.37	-4.86
38746	MSS-24	08/10/2018	00:17:05	3.84	-4.48
38747	MSS-25	08/10/2018	00:32:06	3.27	-7.60
38748	MSS-26	08/10/2018	00:47:08	2.65	-4.29
38749	MSS-27	08/10/2018	01:02:10	3.80	-4.98
38750	MSS-28	08/10/2018	01:17:11	4.30	-10.74
38753	MSS-29	08/10/2018	02:02:16	3.81	-2.63
38754	MSS-30	08/10/2018	02:16:19	4.38	-4.37
38756	MSS-31	08/10/2018	02:46:14	4.48	-4.19
38757	MSS-32	08/10/2018	03:01:14	4.75	-5.26
38786	MSS-33	08/10/18	12:41:22	4.35	-10.20
38759	MSS-34	08/10/2018	03:31:39	4.15	-1.70
38760	MSS-35	08/10/2018	03:47:23	1.90	-3.17
38761	MSS-36	08/10/2018	04:02:27	3.35	-5.40
38762	MSS-37	08/10/2018	04:17:30	3.24	-7.15
38765	MSS-38	08/10/2018	05:02:36	4.31	-3.35
38787	MSS-39	08/10/18	12:56:23	4.10	-4.36

38767	MSS-40	08/10/2018	05:32:40	4.02	-6.68
38768	MSS-40_dup	08/10/2018	05:47:42	3.99	-6.73
38769	MSS-41	08/10/2018	06:02:43	2.54	-8.35
38770	MSS-42	08/10/2018	06:17:45	3.93	-4.24
38771	MSS-43	08/10/2018	06:32:47	4.49	-5.50
38772	MSS-44	08/10/2018	06:47:49	-6.96	-19.82
38773	MSS-45	08/10/2018	07:02:51	-7.61	-21.20
38774	MSS-46	08/10/2018	07:17:52	-10.45	-20.44
38775	MSS-47	08/10/2018	07:32:54	-7.63	-20.19
38776	MSS-48	08/10/2018	07:47:56	-8.91	-20.48

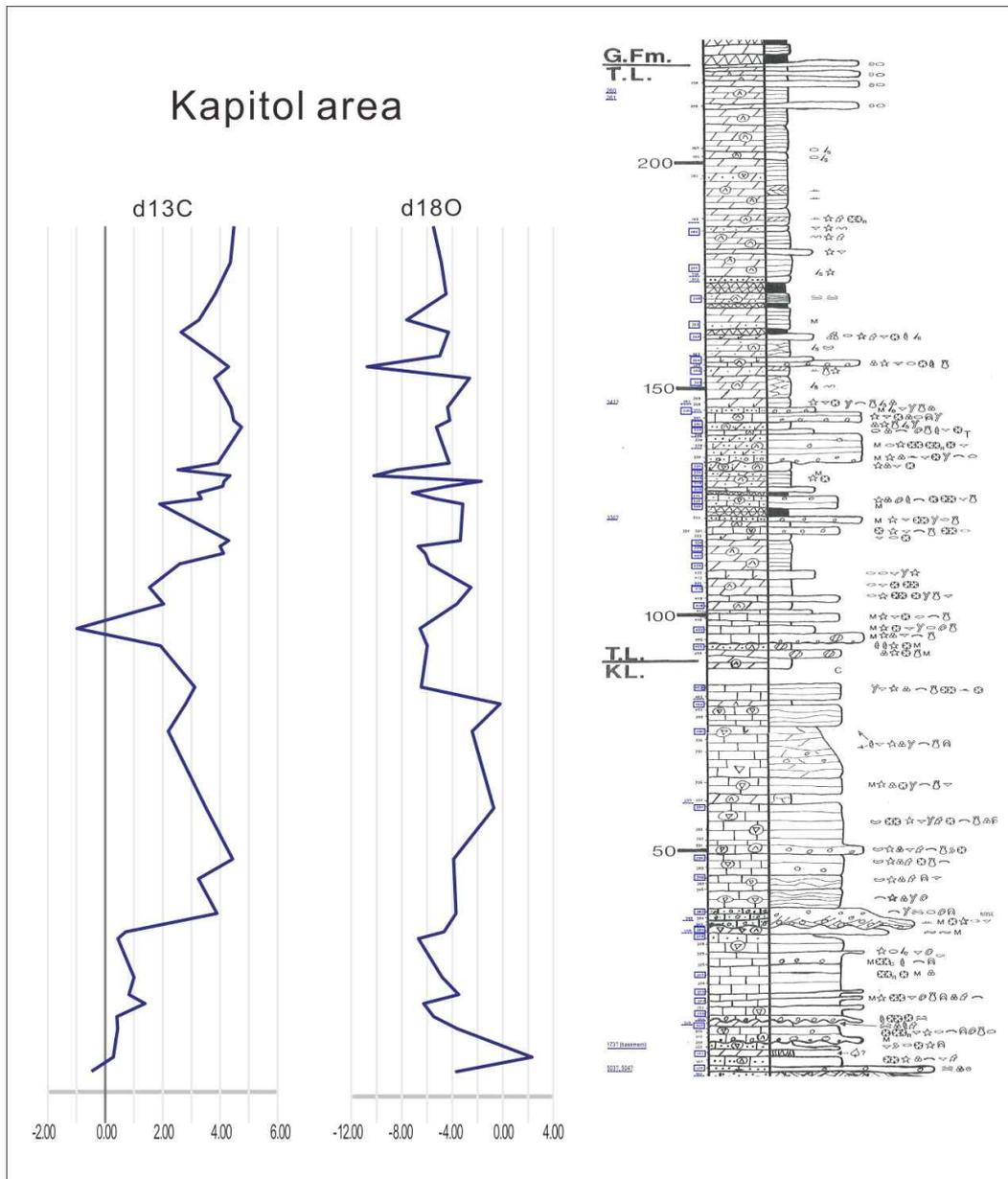


그림 3-29. 오슬로박물관에서 획득한 중부 스발바르(Kapitol)지역의 석탄기-페름기 경계부 층의 산소 탄소 동위원소비 분석결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4.1 연차별 연구개발 목표 및 달성내역

구분	년도	연구개발목표	연구개발내용	연구범위	달성도
1차 년도	2016.12.30. ~ 2017.10.29	○다산기지 현장조사	○퇴적층 현장 조사, 주상도 작성 및 맵핑 ○지화학/동위원소 분석을 위한 시료 확보	현장조사	100%
		○ 후기고생대 퇴적층의 순차층서 기초연구	○퇴적상 분석과 현미퇴적상 분석, 퇴적물 지화학분석 자료를 기반으로한 순차층서 경계면 설정	자료분석	100%
		○ 후기고생대 퇴적층의 지화학/동위원소분석 기초연구	○타겟 동위 원소 선정 ○오슬로자연사 박물관 소장 완족동물 시료 기재	자료분석	100%
2차 년도	2017.10.30. ~ 2018.12.29	○다산기지 현장조사	○퇴적층 추가 현장 조사: 주상도 작성 및 맵핑, 시료채취 ○지화학/동위원소 분석을 위한 시료 추가확보	현장조사	100%
		○ 후기고생대 퇴적층의 순차층서 연구	○스발바르 중부 동부 순차층서 경계면과의 대비, 상대해수면변동 복원	자료분석	100%
		○ 후기고생대 퇴적층의 지화학/동위원소분석	○퇴적암 및 화석시료의 지화학 및 동위원소 분석	시료분석	75% (황동위원소 분석중)
3차 년도	2018.12.30. ~ 2019.12.29	○ 후기고생대 퇴적층의 고환경변화 및 조절요인 규명	○순차층서 연구결과와 동위원소 지시자 분석을 통한 고환경 변화와 조절요인 규명	시료분석 및 종합	100% (2차년도에 조기달성)

4.2 정성적 연구성과의 우수성

□ 다산기지 현장조사

- 다산기지 기반으로한 현장조사에서 시도하기 어려웠던 중부 산악지대에 대한 현장조사 실시하여 다산기지 주변 후기고생대 깃스달렌 층군 전체에 대한 상세주상도를 작성함
- 주요 지질노두에 대한 3차원 지형모델 작성으로 지질조사 결과를 3차원적으로 도시하고 분석할 수 있는, virtual geology 기초자료 확보

□ 후기고생대 퇴적층의 순차층서 연구

- 다산기주변 후기고생대 지층에 대한 상세한 현장조사 자료를 바탕으로 스발바르 다른 지역 더 나아가 그린란드, 캐나다북부 등 동시대 다른 퇴적분지에 대비할 수 있는 층서들 마련

□ 후기고생대 퇴적층의 지화학/동위원소분석

- 다산기지 주변 석회암시료에 대해 동위원소를 이용한 층서분석을 최초로 실시하여 퇴적상연구결과와 결합해 빙하기발달등 전지구적인 환경변화와 퇴적분지와 상호작용을 연구할 수 있는 기반을 닦음. 특히 자료축적이 부족한 석탄기-페름기 경계부에 대한 황동위원소 자료를 확보함

4.3. 정량적 목표 달성도

구분	논문		비고
	SCI(E) 목표 (1저자/공동)	SCI(E) 달성 (1저자/공동)	
1차년도 (2016)	0	0	
2차년도 (2017)	1	0*	* 공동저자 논문 1편 (J. Systematic Paleontology, SCI, minor revision)
3차년도 (2018)	2	0**	** 주저자 논문 1편, 공동저자 논문 1편 PPP (SCI) special issue on Permian environments 에 투고예정
합 계	3		

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구를 통해 얻은 지질시대 빙하기연구 역량으로 후기선캠브리아기 스노우볼 어스 등 유사한 지질시대 빙하기 관련 연구로 연구영역(빙하퇴적체 퇴적작용, 지구화학, 빙하거동 모델링, 고생물학 등)과 연구지역(그린란드, 스발바르 북동부 등)을 확대한 대형과제 기반 구축
- 연구 중 구축한 국외 네트워크를 바탕으로 북극 자원개발 현황 정보 획득에 활용
- 다산기지를 기반으로한 지속적인 지질학 연구와 오슬로 자연사박물관과의 공동연구를 통해 스발바르 및 바렌츠해 지하자원과 관련된 연구진과의 네트워크 유지에 활용
- 북극권 유일한 우리나라 연구기지인 다산기지 주변의 지질에 대한 이해 증진과 이를 통한 북극에 대한 국민관심 고취에 활용

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 오슬로 자연사박물관의 고생물시료 책임자인 Dr. Hans Nakrem과 공동연구차원에서 중부 스발바르 지역에서 채취한 암석시료를 확보함
- 1980년대 석사 박사 학생들의 학위논문 연구과정에서 획득된 시료로, 관련 시료의 기초정보(시료 채취 지점, 층서적 위치, 기본적인 암상)가 잘 남아있음
- 다산기지 주변 퇴적체와의 퇴적상, 동위원소 비교연구를 위해 획득하여 분석함

표 5. 오슬로 자연사박물관을 통해 입수한 암석시료 리스트

Drawer number	sample number	description	#
<i>PALPOL-49-08</i>	379	dolomitic packstone	1
<i>(360-381, +260, 261)</i>	375	micritic limestone	2
	367	dolomitic; brachiopod shells	3
	370	peloidal dolomite	4
	373	peloidal dolomite; skeletal	5
	372	micritic limestone	6
	381	peloidal dolomite; with clasts	7
	360	micritic pedogenic limestone; with siliciclastic conglomerates	8
	362	dark limestone nodule?; with reddish soils	9
<i>PALPOL-49-09</i>	390	peloidal limestone	10
<i>(382-404)</i>	400	micritic limestone	11
	402	fine-grained dolomite	12
	394	peloidal	13
	388	skeletal grainstone (fine grained)	14
	385	grainy dolomite	15
	403B	crystalline dolomite; coarse crystalline	16
<i>PALPOL-49-10</i>	424	dolo-mudstone	17
<i>(405-425, 305-310)</i>	425	dolo-mudstone; with chert	18
	405	dolo-mudstone; clasts	19
	407	dolomite; coarse-grained	20
	418	dolomite; multithecopora?	21

	420	dark limestone with fusulinids	22
	307	dolo-mudstone	23
	310	laminated fenestral dolomite	24

PALPOL-49-11	311	dolomite; sandy?	25
(311-334)	312	dolomite	26
	314	dolomite	27
	316	dolo-mudstone	28
	317	peloidal limestone	29
	320	lime mudstone	30
	321	grainy dolomite	31
	322	grainy dolomite	32
	323	grainy dolomite	33
	324	dolo-mudstone	34
	328	dolo-wackestone	35
	327	grainy dolomite	36
	326	dolo-grainstone	37
	334	dolo-mudstone	38
	325	dolo-wackestone	39

PALPOL-49-12	335	dolo-mudstone	40
(335-342, 278-284, 501-504)	336	peloidal dolomite	41
	337	peloidal dolomite	42
	284	dolo-mudstone	43

표 6. 오슬로 자연사박물관을 통해 입수한 화석 시료 리스트

No.	Taxon	Group
JS1	<i>Paramarginifera clarkei</i> (Tschernysvhw, 1902)	Productide brachiopod
JS2	<i>Reticulati</i> sp.	Productide brachiopod
JS3	<i>Reticulati</i> sp.	Productide brachiopod
JS3-1 to 3-4	<i>Paramarginifera clarkei</i> (Tschernysvhw, 1902)	Productide brachiopod
JS4	<i>Paramarginifera clarkei</i> (Tschernysvhw, 1902)	Productide brachiopod
JS5	<i>Paramarginifera clarkei</i> (Tschernysvhw, 1902)	Productide brachiopod
JS6	<i>Marginifera</i> ? sp.	Productide brachiopod
JS7	<i>Marginifera</i> ? sp.	Productide brachiopod
JS8	<i>Chaoiella</i> ? sp.	Productide brachiopod
JS9	Linoproductidae indet. gen. & sp.	Productide brachiopod

JS10	<i>Chaoiella?</i> sp.	Productide brachiopod
JS11	<i>Chaoiella?</i> sp.	Productide brachiopod
JS12	Martinoidea indet. fam. gen. & sp.	Spiriferide brachiopod
JS13	<i>Schuchertella</i> sp.	Productide brachiopod
JS14	<i>Canocrinella?</i> sp.	Productide brachiopod
JS15	<i>Canocrinella?</i> sp.	Productide brachiopod
JS16	<i>Juresani</i> sp.	Productide brachiopod
JS17	<i>Juresani</i> sp.	Productide brachiopod
JS18	Martinoidea indet. fam. gen. & sp.	Spiriferide brachiopod
JS19	<i>Septacamerakutorgae</i> (Tchernyschew,1902)	Rhynchonellide brachiopod
JS20	<i>Septacamerakutorgae</i> (Tchernyschew,1902)	Rhynchonellide brachiopod
JS21	Rock sample	
JS22	<i>Marginifera?</i> sp.	Productide brachiopod
JS23	<i>Canocrinella?</i> sp.	Productide brachiopod
JS24	<i>Chaoiella?</i> sp.	Productide brachiopod
JS25	<i>Brachythyris?</i> sp.	Spiriferide brachiopod

Kolosseum section (M.Skaug)

<i>Sample number</i>	horizons	<i>drawer number</i>	note
JS1	MS80-190	POL 55-12	<i>Fossil with rock</i>
JS2	MS80-190	POL 55-13	<i>Fossil with rock</i>
JS3	MS80-176	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS3-1	MS80-176	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS3-2	MS80-176	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS3-3	MS80-176	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS3-4	MS80-176	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS4	MS80-185	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS5	MS80-185	POL 55-11	<i>Fossil with rock</i>
JS6	MS80-186	POL 55-18	<i>Fossil with rock</i>
JS7	MS80-186	POL 55-18	<i>Fossil with rock</i>
JS8	MS80-179	POL 55-16	<i>Fossil with rock</i>
JS9	MS80-179	POL 55-16	<i>Fossil with rock</i>
JS10	MS80-197	POL 55-16	<i>Fossil with rock</i>
JS11	MS80-197	POL 55-16	<i>Fossil with rock</i>

Skansen section (M.Skaug)

<i>Sample number</i>	horizons	<i>drawer number</i>	note
JS12	T5 18.7-19.2	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>

JS12-1	T5 18.7-19.2	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS12-2	T5 18.7-19.2	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS13	T5 17.5-18.7	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS13-1	T5 17.5-18.7	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS13-2	T5 17.5-18.7	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS13-3	T5 17.5-18.7	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS14	T5 11.0-11.7	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS14-1	T5 11.0-11.7	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS15	T5 -0.9-0.0	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS15-1	T5 -0.9-0.0	POL 38-07	<i>Fossil with rock</i>
JS16	TG2 117	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS16-1	TG2 117	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS17	TG2 115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS17-1	TG2 115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS17-2	TG2 115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS17-3	TG2 115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS17-4	TG2 115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS18	TG2 113-115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS18-1	TG2 113-115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS18-2	TG2 113-115	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS19	TG2 66-68	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS19-1	TG2 66-68	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS19-2	TG2 66-68	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS20	T1 4.8-5.5	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS20-1	T1 4.8-5.5	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS20-2	T1 4.8-5.5	POL 50-14	<i>Fossil with rock</i>
JS21	TG2 32.7	POL 50-13	<i>rock sample</i>
JS22	TG2 30.3-32.9	POL 50-13	<i>Fossil with rock</i>
JS23	TG2 14.5-15.0	POL 50-13	<i>Fossil with rock</i>
JS23-1	TG2 14.5-15.0	POL 50-13	<i>Fossil with rock</i>
JS23-2	TG2 14.5-15.0	POL 50-13	<i>rock sample (do not use shells in this sample)</i>

Trollfuglfjella section (M.Skaug)

<i>Sample number</i>	<i>horizons</i>	<i>drawer number</i>	<i>note</i>
JS24	MS80-132	POL 38-08	<i>for calibration; Museum number A38430</i>

JS25	MS80-132	POL 38-08	<i>for calibration</i>
JS25-1	MS80-132	POL 38-08	<i>for calibration</i>



제 7 장 참고문헌

- Andrey Zhuravlev Rachel Wood, 2008, Eve of biomineralization: Controls on skeletal mineralogy, *Geology* 36 (12)
- Beauchamp, M.R., Bray, S.R., Eys, M.A., Carron, A.V., 2002. Role ambiguity, role efficacy, and role performance: Multidimensional and mediational relationships within interdependent sport teams. *Group Dynamics, Theory, Research, and Practice*, 6, 229-242.
- Blakey, 2019, Deep Time Maps™ 2019, <https://deeptimemaps.com/>
- Bond, D. P. G., Wignall, P. B., Joachimski, M. M., Sun, Y.-D., Savov, I., Grasby, S. E., Beauchamp, B., Blomeier, D. P. G. 2015. An abrupt extinction in the Middle Permian (Capitanian) of the Boreal Realm (Spitsbergen) and its link to anoxia and acidification. *Geological Society of America Bulletin* 127, 1411-1421.
- Buggisch, Werner & Joachimski, Michael & H, L?tzner & F, Thiedig & H?neke, Heiko., 2001, Conodont Stratigraphy of the Carboniferous and Permian Strata from Broggerhalvoya and the Billefjorden Trough. *Geologisches Jahrbuch*. 91. 637-689.
- Frank, Tracy & Birgenheier, Lauren & Monta?ez, Isabel & Fielding, Christopher & Rygel, Michael, 2008, Late Paleozoic climate dynamics revealed by comparison of ice-proximal stratigraphic and ice-distal isotopic records. 10.1130/2008.2441(23).
- Hammarlund, E.U., Tais W. Dahl, David A.T. Harper, David P.G. Bond, Arne T. Nielsen, Christian J. Bjerrum, Niels H. Schovsbo, Hans P. Sch?nlaub, Jan A. Zalasiewicz, Donald E. Canfield, 2012, A sulfidic driver for the end-Ordovician mass extinction *Earth and Planetary Science Letters* 331-332, 128-139
- Holland, H.D., 2006, The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2006 Jun 29;361(1470):903-15.
- Isabel P. Monta?ez and Christopher J. Poulsen, 2013, The Late Paleozoic Ice Age: An Evolving Paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 41:629-656
- J.B. Murphy, J.D. Keppie, R.D. Nance, J. Dostal, 2009, Comparative evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: a North America perspective, *Gondwana Research* 17, 482-499
- Kampschultea, A., H. Straussb, 2004, The sulfur isotopic evolution of Phanerozoic seawater based on the analysis of structurally substituted sulfate in carbonates, *Chemical Geology* 204, 255- 286.

- Ludwig, P., 1991, The marine transgression in the Middle Carboniferous of Brøggerhalvøya (Svalbard). *Polar Research* 9: 65-76.
- Paul F. Hoffman,* Alan J. Kaufman, Galen P. Halverson, Daniel P. Schrag, 1998, A Neoproterozoic Snowball Earth, *Science* 281, 1342
- Saalmann, K., Thiedig, F., 2002, Thrust tectonics on Brøggerhalvøya and its relationship to the Tertiary West Spitsbergen Fold and Thrust Belt. *Geological Magazine* 139(1):47-72
- Shi, G.R., Waterhouse, J.B., 2010, Late Palaeozoic global changes affecting high-latitude environments and biotas: An introduction. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 298(1-2):1-16
- Stemmerik, L., 1997. Permian (Artinskian-Kazanian) cool water carbonates in North Greenland and the western Barents Sea. In: James, N.P., Clark, J. (Eds.), *Cool-water Carbonates*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 56, 349-364.
- Synnøve Elvevold, Winfried Dallmann, Dierk Blomeier Techn. editor: Synnøve Elvevold
Design/layout: Audun Igesund Printed: Januar 2007 by Grafisk Nord AS ISBN:
978-82-7666-237-5

KOPRI
극지연구소

첨 부 2

창의연구사업 최종 결과보고서 평가의견

창의연구사업 구분	Seed형 선행과제		
과제명	북극다산기지 주변 후기고생대 빙하기 (LPIA) 퇴적체에 기록된 고환경변화와 조절요인 (계정번호: PE16520, PE17520)	연구기간	2016. 12. 30 - 2018. 10. 29 (2년)
연구책임자	우주선	연구비(직접비)	200,000 천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> 3억년전 다산기지 주변 고환경변화 추적과 조절요인(빙하의 증감, 전지구적 해수면 변동, 지체구조운동)규명 <ul style="list-style-type: none"> 1차년도 목표: 다산기지현장 조사를 통한 분석시료 확보 2차년도 목표: 후기고생대 퇴적층의 순차층서학적 연구 및 퇴적암, 화석 시료의 화학 분석 3차년도 목표: 순차층서연구결과와 동위원소 지시자 분석을 통한 고환경 변화와 조절요인 규명 <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> 다산기지 주변 후기고생대 김스달렌 층군 전체의 상세주상도를 작성함 주요 지질노두에 대한 3차원 지형모델 작성, virtual geology 기초자료 확보 후기고생대 퇴적층의 순차층서 연구로 퇴적층 발달의 조절요인(해수면변동-빙하의 증감)연구 스발바르 외 그린란드, 캐나다북부 등 동시대 다른 퇴적분지에 대비할 수 있는 층서틀 마련 다산기지 주변 석회암시료에 대해 동위원소를 이용한 층서분석을 최초로 실시 자료축적이 부족한 석탄기-페름기 경계부에 대한 황동위원소 자료를 확보함 <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> 유사한 지질시대 빙하기 관련 연구로 연구영역(빙하퇴적체 퇴적작용, 지구화학, 빙하거동 모델링, 고생물학 등)과 연구지역(그린란드, 스발바르 북동부 등)을 확대한 대형과제 기반 구축 연구 중 구축한 국외 네트워크를 북극 자원개발 현황 정보 획득에 활용 북극권 유일한 우리나라 연구기지인 다산기지 주변의 지질에 대한 이해 증진과 이를 통한 북극에 대한 국민관심 고취에 활용 <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
	평가의견	반영사항	비고
	○ 기존 연구성과를 정리하여 향후 활용 가능한 분야 및 파급효과를 상세히 기술 필요	○ 과제보고서에 기존연구성과를 정리하였으며, 활용분야와 파급효과를 보고서 5장에 정리함	○ 연구 보고서 p.34 참조
	○ 확보된 시료의 향후 활용방안이나 최종목표 달성을 위한 연계연구 수행 방법 제시 필요	○ 과제에서 확보한 시료는 모두 극지연구소 암석보관실에 수장되어 있으며, 보관실 데이터베이스 업데이트 일정에 따라 공개되어, 연구소에서 정한 절차에 따라 시료기반 후속연구가 가능함	○ 연구 보고서 p.35-39 참고
	○ 연차별로 진행한 내용에 대한 구체적 성과 기술이 필요하며, 당초 3년 수행 계획 내용을 2년만에 종료한데에 대한 달성도를 명확히 기술 필요	○ 연차별로 수행한 현장조사 결과를 정리하여 제공하였음 ○ 연차별로 수행한 주상도 작성, 시료채취, 동위원소 분석현황을 도표로 제시함 ○ 당초 3개년 목표를 2개년도에 달성한 정도를 표로 제시함	○ 연구 보고서 p.7-14 ○ p.25 ○ p.33

주 의

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

