

북그린란드 고생대 동물 초기진화와
원시지구환경 규명

Early animal evolution and
the primitive Earth system of north Greenland

극지연구소

2019. 12.

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 12.

연구책임자 : 박태운

참여연구원 : 최문영, 이유경, 우주선

: 이종익, 진영근, 홍종국

: 최한구, 이미정, 서태건

: 박창근, 이원영, 조현준

: 정지웅, 김보미, 박하동

: 이미리내, 이상봉, 김지훈

: 안인혜, 오재룡, Arne T. Nielsen

: Jakob Vinther, Morten L. Nielsen

위탁연구기관명 : 한국지질자원연구원

위탁연구책임자 : 진 재 화

보고서 초록

과제관리번호	PE19160	해당단계 연구기간	2017.04.10. ~2019.12.31	단계 구분	1단계 / 총 3단계
연구사업명	중 사업명	주요사업(기관목적사업)			
	세부사업명				
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	북그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명			
연구책임자	박태윤	해당단계 참여연구원수	총 : 24 명 내부 : 15 명 외부 : 9 명	해당단계 연구비	정부: 2,462,283 천원 기업: 천원 계: 2,462,283 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 지구시스템연구부	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
위 탁 연 구	연구기관명 : 한국지질자원연구원 연구책임자 : 진재화				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	119
<p>○ 북그린란드 현장조사를 통해 얻은 샘플을 바탕으로 지구상 최초로 등장한 동물들의 초기 진화 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> - 머리 신경이 보존된 원시절지동물 화석을 통한 초기 형태진화 양상 파악 - 초기 범절지동물(panarthropod)화석을 통한 최초 절지동물 형태 연구 - 캄브리아기 무척추동물의 초기 형태진화 양상 파악 - 신종 원시 후구동물 화석을 통한 후구동물의 초기 진화 규명 <p>○ 초기 동물들의 내부 형태 구조 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 광물화된 초기 동물 내부구조의 EPMA 원소 맵핑을 통한 형태 분석 - Micro CT를 이용하여 광물화된 내부구조의 3차원적 복원 방법 정립 <p>○ 현생 무척추동물 및 다른 지역의 초기 동물 화석과 형태 비교</p> <ul style="list-style-type: none"> - 비교연구를 위한 현생 무척추동물의 형태 및 발생 연구 - 초기 동물군의 비교 연구를 위한 다른 지역 초기 동물 화석 데이터 획득 <p>○ 최초 동물 등장의 배경이 된 원시지구환경 진화 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> - 시생대 기반암 연구를 통한 초기 지구시스템 복원 - 시생대 이후의 그린란드 지체구조 및 분지 진화 재구성 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	그린란드, 동물 초기 진화, 전자현미분석, 미세단층촬영, 현생 무척추동물, 원시지구 환경			
	영 어	Greenland, Early animal evolution, EPMA, Micro CT, Extant invertebrate, Primitive Earth environment			

요 약 문

I. 제 목

- 북그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 그린란드의 고생대 화석 연구 및 지체구조 진화 연구를 통해 캄브리아기에 처음으로 등장한 지구상 최초 동물들의 형태진화 양상과 그 배경이 된 원시지구 환경 진화를 규명

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북그린란드 현장조사를 통해 얻은 샘플을 바탕으로 지구상 최초로 등장한 동물들의 초기 진화 규명
- 초기 동물들의 내부 형태 구조 분석
- 현생 무척추동물 및 다른 지역의 초기 동물 화석과 형태 비교
- 최초 동물 등장의 배경이 된 원시지구환경 진화 규명

IV. 연구개발결과

- 북극 미답지의 새로운 연구지역 개척
- 초기동물진화의 세계적 선도적 연구기관 도약
- 세계 최초로 EPMA를 활용하여 고생물학 연구의 새로운 지평을 열었음
- 현생 동물과의 형태 비교 연구 노하우 구축
- 남서그린란드의 세계에서 가장 오래된 시생대 암석(38억년) 분석

V. 연구개발결과의 활용계획

- 북극 현장조사 노하우 확립을 통한 미답지 연구 거점 구축
- 구축된 데이터를 바탕으로 초기동물 형태 진화 NSC급 논문 게재
- EPMA를 활용한 고생물학 연구의 다변화 선도
- 극지연구 대국민 홍보

S U M M A R Y

I. Title

- Early animal evolution and the primitive Earth system of north Greenland

II. Purpose and Necessity of R&D

- Elucidating the evolutionary aspect of early animals of the Cambrian and the primitive Earth system development, based on the geological data of Greenland

III. Contents and Extent of R&D

- Elucidating the evolution of early animals on the basis of the samples obtained from north Greenland
- Analysing the internal structure of early animals
- Morphological comparison with extant invertebrates and the early animal fossils of other areas
- Elucidating the development of primitive Earth environment, which set the stage for animal evolution

IV. R&D Results

- Expansion into new research areas in unexplored Arctic Greenland
- Advancement as a leading institute in the field of early animal evolution
- Inventing a novel technology of using EPMA for paleontology
- Acquiring knowhow of morphological comparison with extant animals
- Analysis of the Archaean rock (ca. 3.8 Ga)

V. Application Plans of R&D Results

- Establishing a research spot in an unexplored area of the Arctic
- Publishing NCS-level research results, based on the collected data
- Leading the frontier of paleontological research method using EPMA
- Public advertisement of polar research

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	7
Chapter 2 Previous studies	11
Chapter 3 Results	17
Chapter 4 Achievements against plan	113
Chapter 5 Utilization plan	116
Chapter 6 Scientific information acquired from other countries	117
Chapter 7 References	118



목 차

제 1 장 서론	7
제 2 장 국내외 기술개발 현황	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	17
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	113
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	116
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	117
제 7 장 참고문헌	118



제 1 장 서론

1.1. 연구개발 목적 및 필요성

북극권에서 가장 고위도의 육상지역인 북그린란드 지역은 북극점에서 불과 800 km 정도밖에 떨어지지 않은 곳이다(그림 1). Sirius Passet 화석산지는 북그린란드의 중심부에 위치하고 있으며, 아직 원인이 잘 알려지지 않은 특이한 기후로 인하여 여름동안에는 영상 15도 이상 오르는 온화한 기온을 보이기에 여름 동안 현장조사가 가능하다. 지구 역사상 캄브리아기에 최초로 등장했던 동물들의 화석이 나오는 Sirius Passet 화석 산지는 1984년 북그린란드 최초의 지질도 작성 당시에 우연히 발견되었으며, 이 후, 1989, 1991, 1994 년에 영국, 스웨덴 주도의 고생물학 현장조사가 있었다. 이 후, 2009년 2011년에 덴마크 자연사박물관의 고생물학 현장조사 이후에 비용적인 문제로 더 이상 현장조사가 이루어지지 않고 있는 실정이었다. 하지만, 2016년 최초의 극지연구소 주도 현장조사가 이루어진 이후에, 2017년, 2018년에 걸쳐서 본 과를 통한 현장조사를 통해 현재까지 총 2톤의 화석을 채취하여 극지연구소에서 연구 중에 있다.



그림 1. 그린란드를 중심으로 하는 북극권의 구글맵지도. 본 과제의 연구 대상지역은 Sirius Passet이 사각별로 표시됨.

우리가 알고 있는 동물들은 약 5억 4천만 년 전 캄브리아기의 시작과 함께 갑작스럽게 지구상에 등장하여 비교적 짧은 시간동안 폭발적으로 진화하여 약 5억 2천만 년 전에는 이미 복잡한 먹이사슬을 형성하였다. 이 미스테리한 현상은 “캄브리아기 대폭발(Cambrian Explosion)” 이라고 불리며 고생물학자 및 진화생물학자들 뿐 아니라 대중들에게도 큰 호기심을 불러일으킨다.

동물의 몸체에서는 일반적으로 돌처럼 딱딱한 부분만이 화석으로 남는다. 척추동물의 몸체에서는 딱딱한 뼈가, 조개와 같은 연체동물 중에서는 딱딱한 껍질 이 된다는 일반적으로 생물의 몸체 중 화석으로 남는 부분은 뼈나 조개껍데기와 같이 돌처럼 딱딱한 부분이다. 나머지 부드러운 근육, 신경, 내장 등은 화석으로 남기 전에 썩어서 없어지기 때문에 일반적으로는 화석으로 남는 것이 불가능 하다. 게다가 화석이 될 수 있는 딱딱한 부분을 몸에 가지고 있는 동물은 전체 동물 종의 13% 정도에 불과하기에, 일반적인 퇴적암에서 볼 수 있는 화석은 당시 살던 동물들 중 극히 일부에 지나지 않는다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 극히 드물게, 동물들의 부드러운 부분이 화석으로 남아있는 화석산지가 있다. 가장 대표적인 캄브리아기의 화석산지로는 캐나다의 Burgess Shale, 중국의 Chengjiang biota, 그리고 호주의 Emu Bay Shale이 있다. 북그린란드의 Sirius Passet 화석산지는 이들 화석산지에 비해 덜 연구된 채로 남아있고, 또한 다른 화석산지와 비교해서 생태계를 구성하고 있는 동물그룹이 특수한 경향이 있기에, 세계적인 연구 결과를 창출할 수 있는 연구 주제들이 많이 남아있는 곳이다.

본 과제에서는 북그린란드 Sirius Passet 화석산지의 초기동물 화석 연구를 통하여 초기동물진화 연구의 기반을 구축하고, 그린란드에서 산출되는 시생대 및 북그린란드 최초의 detrital zircon 분석을 통하여 시생대 이후의 그린란드 지역 환경 변화를 유추하여 초기동물 등장까지의 환경 변화 양상을 알아보는 것을 목표로 하였다.

1.2. 연구개발 내용 및 범위

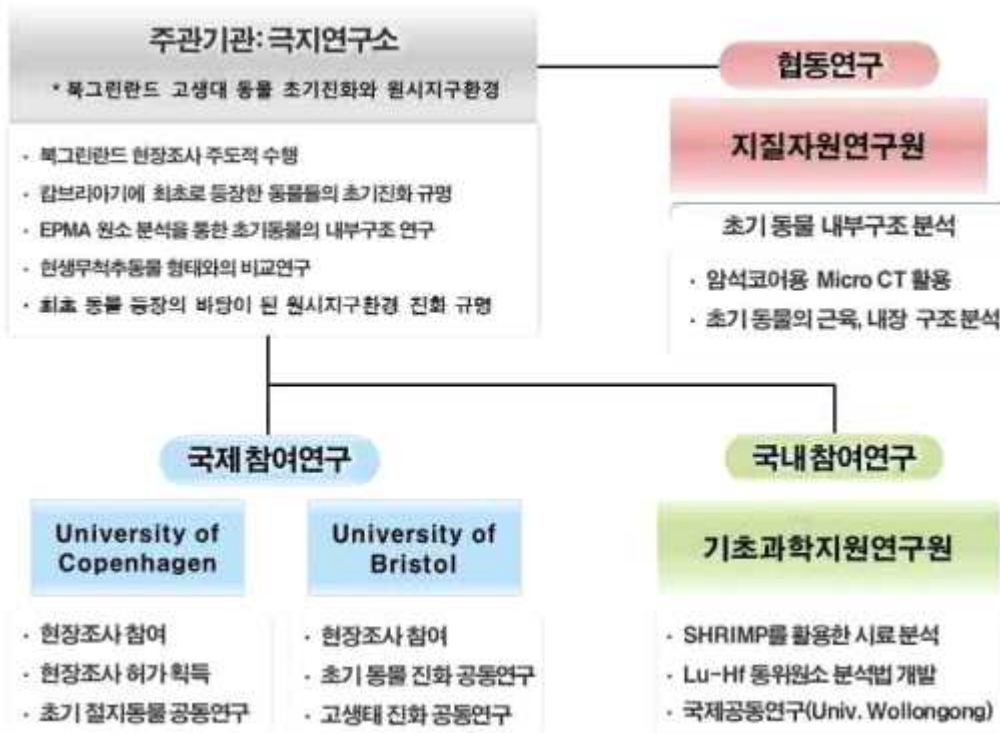


그림 2. 연구개발 추진체계

- 주관기관인 극지연구소 주도의 현장조사 및 연구 수행
 - 원활한 현장조사를 위해 2017년 현장조사 당시 현장에 두고 온 장비들을 사용
 - EPMA 원소분석 방법 확립을 위해 다양한 분석 조건에서 샘플 분석을 시도
 - 다른 지역 캄브리아기 Conservation Lagerstätte의 화석들과의 비교연구를 위한 해외전문가 초청 및 국제 공동 연구 수행
 - 현생 무척추동물과의 비교연구를 위한 소내 무척추동물 전문가들과의 공동연구 수행
- 협동연구 기관인 한국지질자원연구원의 암석 코어용 Micro CT를 이용한 북그린란드 초기 동물 화석 내부구조 3차원적 복원
 - 암석코어용 Micro CT를 이용한 북그린란드 초기무척추동물 화석 내부구조 3차원적 복원 방법 확립을 위해 다양한 분석 조건에서 여러 종류의 샘플 분석을 시도
- 국내 참여연구 기관인 기초과학지원연구원의 원시지구환경 시료 분석
 - 이수아복합체 연구를 통한 원시지구환경 분석을 위해 기초과학지원연구원의 SHRIMP 활용

- 원시지구환경 연구부문 세계선도 기관인 호주의 University of Wollongong과의 국제공동연구 수행

- 국제 참여연구 기관인 University of Copenhagen과 University of Bristol의 북그린란드 현장조사 참여 및 공동 연구 수행
 - 현장조사 허가 획득 및 공동 현장조사 수행
 - 북그린란드의 초기 절지동물을 비롯한 무척추동물의 공동 연구 수행



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1. 국외

북그린란드 캄브리아기 Conservation Lagerstätte 관련 연구

- 1984년 북그린란드 지역의 기초 지질조사를 수행하던 그린란드 지질조사소의 히긴스(A.K. Higgins)와 소퍼(J. Soper)가 우연히 이 지역에서 해면동물화석을 찾으면서 Sirius Passet 화석산지가 최초로 발견되었고, 이 화석들을 영국의 고생물학자들에게 보내어 1987년 Nature에 화석산지가 처음으로 소개됨 (Conway Morris et al. 1987)
- 이 후, 1989, 1991, 1994년에 영국의 고생물학자들로 이루어진 연구팀이 처음으로 이 지역에서 현장조사를 수행하여 약 10,000 여점에 가까운 샘플을 채취
- 이 때 얻어진 샘플을 바탕으로 1990년과 1993년에 2편의 논문이 Nature에 게재 (Conway Morris and Peel 1990 ; Budd 1993)
- 이 후, 2009년과 2011년 덴마크 자연사 박물관의 주도로 고생물학 현장조사가 수행되어 최초로 화석이 산출되는 층준을 발견하였지만, 그 후, 2015년까지 추가 현장조사는 이루어지지 못함
- 2011년 현장조사를 통해 채취된 샘플을 바탕으로 University of Bristol 주도로 2014년 Nature에 논문 게재하였으며(그림1), 연구를 주도적으로 수행한 제1저자 Jakob Vinther는 본 과제의 참여연구원으로 공동연구를 진행 중

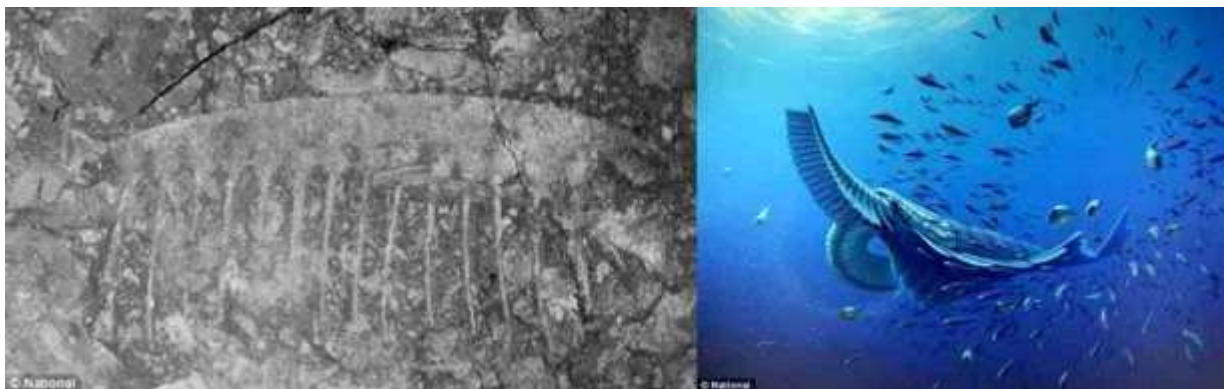


그림 1. 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 원시절지동물 *Tamisiocaris*의 filter-feeding 관련 논문
(from Vinther et al. 2014 Nature)

- 2016년 극지연구소의 Seed형 선생과제를 통해 한-덴마크 공동 연구진이 현장조사를 진행
- 2017년에도 스웨덴 연구진이 90년대 까지의 현장조사 샘플을 바탕으로 논문을 게재함 (그

림 2) (Peel, 2017).

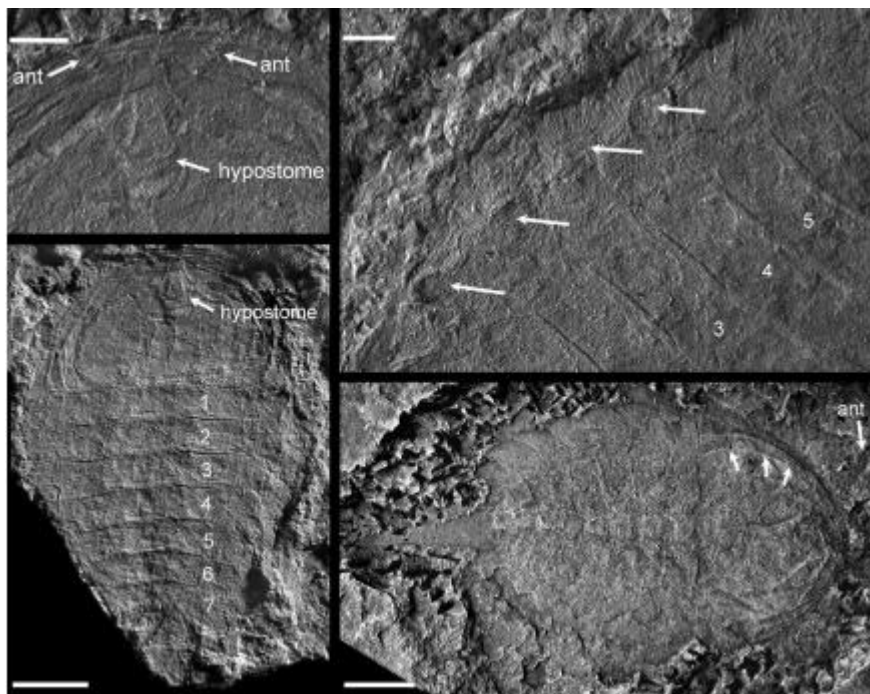


그림 2. 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 캄브리아기 절지동물 *Molaria steini* (from Peel, 2017)

캄브리아기 Conservation Lagerstätte를 바탕으로 하는 동물 초기 진화 연구

- 현재 고생물학에 있어서 가장 주목받는 주류 연구 분야는 Conservation Lagerstätte를 바탕으로 하는 캄브리아기 동물 초기 진화이며, 1990년대 이후, 캐나다의 Burgess Shale과 중국의 Chengjiang에 대한 본격적인 연구가 수행되기 시작하면서 점점 더 많은 학자들이 이 분야를 연구하고 있음
- 지난 30여 년 간의 연구로 캐나다의 Burgess Shale과 중국의 Chengjiang에서는 각각 약 200여 종의 초기 동물 화석이 발견되었음
- 그 중 초기 동물 진화에 있어서 중요한 다수의 연구 성과들이 NSC급 저널에 등재되었는데, Burgess Shale 화석을 바탕으로는 지금까지 14편의 논문이, Chengjiang biota를 바탕으로는 지금까지 22편의 논문이 NSC급 저널에 게재되었음 (e.g. Ma et al. 2012; Tanaka et al. 2013; Cong et al. 2014; Daley et al. 2009; Smith and Ortega-Hernandez 2014)
- 2017년에는 Burgess Shale의 화석을 바탕으로 캄브리아기의 초기 완족동물 진화를 다룬 논문과(Moysiuk et al. 2017), 절지동물 내 madibulata 그룹의 진화를 다룬 논문 (Aria & Caron 2017)이 Nature에 게재(그림 3)



그림 3. 캐나다 버제스셰일(Burgess Shale)에서 산출된 중기 캄브리아기 절지동물 *Tokummia katalepsis* (Aria & Caron 2017).

- 가장 최근에는 중국 허난성에서 최고의 보존상태를 보이는 새로운 캄브리아기 화석산지인 Qingjiang 화석산지가 발견되어 초기동물 진화의 새로운 데이터를 제공하는 논문이 Science에 게재됨 (그림 4)
- 이 논문의 저자들은 해당 화석들의 EPMA 분석을 위해 극지연구소를 방문하여 샘플 분석을 의뢰하고 공동연구를 위해 샘플을 기탁하고 감

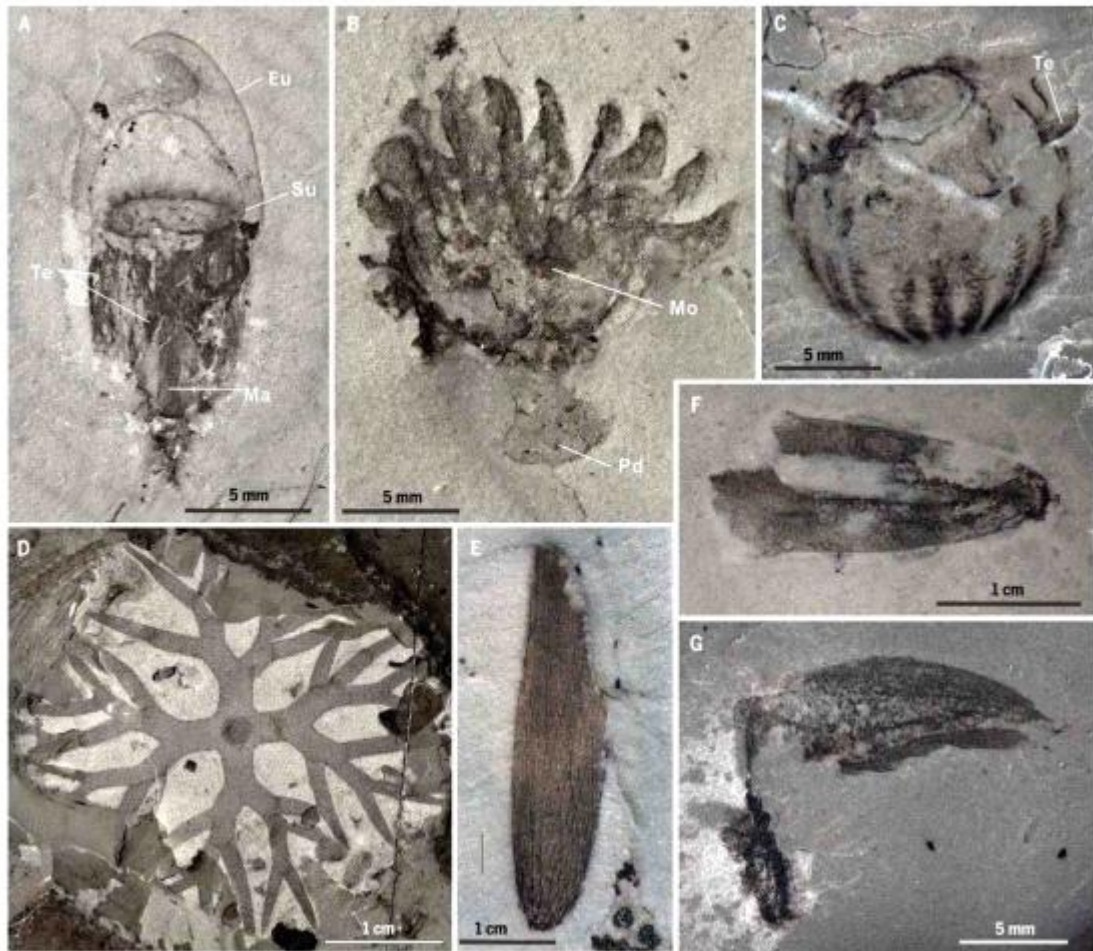


Fig. 2. New soft-bodied taxa from the Qingjiang biota. (A) Medusoid cnidarian, showing radially symmetrical body plan, exumbrellar/subumbrellar surfaces (Eu/Su), manubrium (Ma), and tentacles (Te). (B) Polypoid cnidarian, showing oral disc and mouth (Mo), tentacles, column, and pedal disc (Pd). (C) Ctenophore, showing that comb rows and oral-aboral body axis have a biradial symmetry resulting from sheathed tentacles. (D) Branched alga, showing quadripartite thallus. (E) Sponge *Leptonitella* sp. (F) New chordate. (G) *Yunnanzoon* sp.

그림 4 Science에 게재된 새롭게 발견된 중국의 캄브리아기 초기동물 화석산지.

○ Conservation Lagerstätte의 퇴적환경과 화석화 과정에 대한 연구

- 북그린란드 Sirius Passet의 퇴적환경은 Ineson & Peel(2011)에 의해 제안된 바 있지만, 기존 Burgess Shale의 퇴적환경과 유사하게 탄산염대지의 급한 경계부에 접해있는 비교적 깊은 퇴적환경으로 재구성하였으나, 최근 Burgess Shale의 일반적인 퇴적환경 모델에도 이의가 제기되고 있는 상황에서 보다 상세한 퇴적환경 연구가 필요
- Sirius Passet 화석화과정에 대한 연구의 기반이 되는 지화학적 분석이 이루어진바 있지만 (Le Boudec et al., 2014) 화석화과정에 대한 의미 있는 논의는 이루어지지 않았음. 또한 최근 미세분석을 통해 Sirius Passet 화석의 내장 및 근육 등에 대한 광물화 과정에 대한 연

구가 이루어졌지만(Strang et al., 2016a, b), 화석지내의 다양한 화석화 형태를 설명하고, 화석지 전반적으로 영향을 끼친 접촉변성 등에 대한 고려가 추가된 논의가 필요할 것으로 판단됨

○ 초기 시생대 생명활동 흔적 연구

- 지구상에서 가장 오래된 화석 (37억년 전, 스트로마톨라이트)이 그린란드 남서부 이수아 상부지각암류에서 발견되어 초기 지구의 생명탄생 및 지구시스템 진화에 대한 정보를 제공 (Nutman et al., 2016)
- 생명기원의 그래파이트(graphite)가 이수아 상부지각암류에서 발견되어 최소 37억 년 전 바다에서 번성했던 초기 생명체에 대한 흔적을 추적 (Ohtomo et al., 2014)

○ 초기 시생대 지각진화 연구

- 이수아 상부지각암류를 구성하는 시생대의 오피올라이트에 대한 지화학적 연구를 통해 섭입운동과 같은 판구조 운동이 약 40억 년 전부터 활동을 시작하였으며, 초기 지각형성 과정과 밀접한 관련이 있음을 제안 (Friend & Nutman, 2011). 이러한 결과는 고철질의 화산호 지각의 부분용융에 의해 지구의 가장 오래된 대륙지각이 형성되었다는 모델과도 일치함 (Nagel et al., 2012)
- 이수아 상부지각암류에 포함된 맨틀암석을 구성하는 감람석에 대한 후방산란전자회절 (EBSD) 분석을 통해 초기 시생대의 맨틀 변형 및 섭입 환경에 대한 정보가 보고됨 (Kaczmarek et al., 2016)
- 이수아 지역 편마암 복합체에 대한 연대측정 및 동위원소 분석결과에 의하면, 약 39억년에서 36억 6천만년 동안 간헐적으로 초생 지각이 형성되었고, 이후 36억 6천만년에서 36억까지 지각의 재활성이 일어난 것으로 밝혀짐 (Nutman et al., 2013). 이러한 연구는 현생 지각 발달사와 비교되어 초기 시생대의 지각화과정을 이해하는데 매우 중요

2.2. 국내

- Seed형 선행과제 “북그린란드의 캄브리아기 화석을 중심으로 하는 무척추동물 초기 진화 규명(연구책임자: 박태운)” 이 2015.10-2016.09동안 수행됨
- 상기 사업을 통해 2016년 대한민국 최초로 북그린란드의 현장조사를 수행하고, 이를 통해 세계적으로 손꼽히는 캄브리아기 Conservation Lagerstätte인 Sirius Passet에서 채취한

3000여점의 캄브리아기 초기 동물 화석 샘플들을 극지연구소에 수장하고 있는 상태 (그림 5)



그림 5. 극지연구소에 수장 중인 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 캄브리아기의 초기 동물 화석들

- 상기 사업을 통해 얻어진 화석 샘플들의 Cataloging이 진행 중 (KPDC 참조)
- 이 중 절지동물의 초기 형태진화를 규명할 수 있는 원시절지동물 화석을 비롯한 다양한 무척추동물의 초기 진화에 관한 고생물학적 연구가 수행 중
- 한국기초과학지원연구원 주요사업 (과제책임자: 이기욱 박사)으로 그린란드 남서부 초기 시생대 암석에 대한 국내 최초 현장야외조사 수행 및 편마암 복합체의 시료 110종, 약 200kg 수집 (2011년)
- 한국기초과학지원연구원의 고분해능 이차이온질량분석기를 사용하여 이들 암석에 대한 정밀연대측정 연구를 수행하고 우수논문 다수 발표 (Nutman et al., 2013; Yi et al., 2014; Nutman et al., 2015)

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1. 초기 무척추동물 화석 형태 분석 및 진화 규명

3.1.1. 원시 절지동물 화석의 형태분석 및 초기 형태 진화 양상 규명

○ 2011, 2016, 2017 시즌에 Sirius Passet에서 채취한 샘플을 바탕으로 원시 절지동물 *Kerygmachela*의 형태분석 완료 및 논문 제출

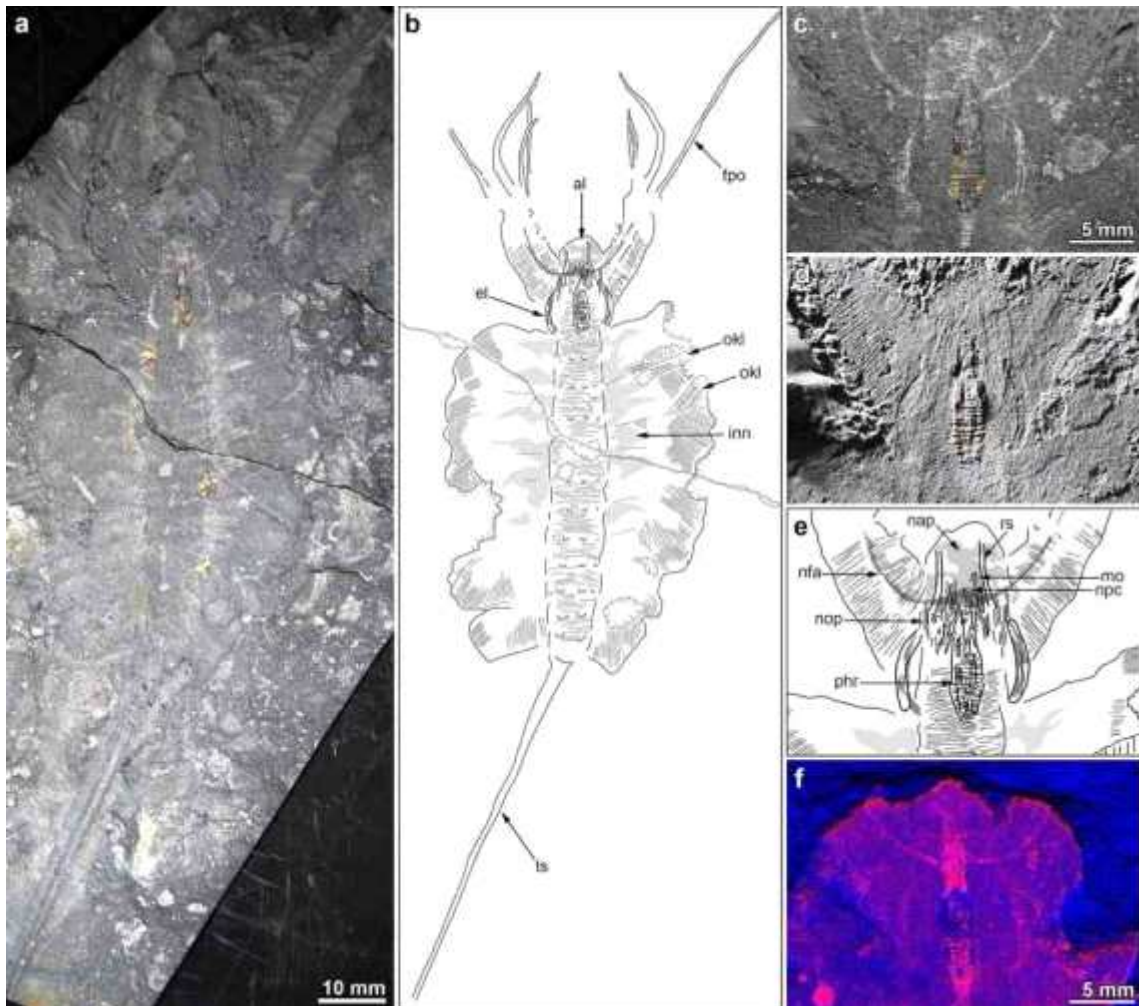


그림 1. *Kerygmachela kierkegaardi* from the Buen Formation (Cambrian Stage 3), Sirius Passet, North Greenland. a - e, SP-2011-577a. b is an interpretive drawing of a. c and d are magnified images of the head region of a. c, under high-angle polarized lighting. d, under low-angle lighting. e, interpretive drawing of c and d. f, SP-2011-577b, the

counterpart of SP-2011-577a; a Wavelength Dispersive X-ray elemental map of carbon of the head region. Carbon-rich region (red), superimposed upon the topographic map (blue), representing the frontal appendage nervous tracts and the anterior neural projections. al, anterior lobe; el, eye lobe; fpo, outermost frontal process; inn, non-neural impression; mo, mouth opening; nap, anterior neural projection; nfa, frontal appendage nervous tract; npc, protocerebrum; nop, optic neuron; okl, overprint of *Kleptothule* arthropod specimen; phr, pharynx; rs, rostral spine; ts, tail spine.

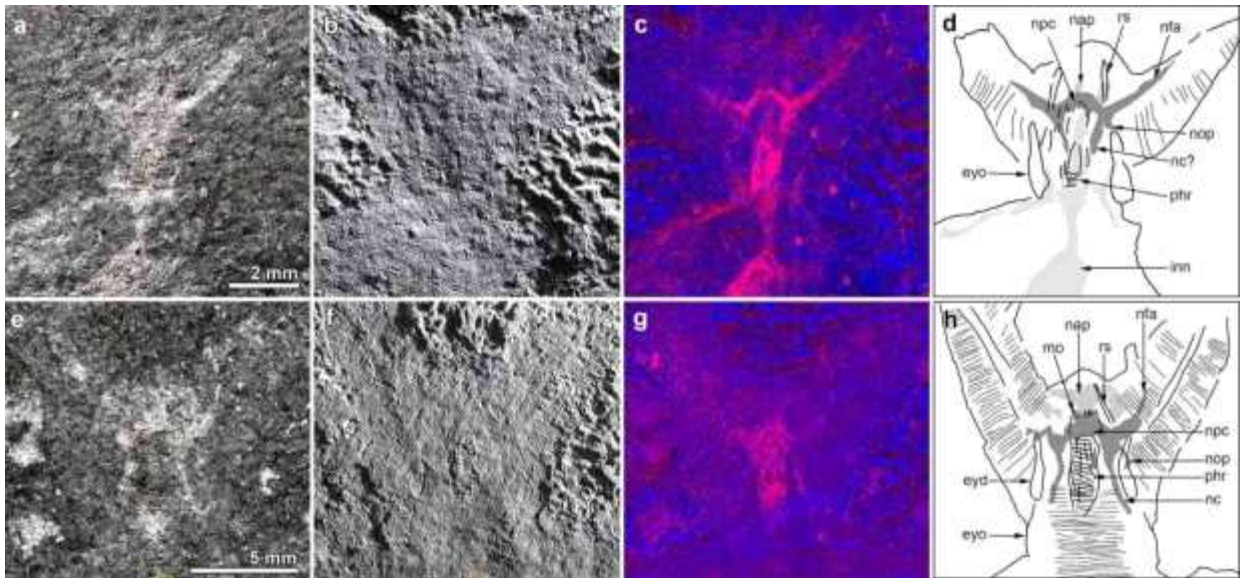


그림 2. Details of head structure in *Kerygmachela kierkegaardi*. a - d, SP-2016-789.

a, under high-angle polarized lighting. b, under low-angle lighting. c, Wavelength Dispersive X-ray elemental map of carbon of the head region. d, interpretive drawing of a and b. e - g, SP-2016-33. e, under high-angle polarized lighting. f, under low-angle lighting. g, Wavelength Dispersive X-ray elemental map of carbon of the head region. h, interpretive drawing of e and f. eyd, displaced eye structure; eyo, original outline of eye lobe; inn, non-neural impression; nap, anterior neural projection; nc, nerve cord; nfa, frontal appendage nervous tract; npc, protocerebrum; nop, optic nerve; phr, pharynx; rs, rostral spine.

- 원시절지동물인 *Kerygmachela*의 몸 전체가 잘 보존된 화석의 형태 분석(그림 1, 3)
- 머리쪽 신경계가 보존된 화석의 형태 분석 및 EPMA를 이용한 WDX-ray 분석(그림 3, 4)
- 가장 앞쪽의 신경계인 뇌가 protocerebrum 하나로 이루어진 것을 규명(그림 13)
- 맨 앞의 두 개의 큰 다리는 protocerebrum에서 기원한 가장 앞쪽 마디의 다리에서 유래한 것을 규명

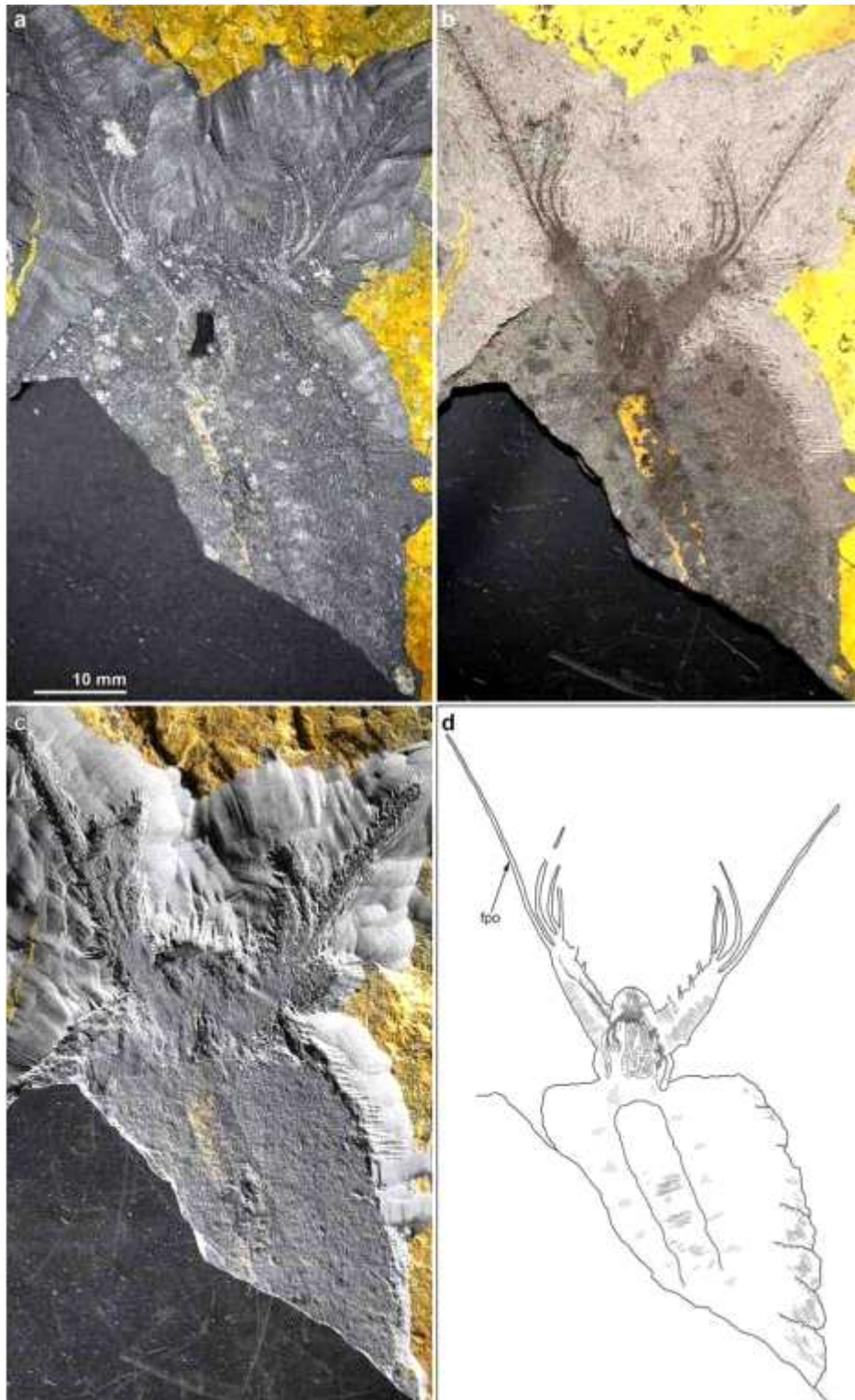


그림 3. *Kerygmachela kierkegaardi*. SP-2016-203. a, under high-angle polarized lighting. b, under high-angle polarized lighting with crossed nicols. c, under low-angle lighting. d, interpretive drawing of a, and c. fpo, outermost frontal process.

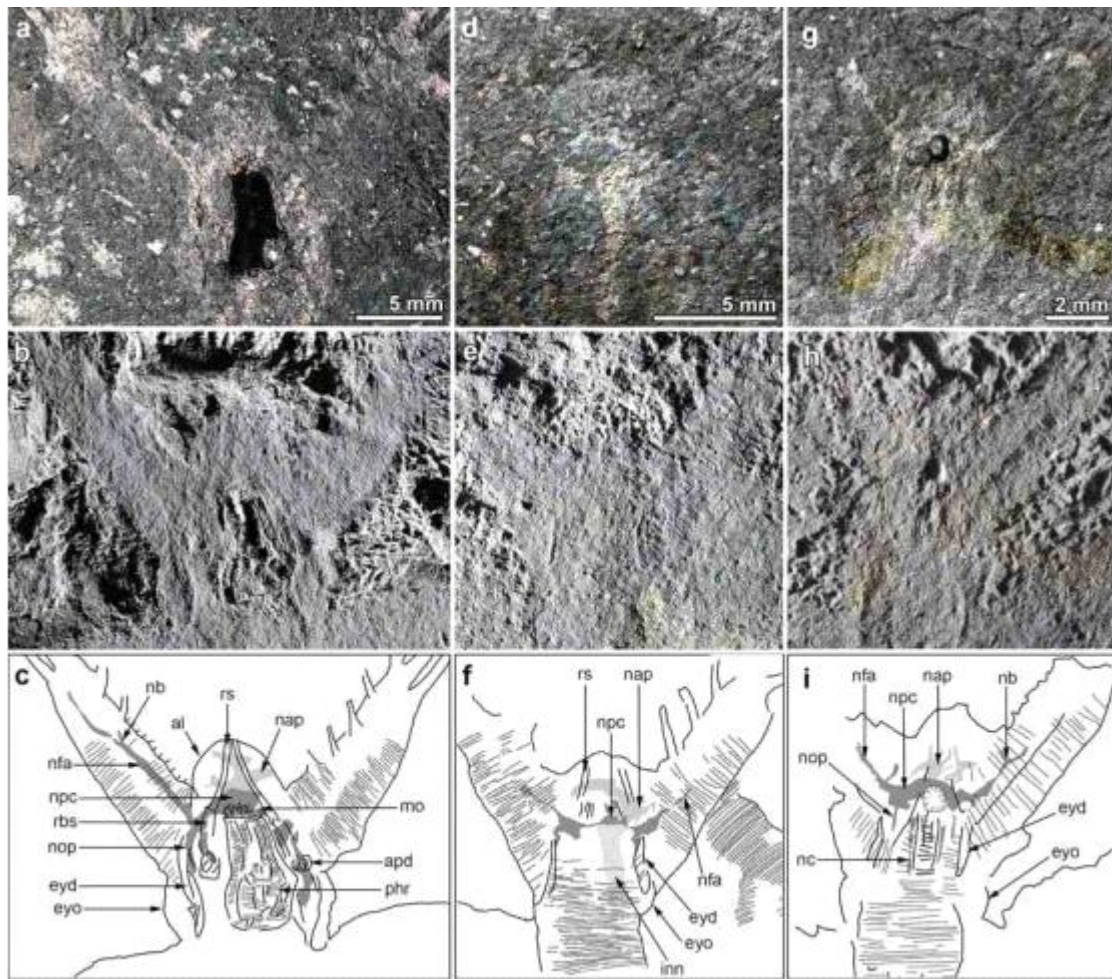


그림 4. *Kerygmachela kierkegaardi* from the Buen Formation (Cambrian Stage 3), Sirius Passet, North Greenland. a - e, SP-2011-577a. b is an interpretive drawing of a. c and d are magnified images of the head region of a. c, under high-angle polarized lighting. d, under low-angle lighting. e, interpretive drawing of c and d. f, SP-2011-577b, the counterpart of SP-2011-577a; a Wavelength Dispersive X-ray elemental map of carbon of the head region. Carbon-rich region (red), superimposed upon the topographic map (blue), representing the frontal appendage nervous tracts and the anterior neural projections. al, anterior lobe; el, eye lobe; fpo, outermost frontal process; inn, non-neural impression; mo, mouth opening; nap, anterior neural projection; nfa, frontal appendage nervous tract; npc, protocerebrum; nop, optic neuron; okl, overprint of *Kleptothule* arthropod specimen; phr, pharynx; rs, rostral spine; ts, tail spine.

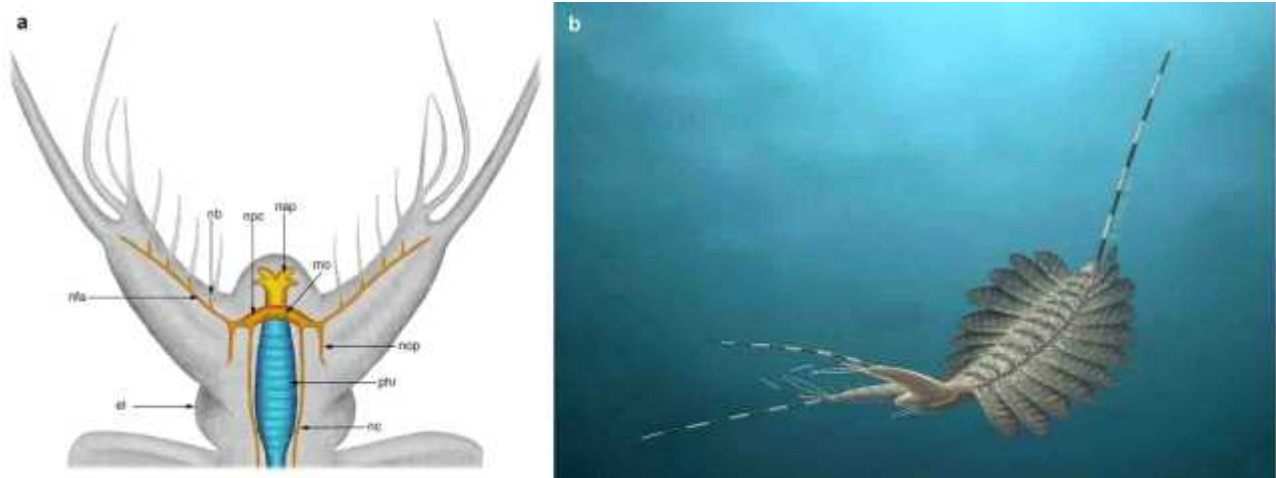


그림 5. Reconstruction of *Kerygmachela kierkegaardi*. a, dorsal reconstruction of the head region with the central nervous system (orange), anterior neural projection (yellow), and muscular pharynx (blue). b, artistic reconstruction of *K. kierkegaardi*. el, eye lobe; mo, mouth opening; nap, anterior neural projection; nb, branching of nerve; nc, nerve cord; nfa, frontal appendage nervous tract; npc, protocerebrum; nop, optic nerve; phr, pharynx.

Artwork by Rebecca Gelernter.

- 미국의 고생물 전문 일러스트레이터를 통해 *Kerygmachela* 머리쪽 신경계와 살아있는 모습의 일러스트를 제작(그림 5)
- 다리의 아래쪽에 위치해있는 *Kerygmachela*의 눈 형태를 최초로 확인, 절지동물 초기 형태 진화에서 처음 등장한 겹눈을 확인
- 머리 가장 앞쪽의 anterior lobe의 존재와 그 안의 신경 구조(nap: anterior neural projection)를 확인하여 절지동물 초기 진화에서 처음으로 등장했을 홑눈(ocelli)의 존재 가능성을 규명(그림 5a)
- 이를 통해 절지동물의 protocerebrum이 두 개의 마디가 합쳐지면서 융합된 신경절이며, 절지동물의 겹눈은 바로 이 두번째 다리에서 유래했을 것이라는 기존의 가설과는 달리, protocerebrum은 원래 맨 앞의 한 마디에서 유래했으며, 절지동물의 겹눈은 다리에서 유래한 구조가 아닌, 완보동물이나 유조동물의 눈과 homologous한 구조에서 진화했다는 것을 규명

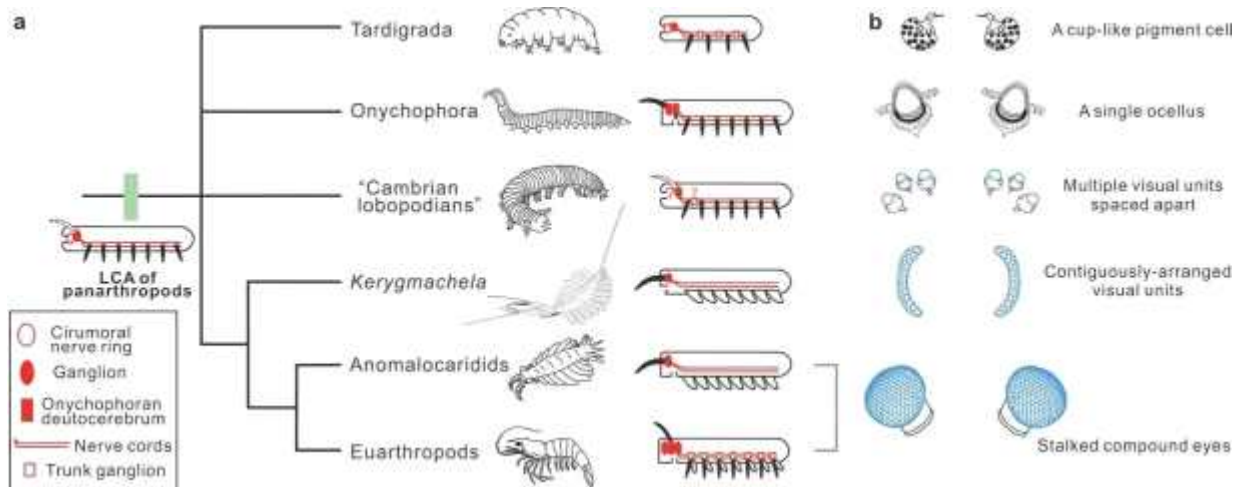


그림 6. A panarthropod phylogenetic tree with diagrammatic summary of central nervous system (CNS) and evolution of visual structures within Panarthropoda. a, a diagrammatic representation of the CNS in panarthropod lineages, with the inferred CNS condition in the last common ancestor (LCA) of panarthropods. Although it is not unequivocal, the lack of segmental ganglia in the trunk of onychophorans and the stem-group euarthropod *Lyrarapax* suggests that segmental ganglia were absent in the LCA of panarthropods. b, Visual structures of different panarthropod lineages.

- 절지동물 겹눈은 최초의 광수용체에서 진화한 홑눈들이 여러 개 모여서 진화한 것이라는 진화모델을 제시(그림 6b)
- 절지동물 초기 진화에 있어서 신경구조 진화 모델을 제시(그림 6a)
- 이 모델을 통해, cycloneuralian 동물들에게서 보이는 뇌의 형태인 nerve ring이 초기의 원시절지동물에게서도 존재했을 것이라는 추측이 가능하며, 이 nerv ring 구조는 고등 절지동물로 진화하면서 사라졌을 것이라는 가설을 제시(그림 6a)

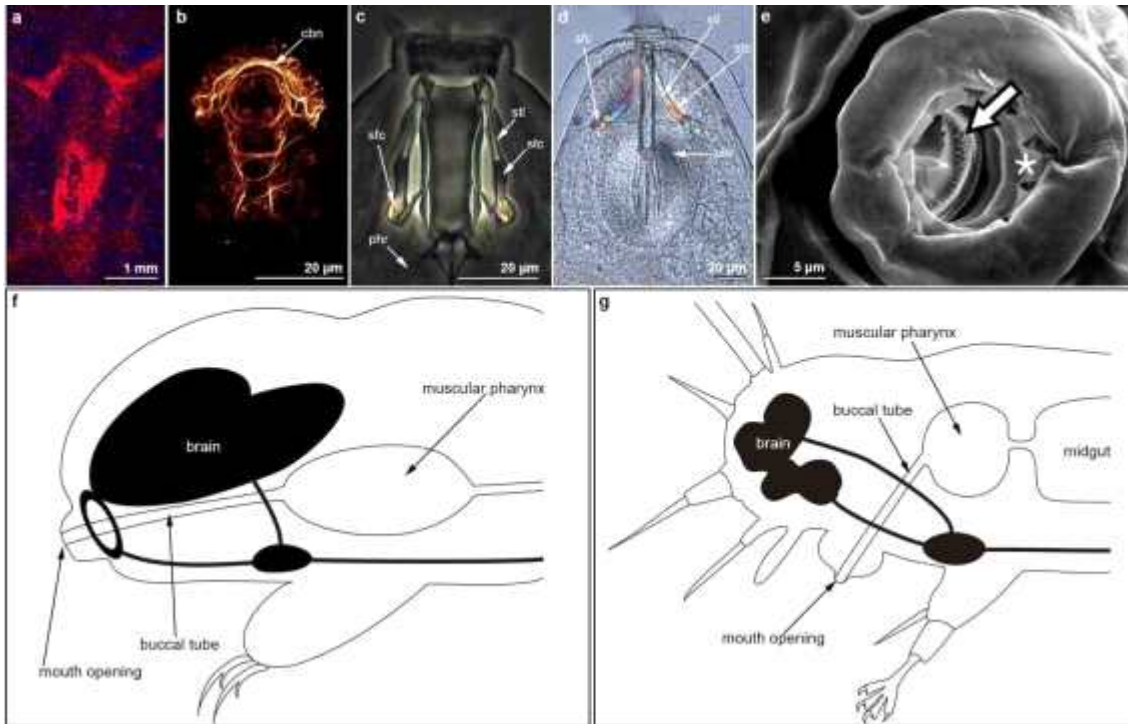


그림 7. Wavelength Dispersive X-ray elemental map of *Kerygmachela kierkegaardii* and detailed features of tardigrades. a, Wavelength Dispersive X-ray elemental map of carbon of the head region of SP-2016-789, showing the anteriorly-rounded central brain neuropil. Carbon-rich region (red) is superimposed upon the topographic map (blue). b, Confocal laser scanning microscopic image of the central nervous system of the eutardigrade *Hypsibius dujardini* which was labeled for acetylated α -tubulin. Image courtesy of V. Gross. c, Bucco-pharyngeal apparatus of the eutardigrade *Milnesium berladicorum*³⁷. Image courtesy of D.A. Ciobanu. d, Differential Interference Contrast (DIC) image of the bucco-pharyngeal apparatus of the eutardigrade *Dactylobiotus* sp. e, SEM image of the mouth part of *Dactylobiotus* sp. Peribuccal lamellae (asterisk) and peribuccal lamellae (arrow). f, Schematic figure of nervous system and buccopharyngeal apparatus of the eutardigrades *Macrobiotus* cf. *harmsworth*. g, schematic figure of nervous system and buccopharyngeal apparatus of the heterotardigrade *Actinarctus doryphorus*. cbn, central brain neuropil; phr, pharynx; sfc, stylet furca; stl, stylet; stc, stylet coat.

- 원시절지동물 머리 신경계의 모양이 현생 완보동물 배아의 central neuropil 모양과 유사한 사실을 발견(그림 15 a, b)
- 그동안 미지의 구조로 알려져 있던 *Kerygmachela*의 rostral spine(그림 9e, rs)이 완보동물 입 주변의 stylets과 유사한 형태와 위치를 가지고 있다는 것을 규명(그림 15c, d)
- 이를 통해 완보동물의 stylet이 맨 앞 마디의 다리에서 유래한 구조라는 기존의 가설이 옳지 않다는 것을 규명

- 세계 최초로 화석을 구성하는 원소 분석 연구에 극지연구소의 EPMA를 활용한 WDX-ray기법을 적용(그림 16, 17)
- 기존의 연구들에서 사용했었던 EDX-ray 분석보다 훨씬 강한 signal을 탐지해 낼 수 있기에, 더욱 뚜렷한 elemental map image 획득이 가능

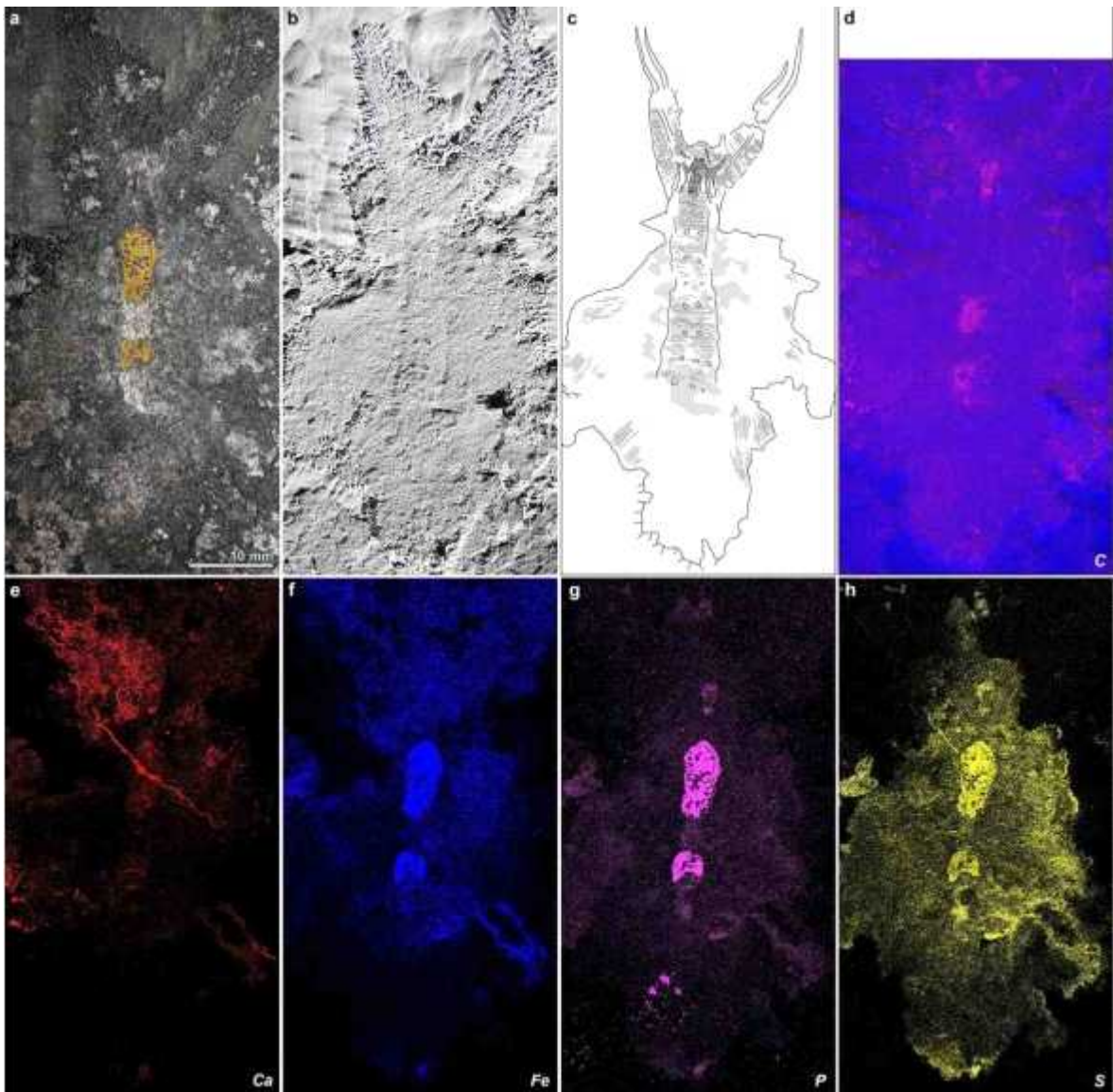


그림 8. *Kerygmachela kierkegaardi*. SP-2016-33. a, under high-angle polarized lighting. b, white-coated specimen. c, interpretive drawing of a and b. d - h, Wavelength Dispersive X-ray elemental maps. d, carbon-rich region (red), superimposed upon the topographic map (blue). e, calcium map. f, iron map. g, phosphate map. h, sulfur map.

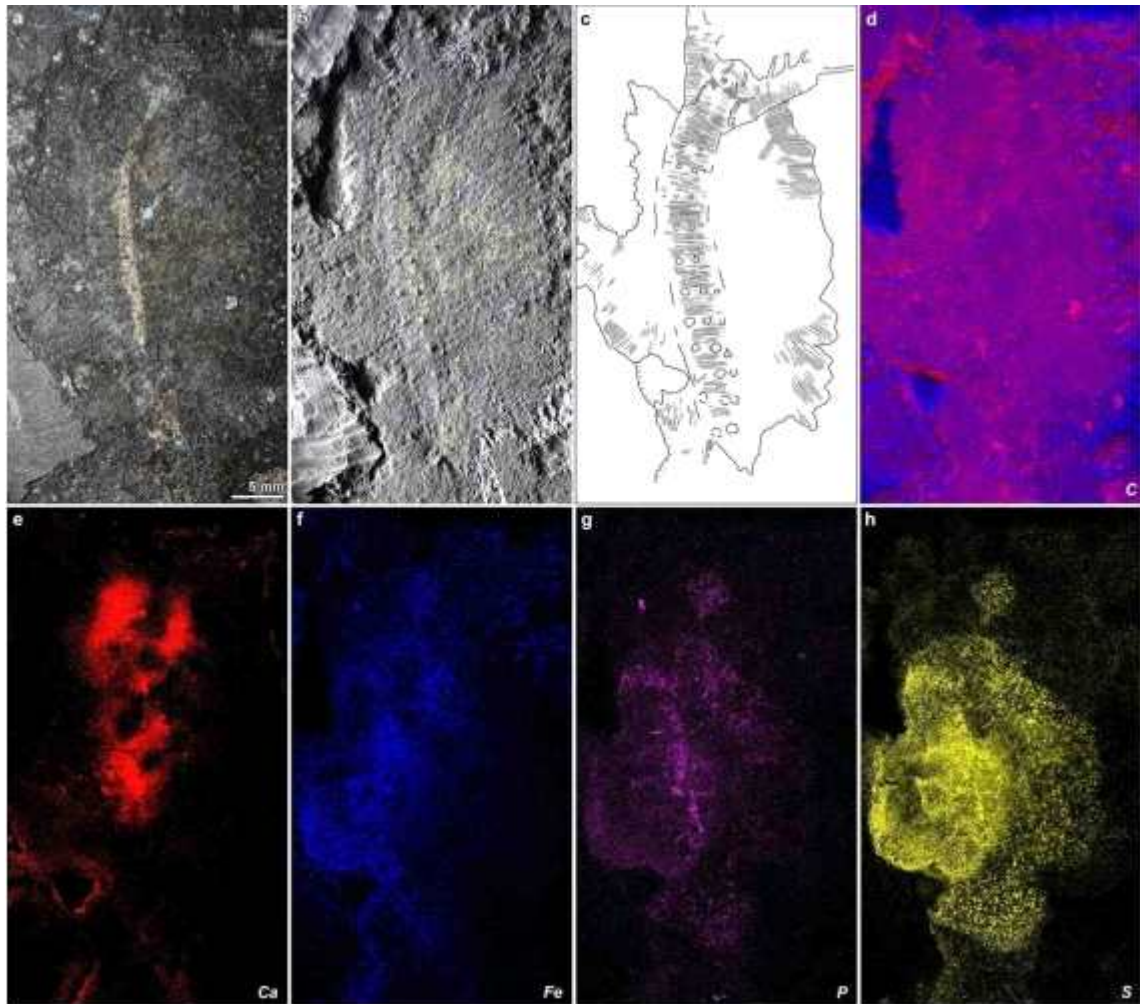


그림 9. *Kerygmachela kierkegaardi*. SP-2016-131. a, under high-angle polarized lighting. b, under low-angle lighting. c, interpretive drawing of a and b. d - h, Wavelength Dispersive X-ray elemental maps. d, carbon-rich region (red), superimposed upon the topographic map (blue). e, calcium map. f, iron map. g, phosphate map. h, sulfur map.

- 북그린란드에서 산출된 원시 절지동물 *Kerygmachela*의 머리 신경 형태 규명
- 관련논문 **Nature Communications**에 게재 (제1저자 및 공동교신 저자) (그림9)

ARTICLE

DOI: 10.1038/s41467-018-03464-w

OPEN

Brain and eyes of *Kerygmachela* reveal protocerebral ancestry of the panarthropod head

Tae-Yoon S. Park¹, Ji-Hoon Kihm^{1,2}, Jusun Woo¹, Changkun Park¹, Won Young Lee³, M. Paul Smith⁴, David A.T. Harper⁵, Fletcher Young⁶, Arne T. Nielsen⁷ & Jakob Vinther⁶

Recent discoveries of fossil nervous tissue in Cambrian fossils have allowed researchers to trace the origin and evolution of the complex arthropod head and brain based on stem groups close to the origin of the clade, rather than on extant, highly derived members. Here we show that *Kerygmachela* from Sirius Passet, North Greenland, a primitive stem-group euarthropod, exhibits a diminutive (protocerebral) brain that innervates both the eyes and frontal appendages. It has been surmised, based on developmental evidence, that the ancestor of vertebrates and arthropods had a tripartite brain, which is refuted by the fossil evidence presented here. Furthermore, based on the discovery of eyes in *Kerygmachela*, we suggest that the complex compound eyes in arthropods evolved from simple ocelli, present in onychophorans and tardigrades, rather than through the incorporation of a set of modified limbs.

그림 10. Park T.-Y. et al. (2018) Brain and eyes of *Kerygmachela* reveal protocerebral ancestry of the panarthropod head. *Nature Communications* 9: 1019

3.1.2. 원시 모악동물 형태 분석

○ 세계 최초로 초대형 원시 모악동물 화석 채취

- 지구상에 최초로 동물이 등장한 캄브리아기의 새로운 거대 포식자를 발견하고 *Timorebestia*로 명명 (그림11)



그림 11. 새롭게 발견된 캄브리아기 원시 모악동물 *Timorebestia*의 복원도

- 현생 해양생태계에서는 보통 길이가 3 cm를 넘지 않는 planktonic한 포식자로 진화한 모악 동물이 진화 초기 단계에서는 길이 30 cm를 넘는 거대 포식자였음
- 지구상 최초로 등장한 캄브리아기의 해양생태계에서 먹이를 잘게 부수지 않고 한번에 삼키는 포식자를 세계 최초로 발견
- 기존에 알려진 캄브리아기의 포식자들은 먹이를 씹어서 잘게 부순 후 섭취하는 포식자들이었기에 캄브리아기의 많은 동물들이 긴 가시를 가지고 있는 것을 설명할 수 없었음
- 캄브리아기에서 가장 많이 산출되는 절지동물 화석인 *Isoxys*의 가시 길이 비율이 발달상에서 일정하게 감소하는 것을 볼 때, 이 절지동물이 특정 포식자의 선택압을 받고 있었다는 것을 알 수 있음(그림 12)

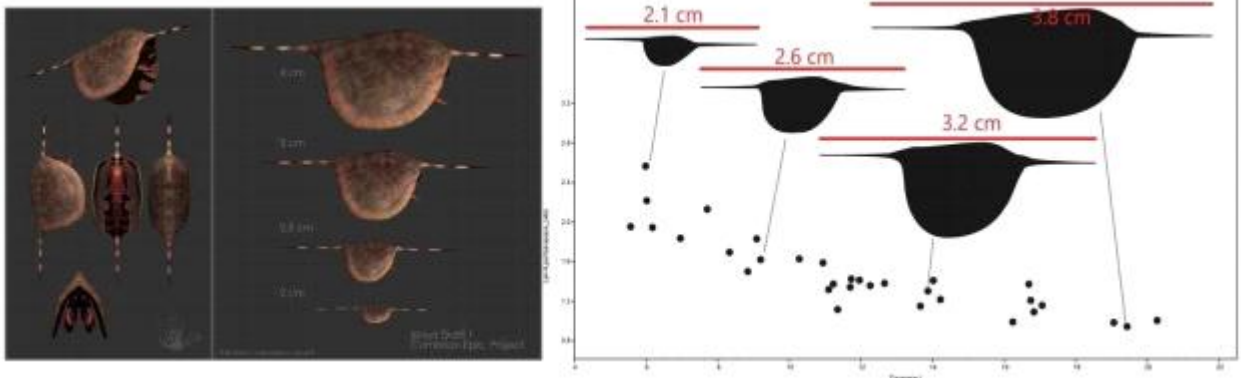


그림 12. *Timorebestia*와 함께 산출되는 캄브리아기 절지동물인 *Isoxys*의 복원도(좌) 및 성장에 따른 가시의 비율 변화 그래프(우)

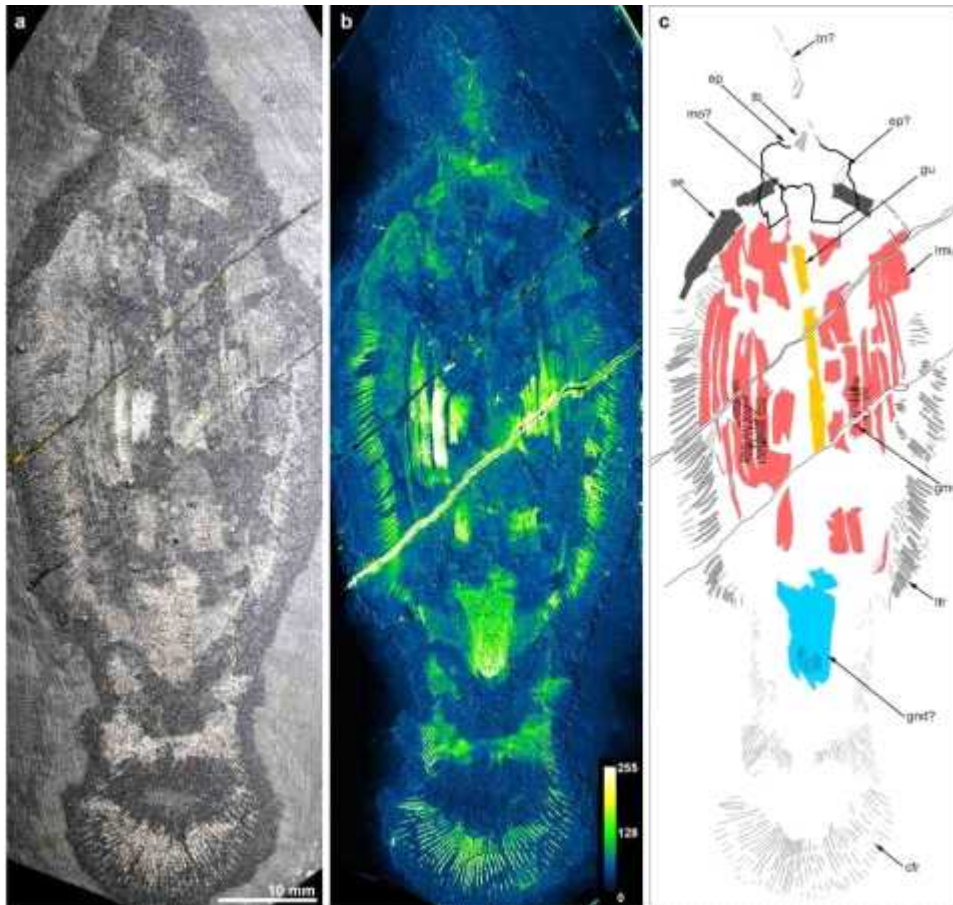


그림 13. *Timorebestia koprii* gen. et sp. nov. from the Buen Formation (Cambrian Stage 3), Sirius Passet, North Greenland. a - c, SP-2017-37, holotype. a, under high-angle lighting, submerged in water. b, Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry (WDS) elemental map of carbon. The lower right colour scale represents the intensity of carbon. c, interpretive drawing of a and b. cfr, caudal fin-ray; ep, eye position; gms, groove-like

muscular structures; gnd, gonad; gu, gut; lfr, lateral fin-ray; lmu, longitudinal muscle; mo, mouth; se, shoulder element; tb, tentacle base; tn, tentacle nerve.

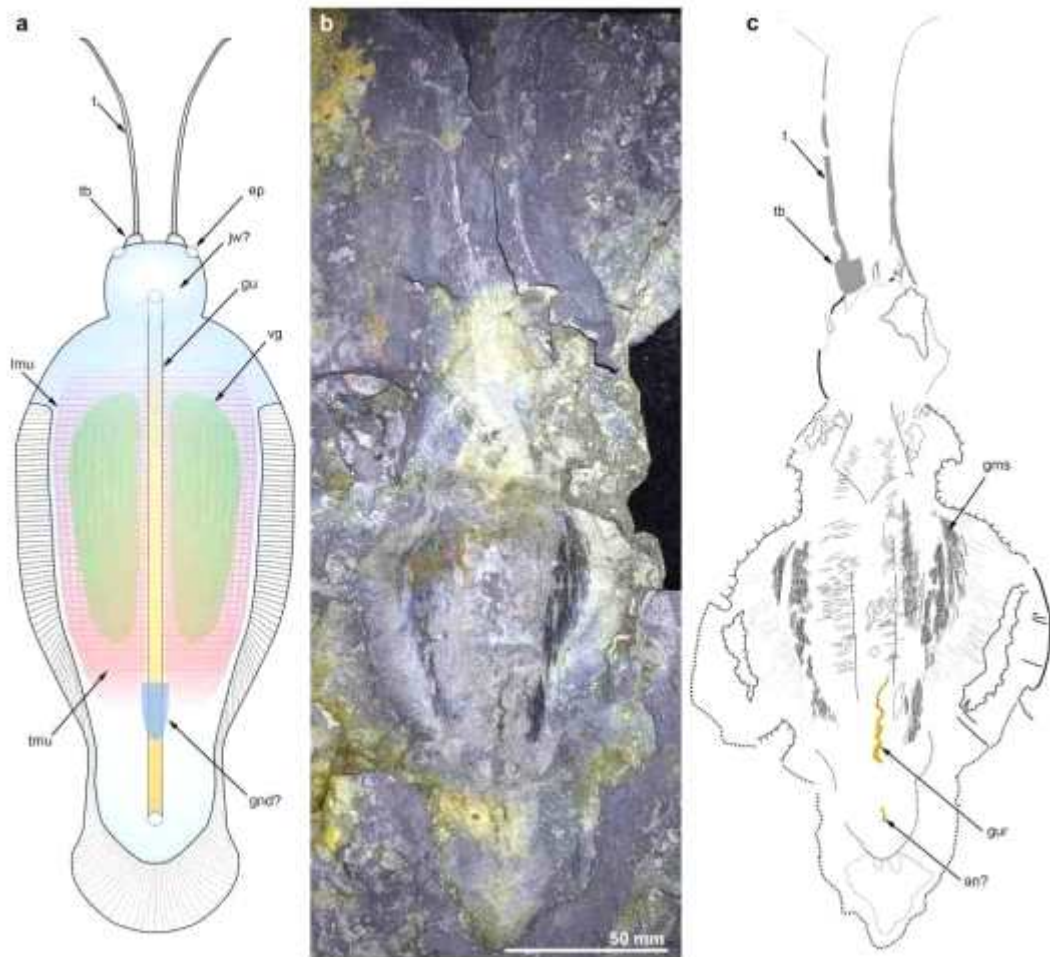


그림 14. *Timorebestia koprii* gen. et sp. nov. from the Buen Formation (Cambrian Stage 3), Sirius Passet, North Greenland. a, anatomical reconstruction of *Timorebestia koprii*. b - c, SP-2017-00, paratype. b, under high-angle lighting, submerged in water. c, interpretive drawing of b. an, anus; ep, eye position; gms, groove-like muscular structures; gnd, gonad; gu, gut; gur, gut remains; jw, jaw; lmu, longitudinal muscle; mmvg, mineralised muscular structure formed by ventral ganglion; opn, optic nerve; t, tentacle; tb, tentacle base; tn, tentacle nerve; vg, ventral ganglion.

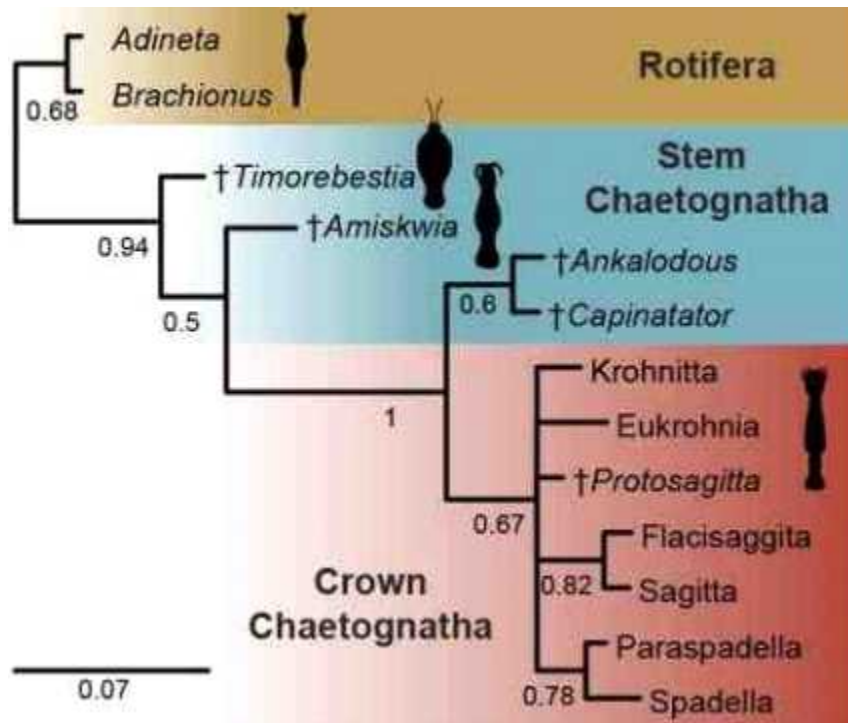


그림 15. results of Bayesian phylogenetic analysis of a morphological dataset focusing on spiralian, tree is reduced to focus on chaetognaths and their sister group (Rotifera), numbers at nodes are posterior probabilities and the scale bar is in units of expected number of changes per character

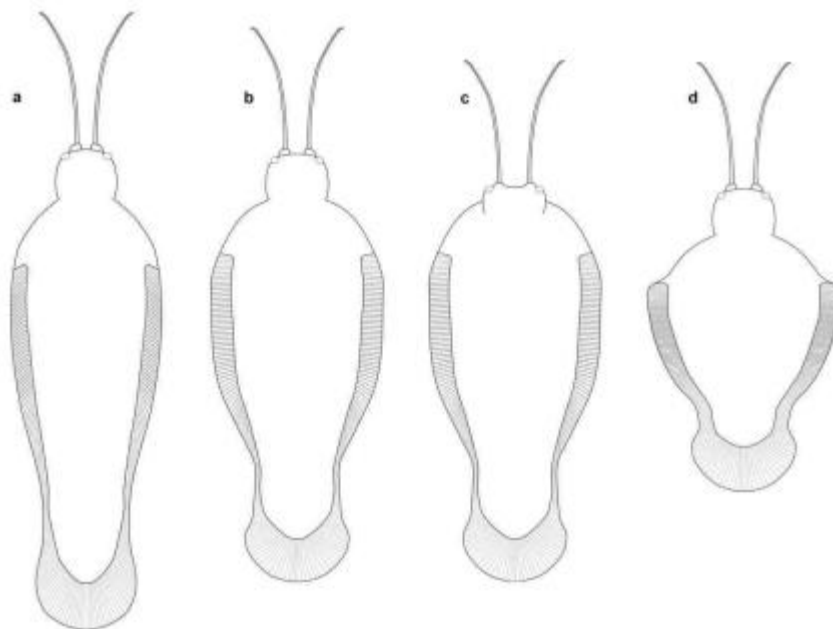


그림 16. a - d, body contraction diagrams. a, body elongated. b, normal condition. c, head retracted. d, body contracted.

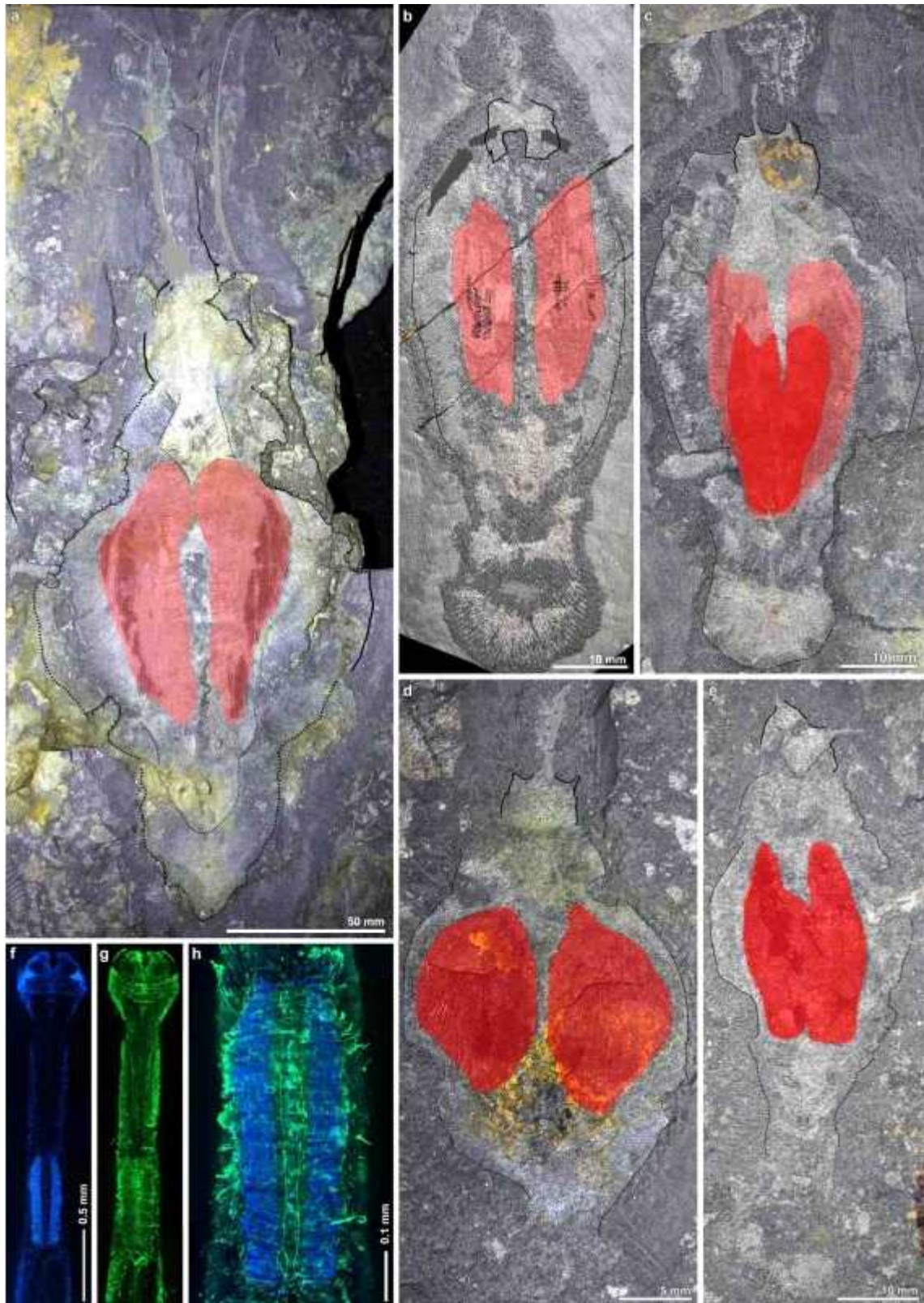


그림 17. Paired ventral ganglions of *Timorebestia koprii* gen. et sp. nov. and confocal laser scanning microscope images of extant chaetognath *Sagitta* sp. a - e, Images of *T. koprii*

taken under high-angle lighting, submerged in water, which are overlaid by body outline and reddish patches representing paired ventral ganglion. The pale reddish colour represents carbonaceous film preservation of muscles, while the dark reddish colour represents mineralized preservation of muscles. a, SP-2017-00. b, SP-2017-37. c, SP-2016-1596. d, SP-2017-47. e, SP-2011-01. f-h, confocal laser scanning microscope images of the extant chaetognath *Sagitta* sp. f, histochemical labeling of nuclei. g, immunolocalization of α -tubulin. h, magnified view of the ventral nerve centre; nuclei (blue) and α -tubulin (green).

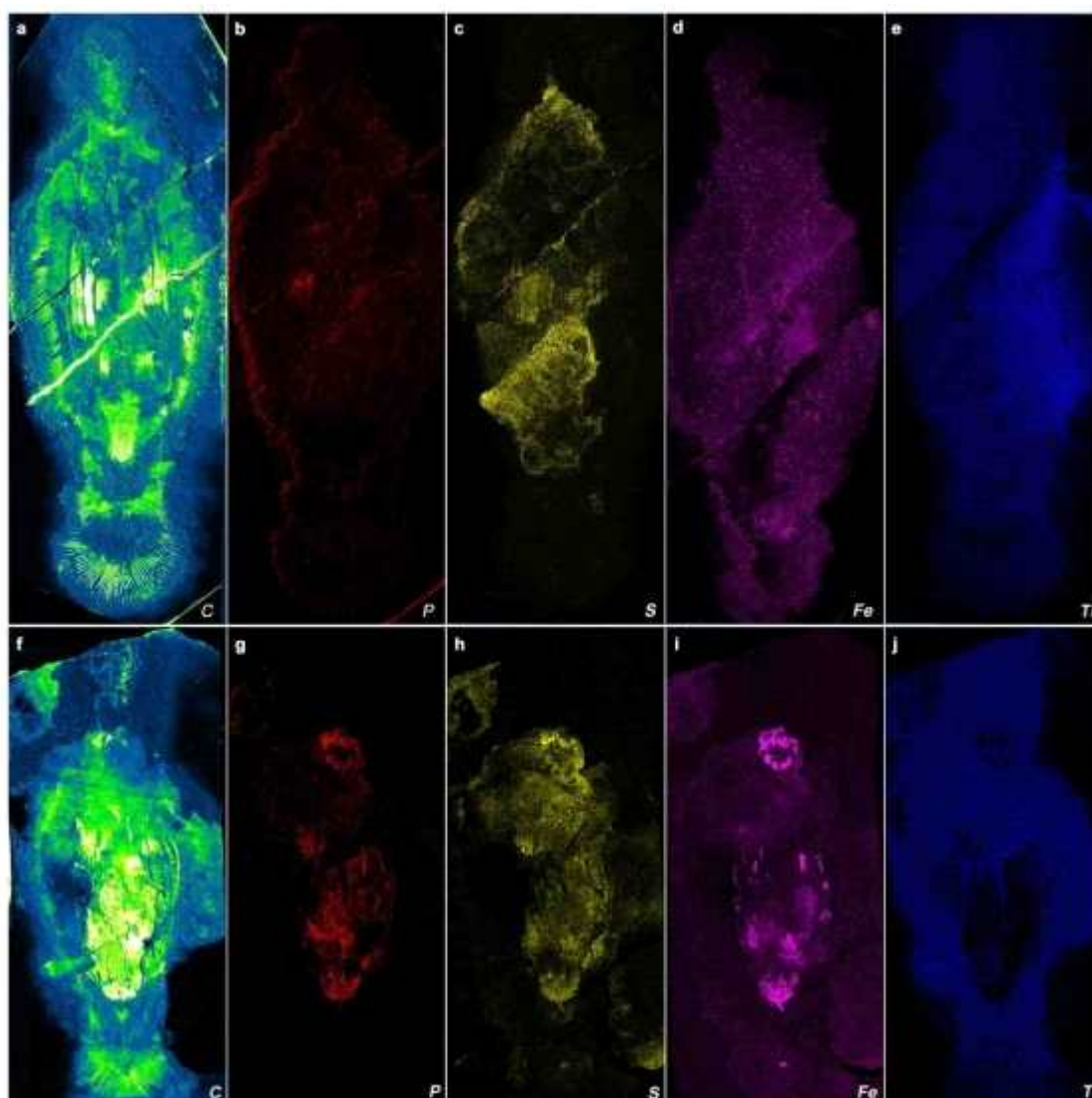


그림 18. Elemental maps of SP-2017-37 and SP-2016-1596, acquired by Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA). a - e, Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry (WDS)

elemental map of SP-2017-37. a, carbon map. b, phosphate map. c, sulfur map. d, iron map. e, titanium map. f-j, WDS (f-g, j) and Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS) (h-i) elemental maps of SP-2016-1596. f, carbon map. g, phosphate map. h, sulfur map. i, iron map. j, titanium map.

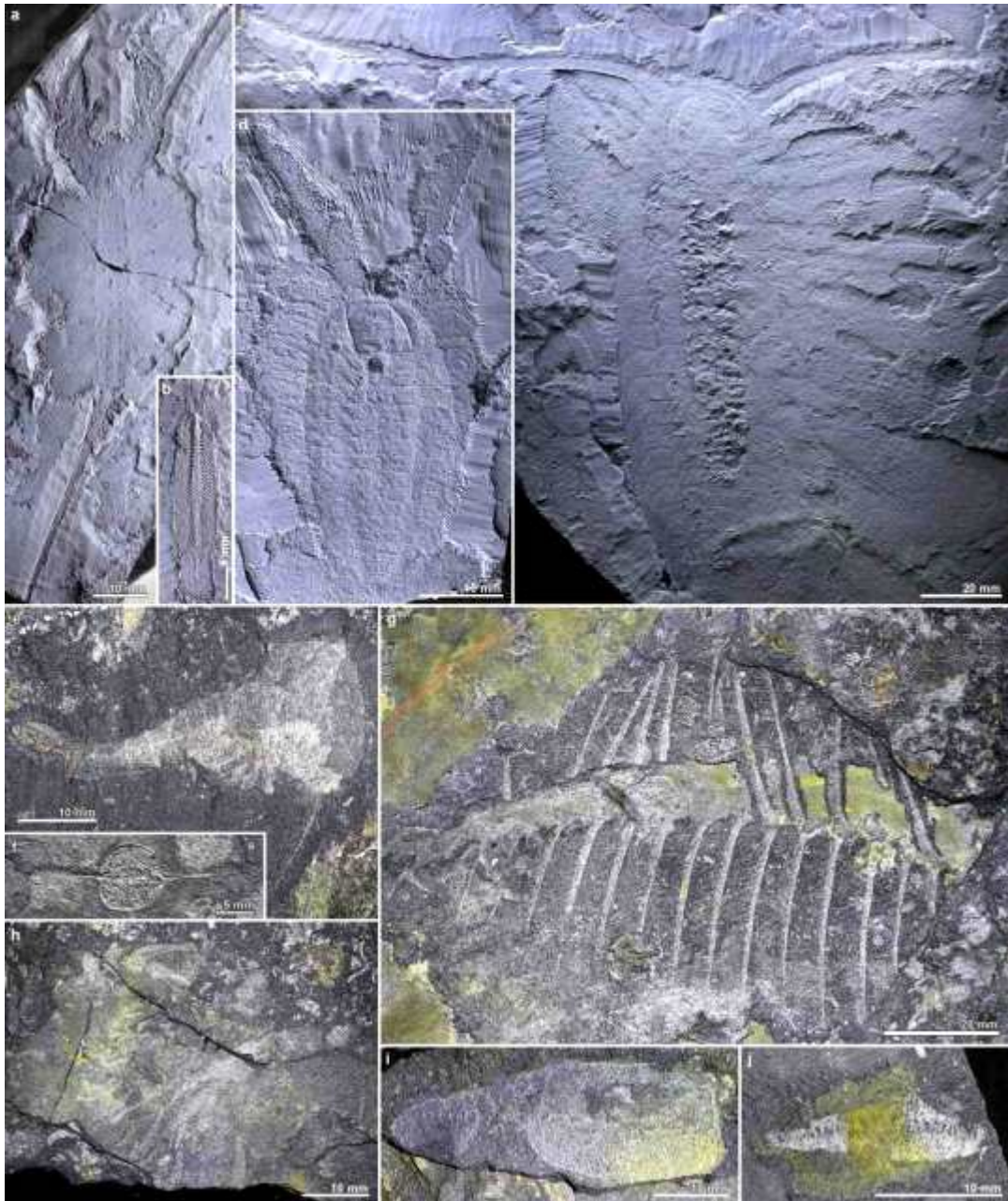


그림 19. Nektonic animals from the Buen Formation (Cambrian Stage 3), Sirius Passet, North Greenland. a, PTM image of *Kerygmachela kierkegaardii* (Budd, 1993), MGUH 32048a. b, PTM image of *Kleptothule rasmussenii* (Budd, 1995), SP-2017-903. c, PTM

image of *Siriocaris trollae* (Lagebro et al. 2009), SP-2017-839. d, PTM image of *Kiisortoqia soperi* (Stein, 2010), SP-2017-1601. e, *Pauloterminus spinodorsalis* (Taylor, 2002), under high-angle lighting, submerged in water, SP-2016-750. f, *Isoxys volucris* (Williams et al. 1996), under high-angle lighting, submerged in water, SP-2016-546. g, *Tamisiocaris borealis* (Daley & Peel, 2010), under high-angle lighting, submerged in water, SP-2016-8. h, frontal appendages of an amplexobeluid radiodont, under high-angle lighting, submerged in water, SP-2016-1170. i, *Ooedigera peeli* (Vinther et al. 2011), under high-angle lighting, submerged in water, SP-2016-115. j, incomplete specimen of an indeterminate chordate, under high-angle lighting, submerged in water, SP-2017-45.

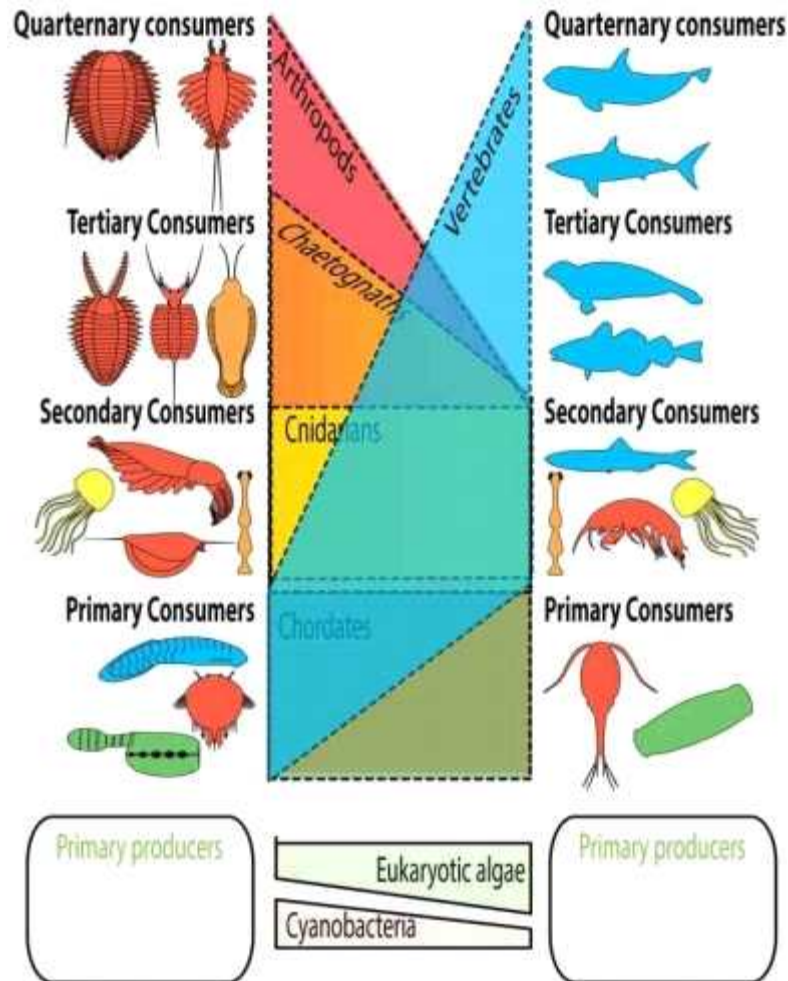


그림 20. 연구결과를 바탕으로 만든 캄브리아기 생태계와 현생 해양생태계의 동물군 비교. 지구상 최초로 등장한 캄브리아기의 생태계에서는 절지동물 및 모악동물이 먹이사슬의 상층부에 있고, 척삭동물은 하부에 위치했지만, 현생 해양 생태계에서는 척삭동물이 먹이사슬의 상층부로, 절지동물 및 모악동물은 하층부로 이동했음

- 캄브리아기의 새로운 원시 모악동물 발견을 통해 캄브리아기 생태계에서 각 동물군들의 먹이사슬에서의 위치를 재구성할 수 있고, 이를 현생 해양 생태계와 비교해볼 수 있음 (그림 20)

3.1.3. 북극 완족동물 형태 진화 규명

○ 북판게아 지역의 *spiriferellid* 완족동물 화석 형태 분석을 통한 진화 양상 규명

- 관련논문 *Journal of Systematic Palaeontology*에 게재
- *Spiriferellidae* 완족동물은 후기고생대의 대표적인 화석생물로, 후기 고생대시기에는 그린란드와 스피츠베르겐을 포함하는 판게아의 북쪽 *marginal shelf* 지역에 널리 분포

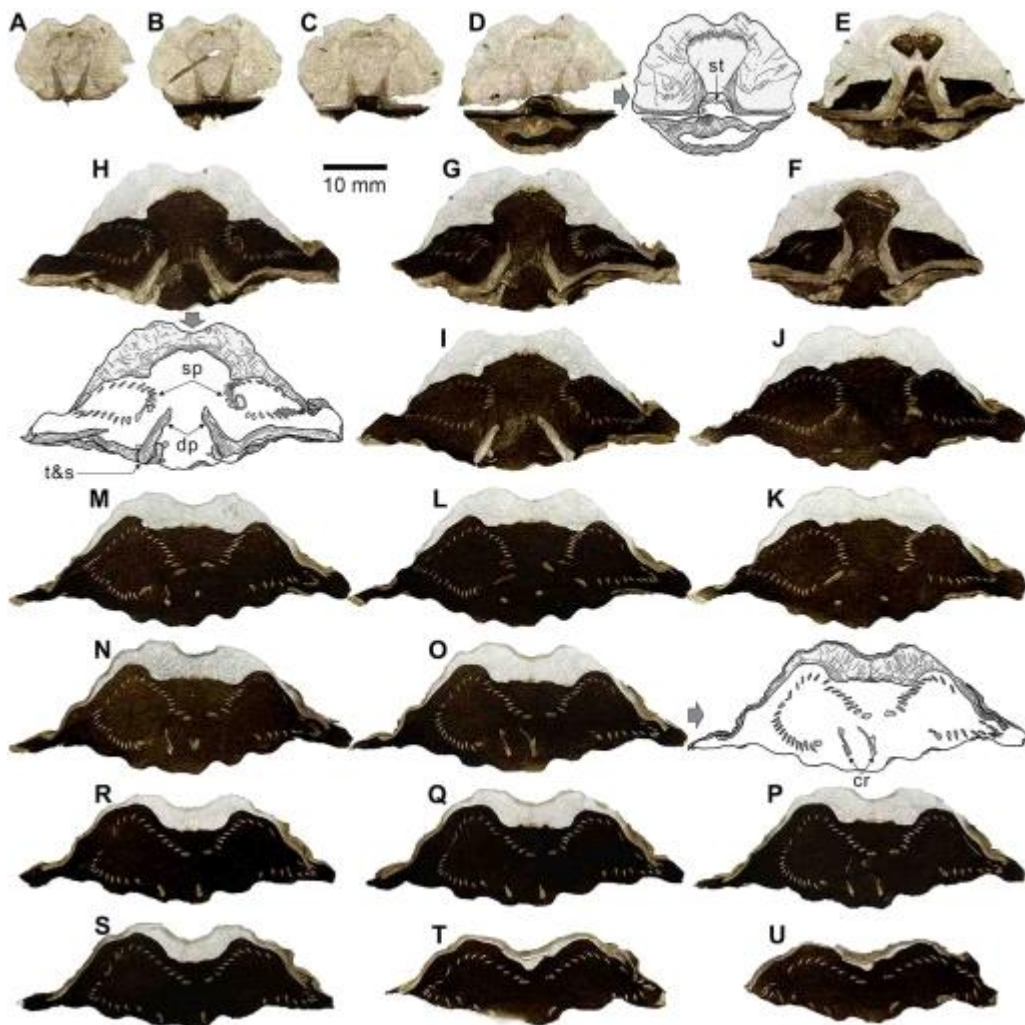


그림 21. MicroCT를 활용한 완족동물 *Spiriferella loveni*의 연속 단면 형태

- 후기 고생대 북극 일대의 완족동물들의 MicroCT를 활용한 내부형태 분석(그림 21) 수행
- 각 종별 형태 데이터 분석을 통하여 시기 북극 지역의 급작스런 수온 하강에 따른 형태 진화 양상 규명(그림 22)
- 같은 계통의 완족동물들이라도 그린란드와 스피츠베르겐에서 산출되는 개체들은 미세한 표면 구조의 차이를 보임을 밝힘

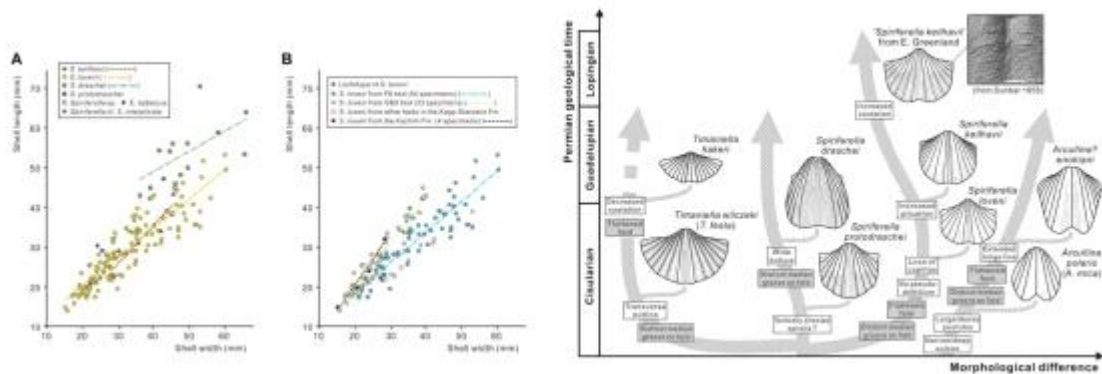


그림 22. (좌) A, *Spiriferella*와 *Eridmatus* 속에 속하는 완족동물들의 껍질 형태 데이터 비교 그래프. B, *Spiriferella loveni* 종 내의 변이 그래프. (우) 후기고생대 북극지역의 spiriferellid 완족동물의 진화 패턴

극지연구소

3.2 초기 동물 내부형태 분석

3.2.1. 북그린란드에서 산출되는 화석들의 EPMA원소분석

- 초기 동물화석들의 EPMA 분석 방법 확립

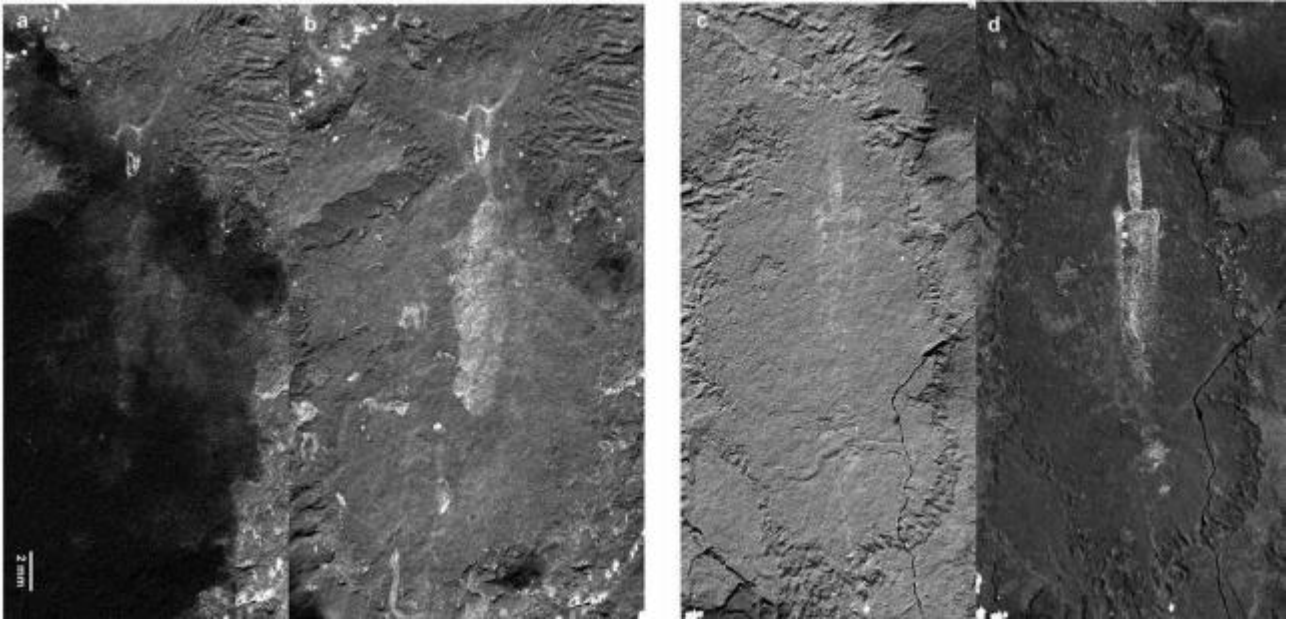


그림 23. EPMA 원소분석의 실패사례와 성공사례 비교. 기기 내에서의 분석을 위한 화석표면 기울기에 따른 분석 결과 차이. (c, d) 표면 분석을 위한 Au코팅의 두께에 따른 분석결과 차이.

- 극지연구소의 EPMA를 활용하여 최상의 WDX-ray elemental mapping 결과를 얻기 위한 최적의 조건을 찾아냄(그림 24)
- 북그린란드에서 산출된 초기 동물화석들의 EPMA 분석
- 여러 샘플의 WDX-ray 분석을 통해 원시절지동물 *Kerygmachela*의 신경이 썩어서 분해되는 과정(decay series)을 재구성(그림 24)
 - 특히, 가장 잘 보존된 샘플에는 그동안 완보동물만의 특성이라고 알려져왔던 ‘outer commisure’ 가 있는 것을 발견(그림 24a)
 - 완보동물에서 outer commisure가 nerve cord를 만나는 부분에는 두 번째 마디의 신경삭(ganglion)이 있는데 반해, *Kerygmachela*에서 outer commisure가 nerve cord를 만나는 부분에는 신경삭이 존재하지 않으며, 만나는 부분은 거대한 frontal appendage의 시작부분임
 - 이는 거대한 frontal appendage가 있는 부분이 완보동물의 첫 번째 및 두 번째 마디를 합친 부분과 대비될 수 있다는 것으로, 절지동물의 초기 진화에서는 첫 번째 및 두 번째 마디의 구분이 없었다는 것을 지시함
 - 이를 통해 100여년 넘게 풀리지 않는 Arthropod head problem을 어느 정도 풀 수 있을 것으로 예상됨

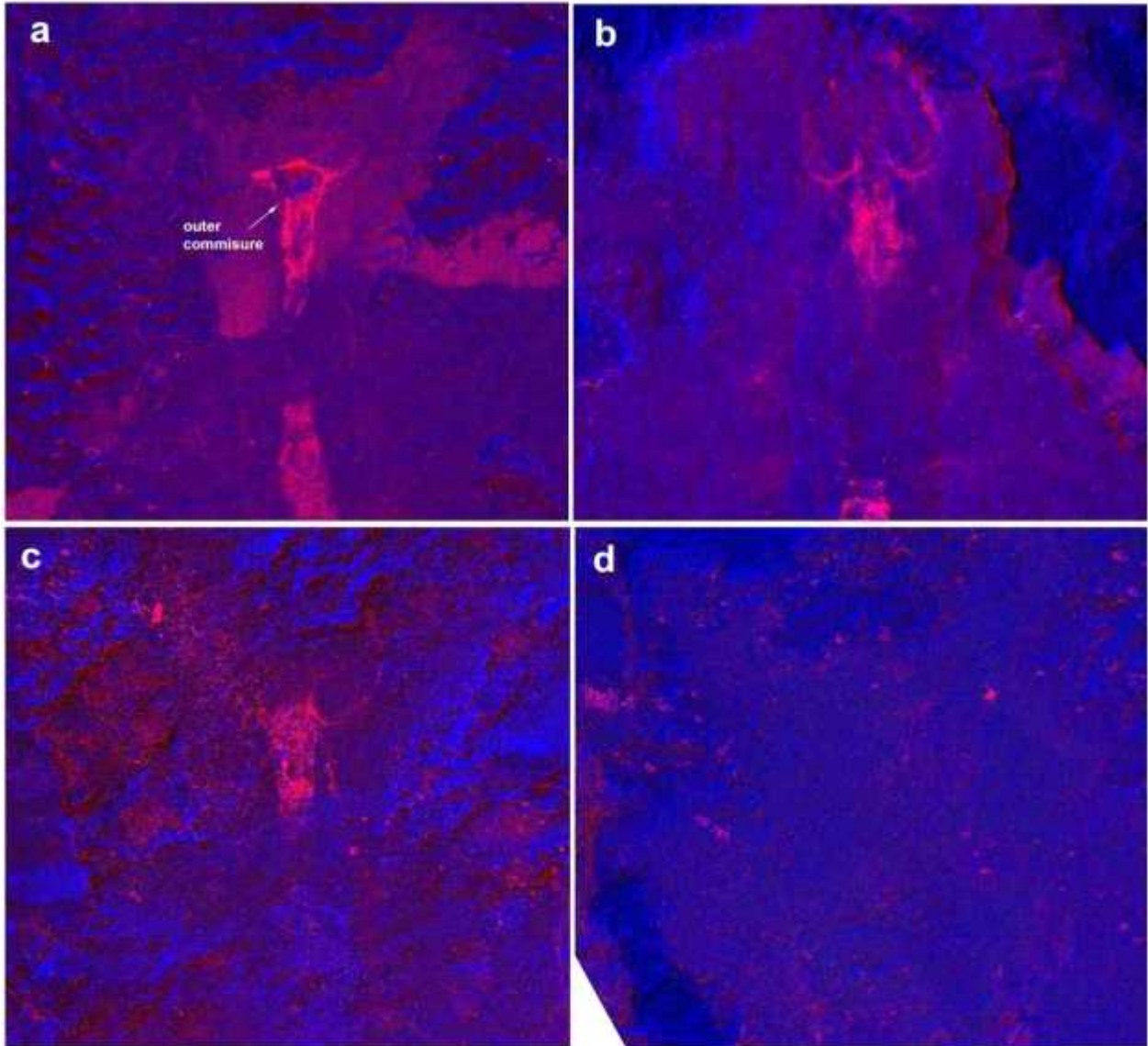


그림 24. Carbon elemental maps from WDX-ray analysis, showing a series of decay of the nervous system in the head region of *Kerygmachela kierkegaardi* from North Greenland. a, specimen with best-preserved brain. b, specimen in which the brain has undergone a slight degree of decay. c, specimen in which the brain has undergone a moderate degree of decay. d, specimen with almost no trace of brain.

- 원시후구동물로 추측되는 vetulicolian의 EPMA 분석(그림 25)
- 꼬리부분의 굵은 직선과 같은 신경으로 의심되는 구조가 척삭동물의 척삭과 유사성이 있음
- 추가 분석을 통해 신경의 미세 구조를 밝힐 예정

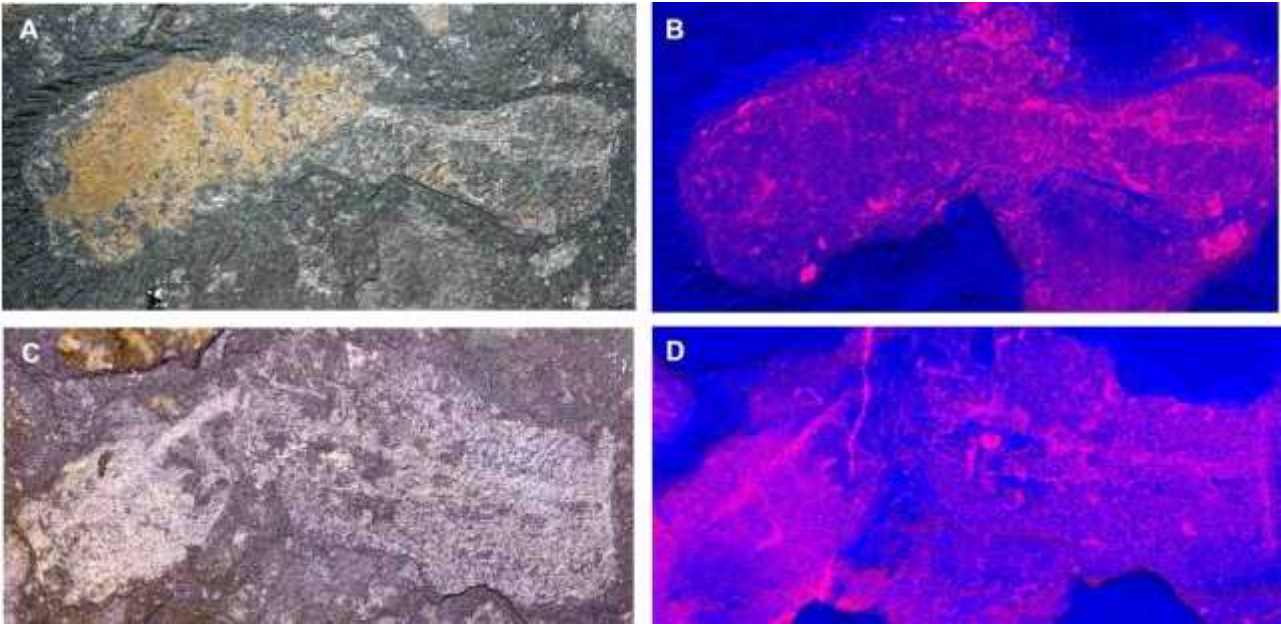


그림 25. 원시 후구동물(deuterostome)로 추정되는 vetulicolian 화석(A, C)의 WDX-ray carbon map 이미지(B, D).

- 초기 절지동물 *Kiisortoqia*의 antennae 쪽 신경이 보존된 시료의 WDX-ray 분석 완료(그림 26 A, B)
- 원시 절지동물 신종 *Aysheaia*의 WDX-ray 분석 완료(그림 26C, D)
- 근연관계가 불분명한 동물 그룹인 nectocaridid 신종 시료의 WDX-ray 분석 완료(그림 26E, F)

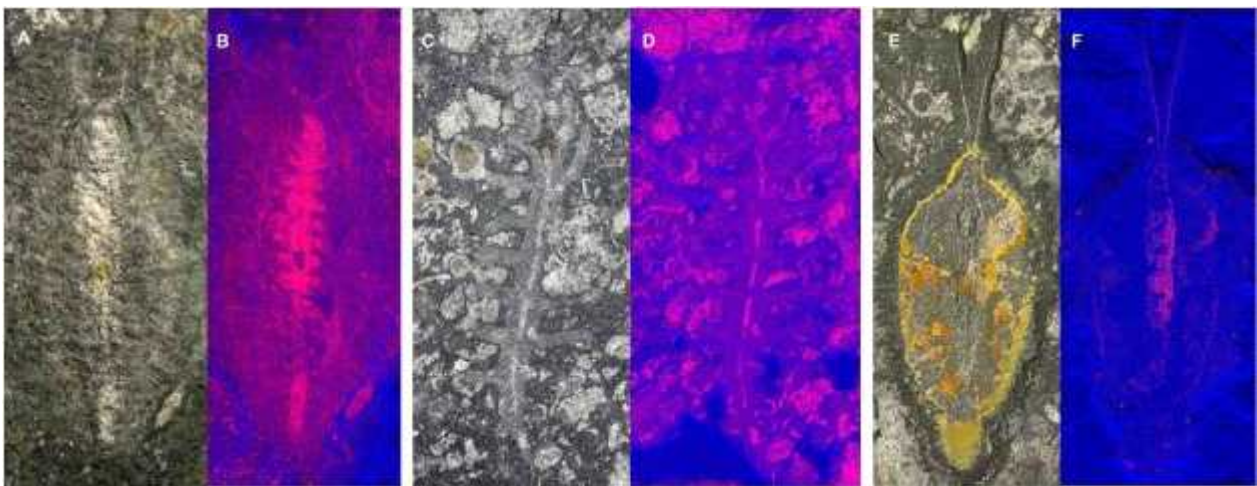


그림 26. A-B, 초기 절지동물 *Kiisortoqia*와 그 WDX-ray carbon map 이미지. C-D, 원시절지동물 신종 *Aysheaia*와 WDX-ray carbon map 이미지. E-F, 신종 nectocaridid와 WDX-ray carbon map 이미지.

○ 초기 동물화석들의 EPMA 분석 방법 추가 확립



그림 27. A 화석 뒷표면에 미세 톱으로 균열을 만드는 모습. B-C 균열이 가지 않은 화석의 앞표면 (B) 과 균열이 가 있는 뒷면 (C)

- 극지연구소의 EPMA 시료대 크기의 한계상 10 x 9 cm 이상의 화석시료는 기기 내 진입이 불가능하여 분석이 불가능했었으나, 화석 뒷면에 미세 톱 (극지연구소 운석연구실 설치) 을 이용한 균열 (crack)을 생성한 뒤 분할하여 2차례에 걸쳐 분석하는 방법을 찾아냄 (그림 27)

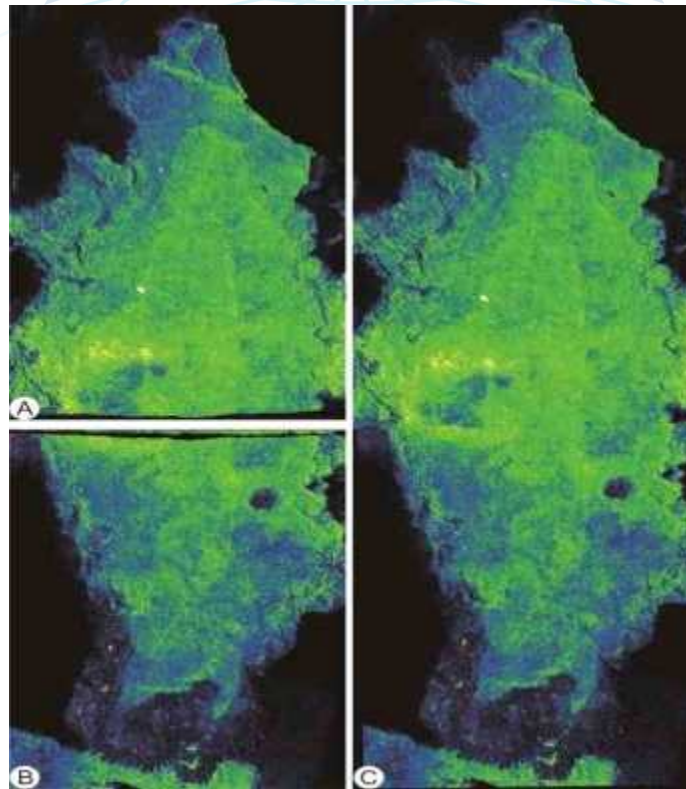


그림 28. A-B. 위 그림 2-2에서 분할한 화석 시료로 각각 2차례 분석한 WDS carbon map.
C. A와 B 사이의 틈을 잘라내고 연결한 WDS carbon map

- 화석 표면에 직접 균열을 내지 않으면서 분할하여 분석 시 화석의 손실을 최소화할 수 있음 (그림 28)
- 이와 같은 방법을 사용하여 시료대 크기보다 큰 화석 시료도 EPMA로 분석하여 WDX-ray elemental mapping 결과값을 얻을 수 있게 됨.

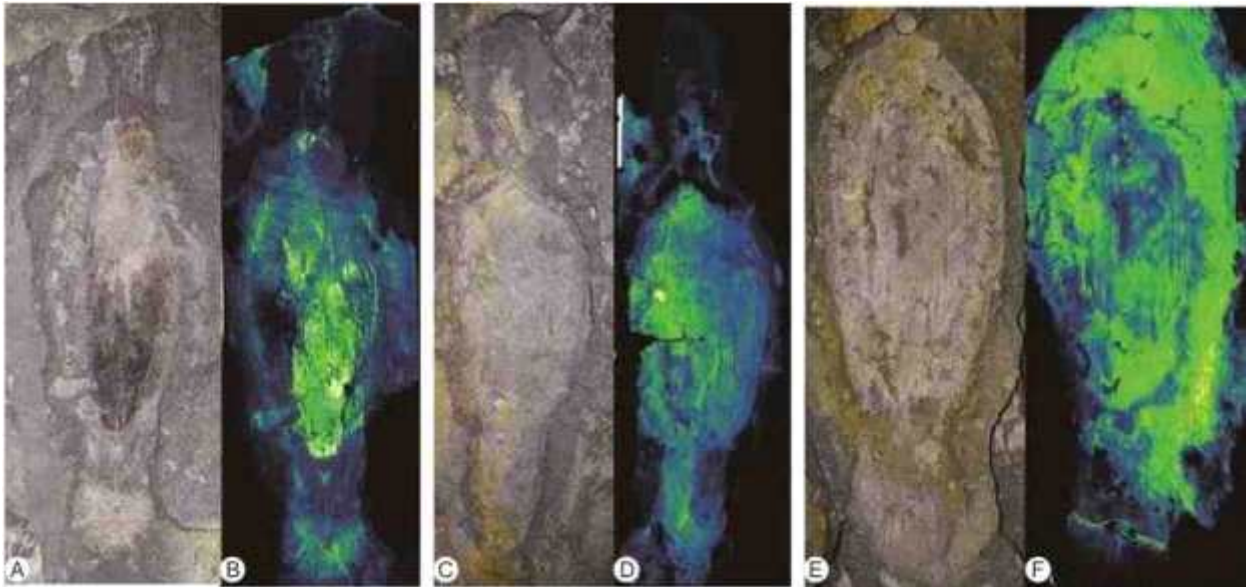


그림 29. A-F 몸체 형태 및 내부 세로 근육구조가 보존이 잘 된 편인 chaetognath 화석 사진 (A, C, E)과 WDX X-ray carbon map (B, D, F)

- 북그린란드에서 산출된 초기 동물화석들의 EPMA 분석
 - 2016-2017년간 Sirius Passet에서 채취한 여러 샘플들 중 화살벌레화석 chaetognath의 WDX-ray 분석을 진행(그림 29, 30, 31)
 - 특히, 가장 잘 보존된 샘플에는 지느러미 뿐 아니라 몸체 내부에 근육 구조처럼 보이는 형태도 드러남(그림 32)
 - 기존 연구에서 단순 large blue fish로만 언급되었던 이 초기 동물화석의 경우 몸체의 모양에 따라 크게 2가지로 나눌 수 있는 것으로 보임

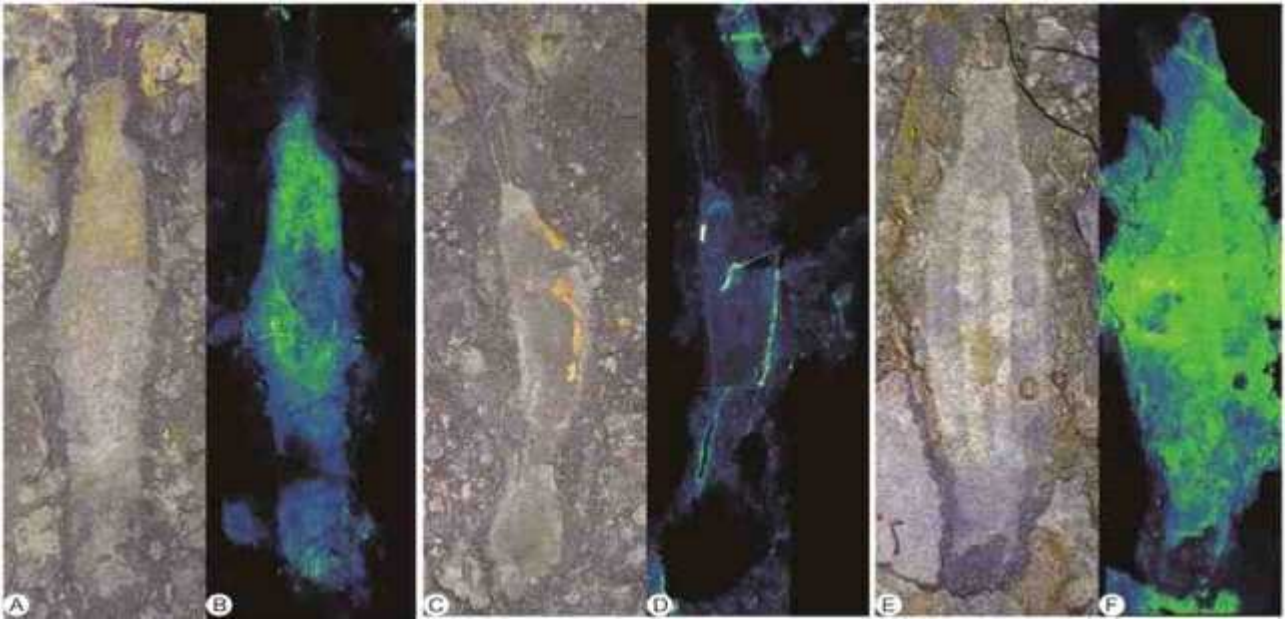


그림 30. A-F 생물체 내부 형태가 어느 정도 생분해가 진행된 chaetognath 화석들 (A, C, E)과 WDS carbon map (B, D, F)

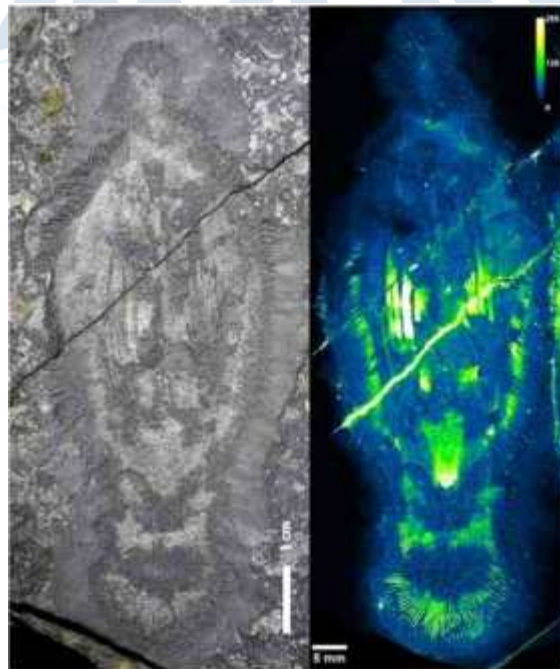


그림 31. 몸체 내부 세로 근육의 형태와 지느러미 모양이 가장 잘 드러난 화살벌레 화석 (좌측)과 그 EPMA X-ray mapping 탄소맵 이미지 (우측)

- 육안으로는 보존 여부가 확실하지 않은 몸체 내부의 세로근육 구조 (그림 31)를 WDS mapping을 통해 비교적 더 선명한 형태로 확인

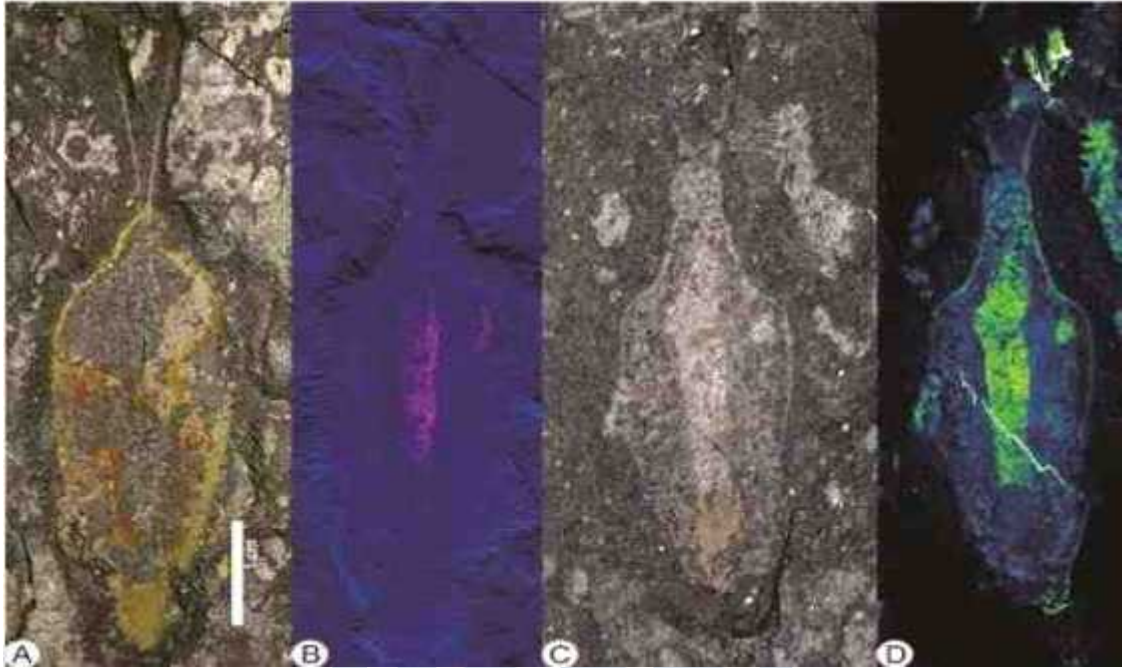


그림 32. A-D nectocaridid로 추측되는 화석 시료들과 EPMA 분석 결과. 각각 2016년 (A-B)과 2017년 (C-D)에 채취된 화석 시료

- EPMA 분석 결과를 해석하기 위해 현생 유사 생물 채집 시도 및 microCT 분석 등 다양한 수단을 병행 중
- 기존 해석에서 연체동물과 유연 관계가 있는 것처럼 해석된 nectocaridid의 EPMA 분석이 수행됨(그림 33)
- 분석 결과 연체동물보다는 오히려 chaetognath 혹은 절지동물과 생물학적 관계가 있는 것처럼 보임
- 특히 해당 초기 동물은 지난 연차의 EPMA 분석 시에도 주목되었던 종류로 지난 WDS 분석 자료 (그림 32)와 비교할 수 있는 유사한 형태의 추가 시료들의 정밀 분석이 요구됨.
- 이 화석 생물의 생물학적 분류군을 바로잡기 위하여 2017년 및 2018년에 채취한 화석 시료들 중 몸체 내부 구조가 잘 보존된 nectocaridid 시료들을 추가 선별하여 미세구조를 밝힐 예정

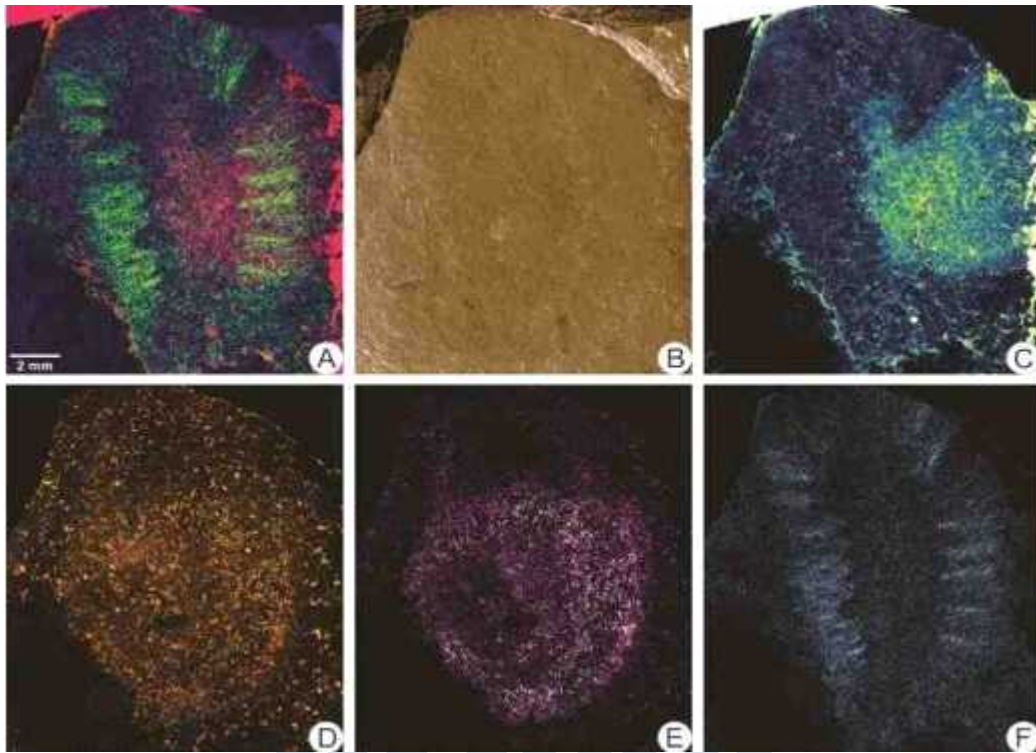


그림 33. A-F 다모류 (polychaete) 화석의 EPMA 분석 결과. A. 탄소 (C), 티타늄 (Ti) 원소맵과 화석 자체의 높낮이 (topo) map을 합성한 map. B. SEI 이미지. C. 탄소맵 (C) 이미지. D. 철 (Fe) 이미지. E. 황 (S) 이미지. F. 티타늄 (Ti) 이미지.

- 다모류 polychaete의 섬모 (bristle) 부분이 보존된 시료의 WDS-Xray 분석 완료 (그림 33).
- 기존 EPMA 분석 결과에서는 주로 몸체의 형태와 내부 근육 구조에 집중하였기 때문에 탄소맵 (C)을 주 결과로 채택하여 해석하였으나 다모류 화석의 경우 섬모 부분은 탄소 대신 티타늄 (Ti)이 특이적으로 많이 관찰됨. 일반적으로 다모류 화석 자체 뿐 아니라 다모류의 섬모 역시 부드러운 부분으로 거의 화석화되지 않음.
- 이와 같은 결과를 바탕으로 차후 초기 동물 화석들 분석 시 탄소맵 뿐 아니라 다양한 원소맵 분석을 시도해 볼 수 있으며 현생 다모류와 비교하여 어떤 성분이 화석화될 수 있는지에 대한 단초를 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- EPMA에서만 얻을 수 있는 WDS 원소맵의 경우, 초점을 z축 길이로 설정하여 초점과 동일 평면상에 있는 상만 선명하게 얻을 수 있음. 이는 연마된 박편을 분석하는 데는 유용하나, 자연 상태에서 표면에 굴곡이 있는 생물화석의 원소맵을 얻고자 할 경우 특정 부분은 포기해야 했음
- 2019년에 분석한 시료들의 경우, 분석 범위와 초점길이를 다양화하여 동일한 화석을 여러 번 스캔한 후, 후처리 과정에서 최상의 결과들을 결합하여 하나의 원소맵 이미지로 활용할 수 있게 함 (그림34). 특히 분할 분석기법을 향상시켜 연결된 이미지의 손실을 최소화

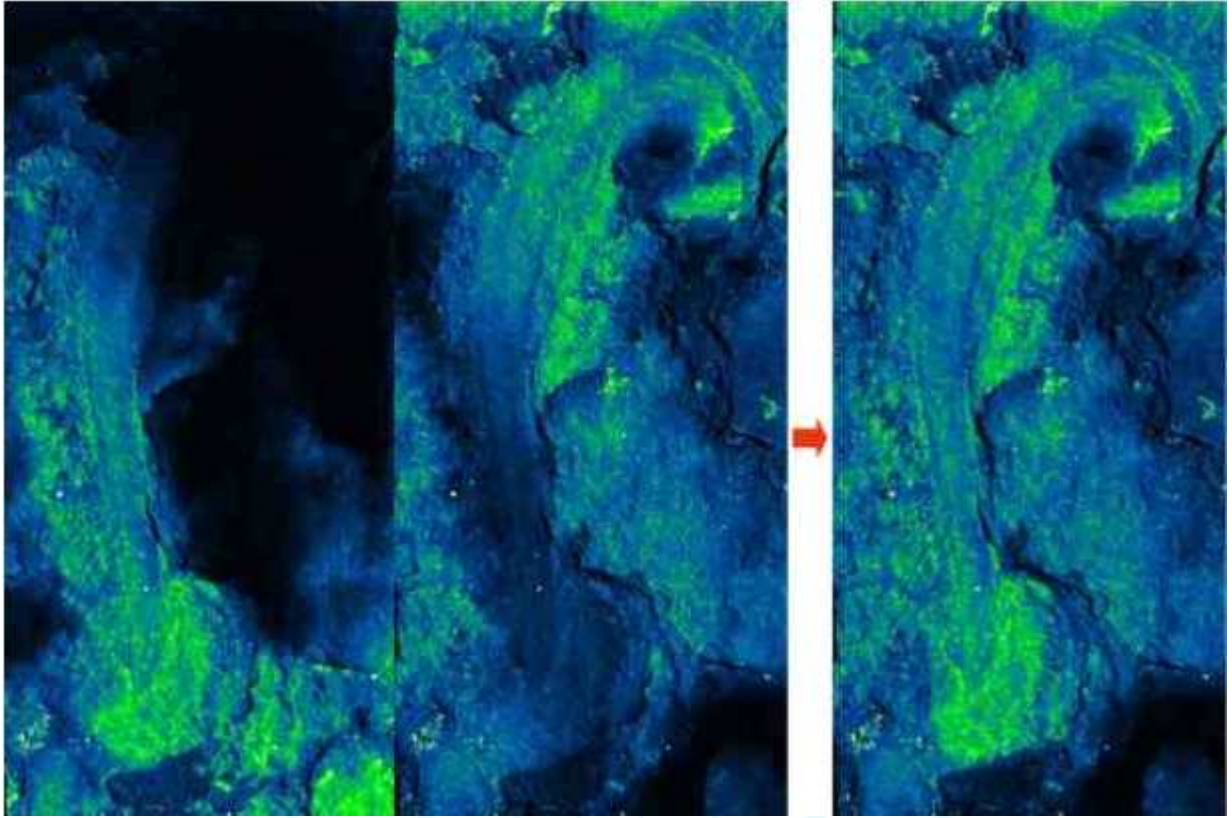


그림 34. 생물 자체에 굴곡이 있었던 화석의 WDS carbon map. 각각 분석 초점거리를 다르게 맞춰 동일 영역을 스캔한 후 하나의 carbon map으로 연결함

○ 북그린란드에서 산출된 초기 동물화석들의 EPMA 분석

- 2017-2018년간 Sirius Passet에서 채취된 화석 중 chaetognath의 WDX-ray 분석 진행 (그림 35)
- 특히 새로 분석한 화석들은 기존에도 관찰되었던 세로근육과 지느러미 뿐 아니라, 신경계나 정소로 추정되는 부분도 탄소맵에서 확인 가능 (그림 35b)
- 현생 생물과의 해부학적 구조를 비교 관찰하기 위해 모악벌레들을 채집, 몸체를 염색하여 microCT 촬영을 실시하기도 함

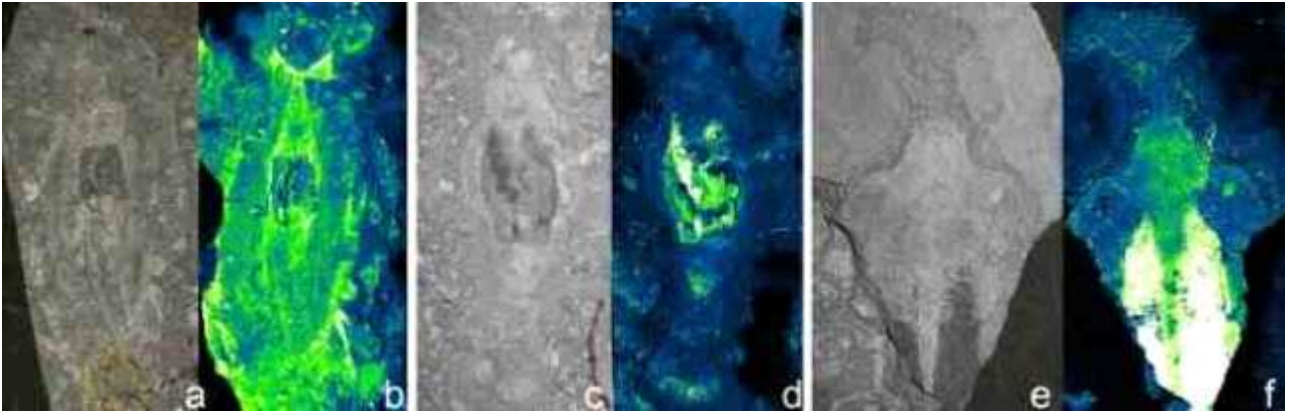


그림 35. 2017-2018년에 Sirius Passet에서 채취한 초기 모악동물 화석의 WDS 탄소맵 이미지. 원소맵 스캔 시 내장 부위가 광물화된 시료(a-d)와 세로근육구조가 두드러지는 시료(e-f)의 두 가지 유형으로 나뉨

- 2018년에 발표한 논문에 포함되지 않은, 새로운 형태의 원시 절지동물 *Kerygmachela* 화석들 분석(그림 36)
- 전년에 관찰했던 *Kerygmachela*와 안테나 형태나 몸체와의 각도 등의 차이점을 확인
- 특히 화석의 외곽형태 뿐 아니라 내장이나 신경계 등의 육안으로는 잘 확인되지 않는 내부 구조를 파악할 수 있는 이미지들을 획득

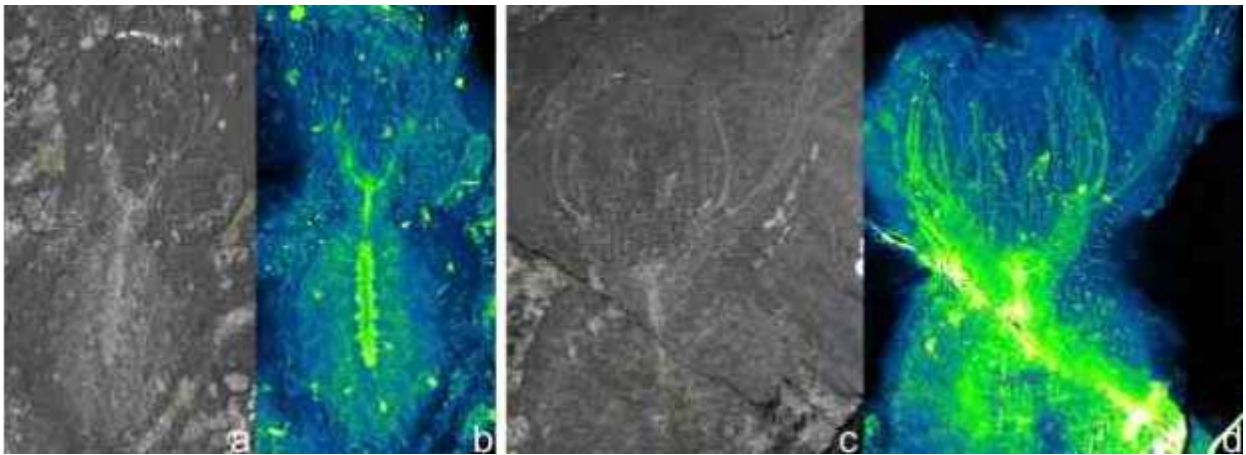


그림 36. 2017년-2018년에 Sirius Passet에서 채취한 원시 절지동물 *Kerygmachela*의 WDS 탄소맵 이미지. 머리 부분의 인두(pharynx) 위치에서 특히 탄소 성분이 집적되어 있음

- 그 외에도 현재까지의 Sirius Passet에서 보고된 적 없는 독특한 형태의 초기동물들의 이미지들 획득 (그림 37)
- 캄브리아기의 특성상 다양한 형태의 초기동물들이 아직도 제대로 발견되지 않았을 수 있기에, 이러한 독특한 동물들은 새로운 종 혹은 속으로 명명될 수 있음

- 이미 알려진 동물들도 보존 방법이나 환경에 따라 다른 형태처럼 보이는 경우도 있으므로 원소맵 이미지를 바탕으로 추가적인 해부학적 비교연구가 필요

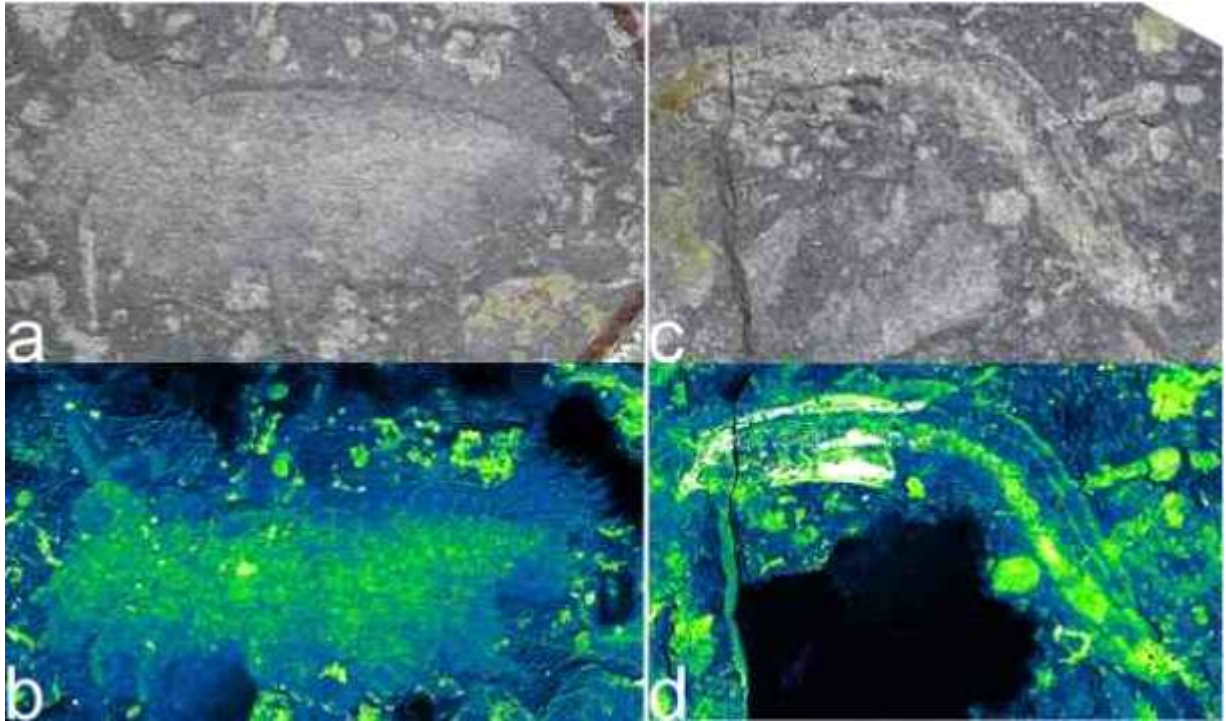


그림 37. 미동정 상태의 Sirius Passet 산출 초기동물들의 화석과 WDS 탄소맵 이미지

- 북그린란드 Sirius Passet의 특성을 연구하기 위해 해외 화석산지의 연구자들과 협업
- 특히 중국의 Chengjiang, Qingjiang 및 Kaili biota들을 주도적으로 연구하고 있는 그룹과 협력하여, 각 화석산지와 비교하여 Sirius Passet의 특성을 규명하기 위한 화석 시료들을 획득, EPMA 분석을 실시(그림 38)
- 그 결과 Sirius Passet뿐 아니라 유기물 필름으로 보존된 타 화석산지의 화석들도 EPMA 분석기법을 적용할 수 있음을 확인
- 차후 해당 화석과 암석들에 포함된 화학성분 분석을 병행하여 Sirius Passet의 원시환경을 규명하는 연구에도 EPMA를 활용하고자 함

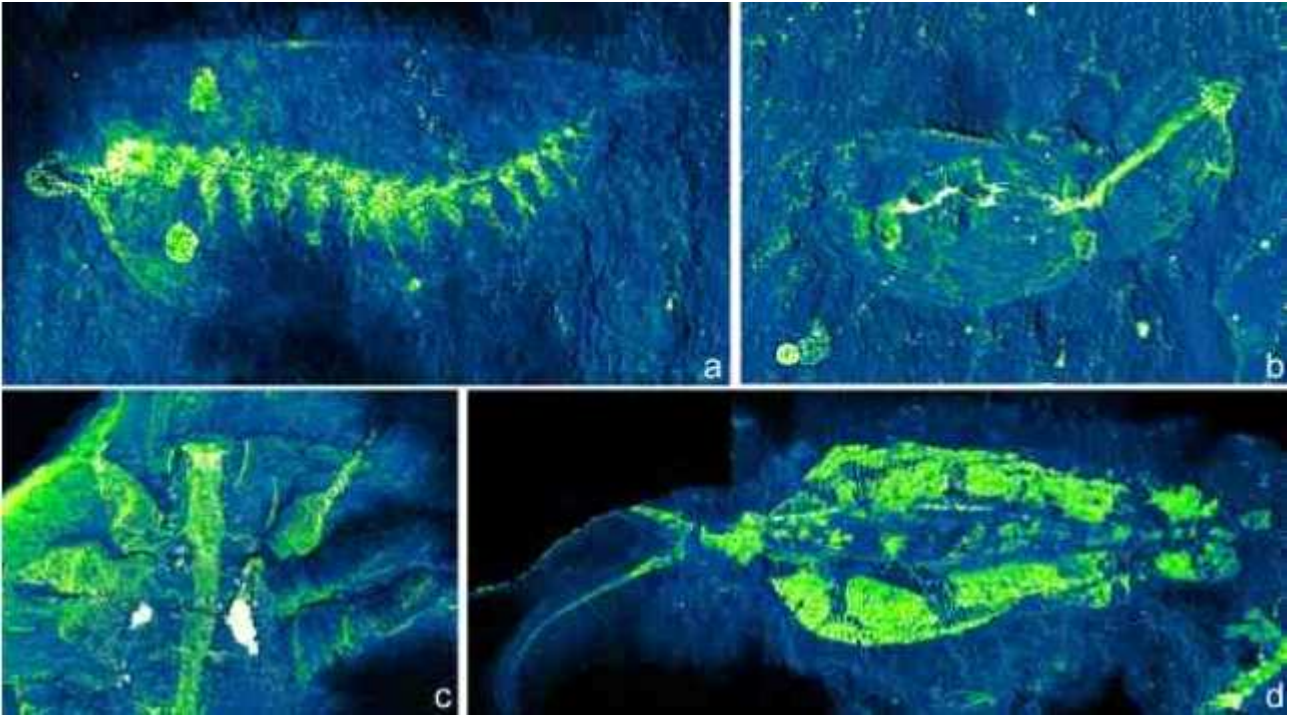


그림 38. 여러 화석 산지들에서 산출된 초기동물들의 WDS 탄소맵 이미지. a)중국 Chengjiang의 *Isoxys* 화석. b)중국 Kaili의 *Sicyophorus* 화석. c)중국 Qingjiang의 lobopodian 화석. d)북그린란드 Sirius Passet의 nectocaridiid 화석.

3.2.2. 화석의 MicroCT 분석 방법 확립

○ Micro CT를 활용한 화석 내부구조 분석 방법을 찾기 위하여 장기적으로 진행해오던 북극 후기고생대 완족동물 분석 논문이 *Palaeontologia Electronica* (IF 1.400, JCR Ranking 23/54)에 게재

북

- 최상의 MicroCT 분석 결과는 주변 matrix와 shell 간의 밀도차이가 가장 큰 캐나다의 북극에서 산출된 샘플에서 볼 수 있음(그림 39)

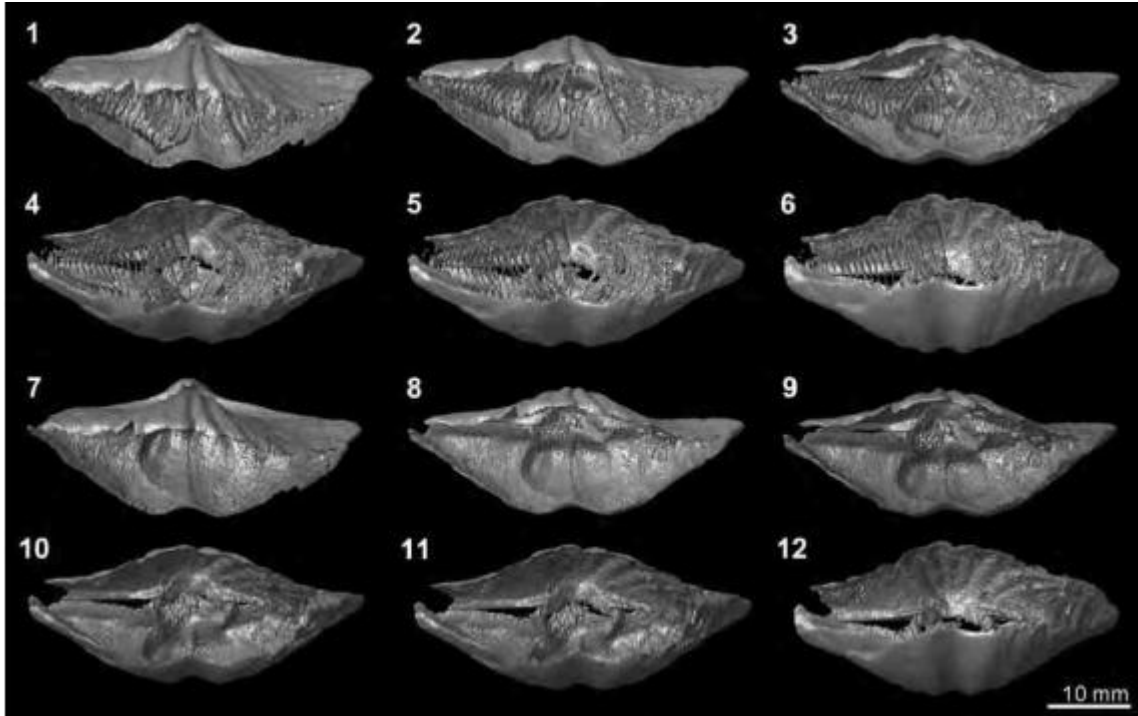


그림 39. Three-dimensional reconstruction model of internal shell structures of *Timaniella harkeri* (GSC26406). (1-6) Dorsal and anterior views of the whole shell interior through posteriorly continuous rotation. (7-12) Dorsal and anterior views of shell interior without spiralia through posteriorly continuous rotation.

- 특히, Cathodoluminescence 분석방법을 이용해 주변 퇴적암의 속성작용 차이가 밀도차이에 큰 영향을 주는 MicroCT의 분석 결과에 큰 영향을 미친다는 것을 규명(그림 40)

X-ray beam										
Sample	(keV)	(μA)	Resolution (μm/line)	Exposure (ms)	Relative step (°)	Nb. of projections	Shell mineral composition	Nature of material inside of valve	Cathodoluminescence of brachiopod shell*	Degree of visibility of shell internal structures in XMT images
GSC26406*	89	112	31.82	316	0.70	271	calcite	sandstone	NL, partly SL	All internal shell structures distinctly defined, Figures 3, 13, 14
BS-1	85	118	26.98	316	0.70	275	calcite	calcite cement	SL	Dental structures and median septum well recognized, Figure 7
BS-2*	78	125	34.58	474	0.90	209	calcite	quartz cement	L	Dental structures (spondylium) recognized, Figure 4
ML32	100	100	24.90	316	0.90	214	calcite	mixed carbonate-silicate	SL	Shell articulation and cardinal structure recognized, Figure 5
TeP*	88	112	31.82	316	0.70	271	calcite	mixed carbonate-silicate	NL, partly SL	Dental structures poorly detected, spiralia partly recognized, Figure 6
3229*	78	125	34.58	474	0.70	269	calcite	lime mudstone	SL	Dental structures well defined, but having possible mock structures, Figure 8
CD*	88	112	32.85	474	0.90	209	calcite	wackestone	L	Dental structures weakly detected, Figure 9
S1	100	100	34.58	474	0.90	209	calcite	packstone	NL, partly SL	Dental structures not sharply bounded, but distinctly recognized, Figure 10
F8*	100	100	34.58	474	0.90	209	calcite	grainstone	SL, partly L	No traces of internal structures
Q-1*	80	124	34.58	474	0.90	209	silica	microcrystalline quartz	L	Dental structures poorly and partly recognized, Figure 11
Q-2	80	124	34.58	474	0.70	269	silica	quartz cement		Cardinal structures and muscle scars distinctly defined, Figure 12

*An additional specimen has been thin sectioned for CL analysis

*NL, SL and L indicate nonluminescent, slightly luminescent and luminescent, respectively

그림 40. Summary of XMT setting, nature of brachiopod shells and their infillings, CL results of brachiopod shells, and quality of XMT images.

- 따라서 내부 형태를 알아보기 위한 가장 뛰어난 분석결과를 보이는 조건은 화석이 속성작용을 거의 받지 않은 상태에서 껍데기는 calcite로, 껍데기 내의 matrix는 공극이 많은 sandstone으로 되어서, 서로 큰 밀도차이를 보이는 경우임을 밝힘(그림 41)

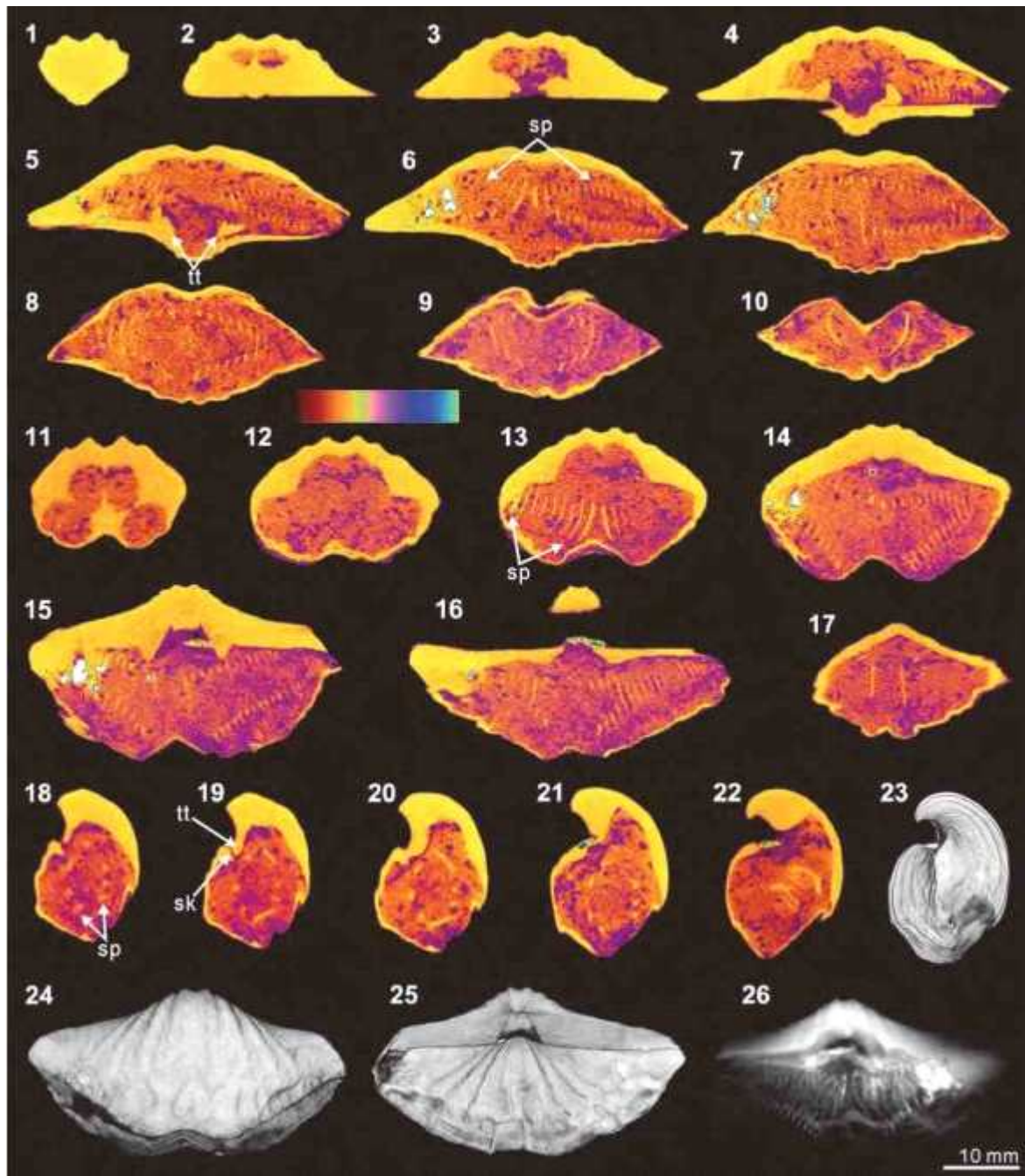


그림 41. XMT result of *Timaniella harkeri* (GSC26406). (1-10) Serial slices in the coronal plane (from posterior to anterior). (11-17) Serial slices in the transverse plane (from ventral to dorsal). (18-22) Serial slices in the sagittal plane (from lateral to middle). (23-25) Lateral, ventral and dorsal views of the reconstructed 3-D model (external shell). (26) Ventral view of the 3-D model in transparent mode. All the slice images were obtained under false-color lookup tables (Color 2 option in DataViewer). Abbreviations: tt, teeth; sp, spiralia; sk, socket.

3.2.3. Sirius Passet 화석 보존 상태를 규명을 위한 비교 분석

○ Sirius Passet의 화석 보존상태 비교분석 연구를 위한 중생대 세일 화석 분석 및 논문 게재 확정

- Park, T.-Y., Nam, K.-S. & Selden, P.A. (accepted) A diverse new spider (Araneae) fauna from the Jinju Formation, Cretaceous (Albian) of Korea. *Journal of Systematic Palaeontology*.

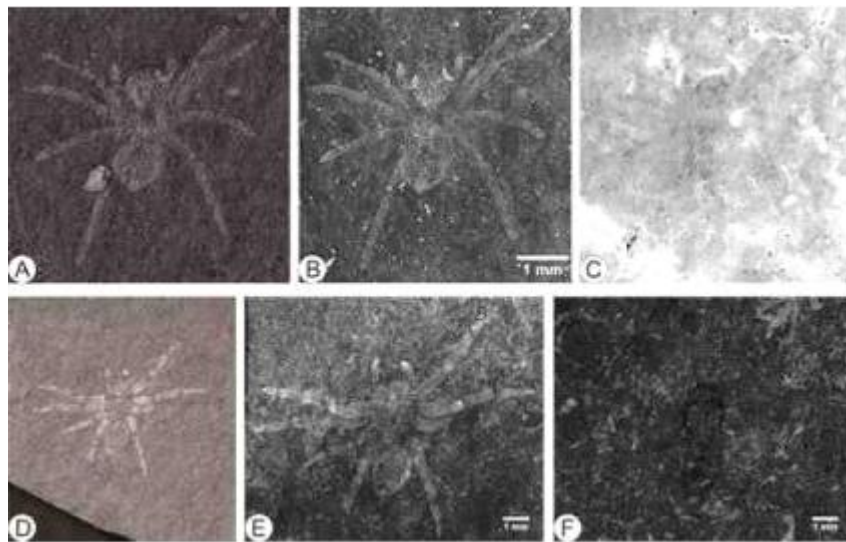


그림 42. A-F 진주층에서 발견된 2 종류 (A-C, D-F)의 중생대 거미화석. A-C. 거미화석 1을 에탄올에 넣고 촬영(A), 탄소맵 이미지 (B) 및 COMPO 맵 이미지 (C). D-F. 거미화석 2를 에탄올에 넣고 촬영 (D), 탄소맵 이미지 (E), 황 원소맵 이미지 (F)

- 진주층에서 발견된 10여개의 거미 화석들 중 머리, 다리 마디, 송곳니 등이 잘 보존된 2개 시료를 선별하여 EPMA 분석 완료 (그림 42)
- 이 중 1개 시료의 탄소맵에서 머리 부분에 반달 형태의 구조가 보존되어 있는 것을 확인, 해당 부분의 포인트 분석 결과 다량의 탄소 및 소량의 티타늄이 밀집된 것으로 확인
- 다른 1개 시료의 맵에서 몸체 부분에서 다량의 황 원소 밀집이 발견
- 거미 화석 시료 분석 결과 북그린란드 Sirius Passet의 연질화석들과는 달리 상기한 탄소, 황, 티타늄 이외의 원소들이 거의 보존되지 않았음을 확인

3.3 현생 무척추동물 및 다른 지역의 캄브리아기 초기 동물 화석들과 비교연구

3.3.1. 캄브리아기 초기 동물들과의 형태 비교를 위한 현생 무척추동물 채집

- 북그린란드에서 완보동물 및 여러 담수/육상 무척추동물 채집
 - 현재까지 이끼시료와 물시료에서 적어도 4종 이상, 30개체 이상의 완보동물 채집
 - 분류학적으로 완보동물은 크게 네 개의 목으로 구성이 되어 있는데, 이번 현장조사에서 해양 서식 완보류를 제외한 육상 서식하는 세 목의 완보동물 모두 채집할 수 있었음
 - Sirius Passet 지역이 완보동물 분류 및 형태 비교 연구에 적합하다는 것을 보여줌
 - 이 외에도 윤형동물 (Rotifer), 선형동물 (Nematode), 무갑류 (Anostracan) 등도 채집 (그림 43)

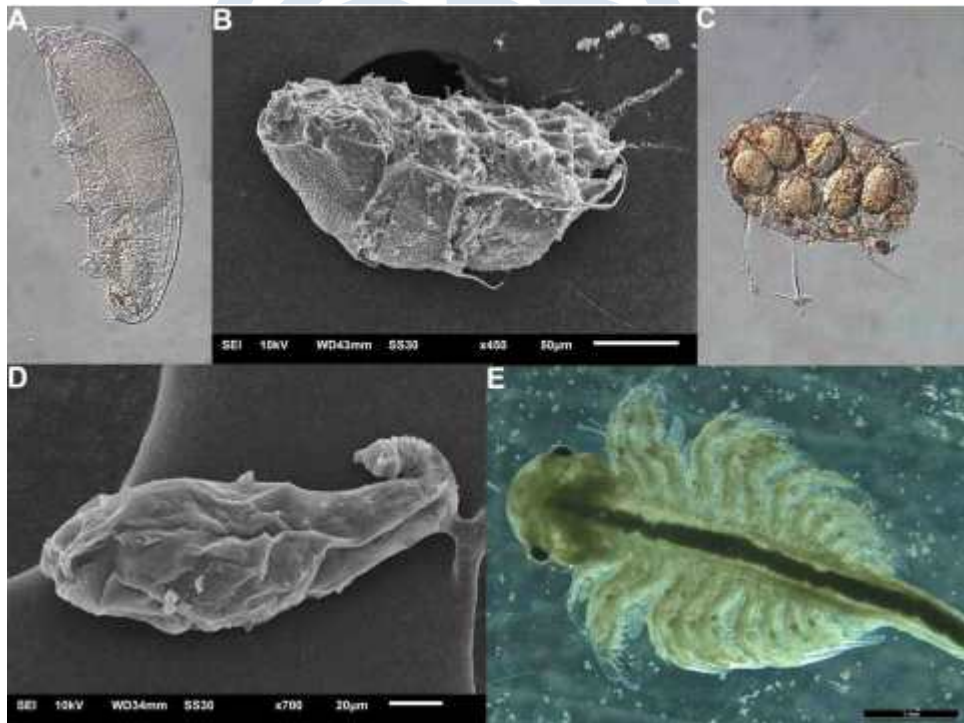


그림 43. 북그린란드에서 채집한 여러 무척추동물. A, B, C, 완보동물. A, Order Parachela, B, C, Order Echiniscoidea. D, 윤형동물. E, 절지동물 (무갑류)

- 북극 보퍼트해에서 해저 무척추동물 채집
 - 아라온 북극 2항차에 참여하여 보퍼트해 무척추동물 채집
 - 이 곳은 가스 하이드레이트가 매장되어 있을 것으로 추정되는 곳으로, 메탄-황을 이용하

는 특수 생태계 존재

- 무인탐사정 (ROV)를 이용하여 100 ~ 1000M 수심의 해저 바닥 탐사하며 환형동물, 태형동물, 극피동물, 절지동물 등을 획득 (그림 44)
- 박스코어를 통해 해저 퇴적물 시료 획득 및 통발을 이용하여 화살벌레 채집
- 특히, 이번 그린란드 현장조사를 통해 캄브리아기때 살았던 초대형 화살벌레 화석을 채취하였기 때문에, 현생 화살벌레와의 형태비교 연구가 가능



그림 44. 북극 보퍼트해에서 채집한 여러 무척추동물. A, B, C, 환형동물. D, 태형동물. E, 끈벌레. F, G, 절지동물 (옆새우류). H, I, J, 극피동물. K, L, M, 화살벌레. N, ROV가 채집한 암석 시료. O, 퇴적물 시료.

3.3.2. 형태 비교 연구를 위한 현생 완보동물 시료 제작 및 배양시스템 확립

- 현생 완보동물의 현미경 관찰을 위한 시료 제작 방법 확립
 - 완보동물은 그 크기가 작아 형태연구에 주로 미분간섭대비현미경 (DIC)와 주사전자현미

경 (SEM)이용

- 이를 위해서는 시료 제작이 매우 중요
- 다른 동물군의 시료 제작 방법을 참고하여 여러 방법을 시도, 그 중 제일 효과적인 방법을 찾음
- DIC 현미경 시료의 경우, 글리세롤에 소량의 젓산을 넣어 50℃ 오븐에서 고정을 하면 불투명하던 완보동물 몸이 투명해지며 분류에 중요한 입-인두 기구 구조 관찰이 용이해졌으며 또한 HS Slide를 사용하여 한쪽면 밖에 볼 수 없었던 기존과 다르게 위-아래 양쪽 면 관찰이 모두 가능해짐
- SEM 시료의 경우에는 완보동물을 오븐에 넣고 60 ~ 70 ℃로 온도를 올려 죽인 후 에탄올로 탈수
- 이 방법은 완보동물을 삶아 단백질 변형을 일으켜 몸을 단단하게 만들어 이후 시료 제작과정에서 발생할 수 있는 형태변형을 막아줌
- 이후 임계점건조법 (Critical point drying method)으로 건조 후 금코팅
- 이를 통해 기존보다 높은 성공률로 시료 제작 가능해짐 (그림 45)



그림 45. DIC 현미경과 SEM 관찰을 위한 완보동물 시료 제작. A, 글리세롤에 젓산을 넣어 고정한 시료. B, SEM 관찰을 위해 제작한 시료. C, DIC 현미경 관찰을 위해 제작한 시료.

○ 현생 완보동물 연구를 위한 배양 시스템 확립

- 형태 및 이후 발생 연구를 위해 안정적인 배아 공급이 중요, 때문에 실험실 내 배양 시스템 확립 필요
- 일본 극지연구소 (NIPR)에서는 남극 쇼와기지에서 채취한 완보동물을 실험실 내에서 배양 중이어서 방문하여 기술 습득

- 이 기술은 **Bacto agar** 배지 위에 완보동물을 키우며 먹이를 공급하는 것이 핵심인데, 이렇게 되면 기존의 퇴적물 배양보다 완보동물 관찰과 알 (배아) 획득이 간편 (그림 46)
- 시험적으로 우리나라에도 분포하는 *Hypsibius dujardini* 종에 적용해 보았고, 성공적으로 정착하였음
- 현재 남극 킹조지섬 세종기지 부근 담수호에서 채집된 완보동물에 적용 시도 중



그림 46. 실험실 내 극지 완보동물 배양시스템 구축. A, 일본 극지연구소 (NIPR)의 극지 완보동물 배양시스템. B, 극지연구소 내 완보동물 배양시스템. C, 극지 완보동물 배양 페트리디쉬

3.3.3. 극지에서 채집한 현생 완보동물 형태 분석

○ 북그린란드 Sirius Passet 일대 현생 완보동물 시료 획득 및 동정

- 극지에서 채집한 현생 완보동물 형태 분석을 위한 당해연도 목표는 북그린란드 Sirius Passet 일대에서 100개체 이상의 완보동물을 채집
- 2018년도 여름 현장조사에서는 완보동물을 채집하기 위해 담수 시료, 이끼/지의류 시료에 더해 빙하의 **cryoconite hole** 시료를 획득.
- 담수 시료의 경우에는 현장에서 에탄올이나 포르말린으로 고정
- 이끼 시료는 이전과는 달리 건조시키지 않고 채집한 그대로 지퍼백에 넣어 가지고 옴
- **Cryoconite hole**의 경우, 완보동물 중에는 빙하의 **cryoconite hole**에서만 서식하는 완보동물도 존재하기 때문에 Sirius Passet 일대 앞바다의 빙하 위에 올라가 **cryoconite hole**의 퇴적물과 물 시료를 획득(그림 47)

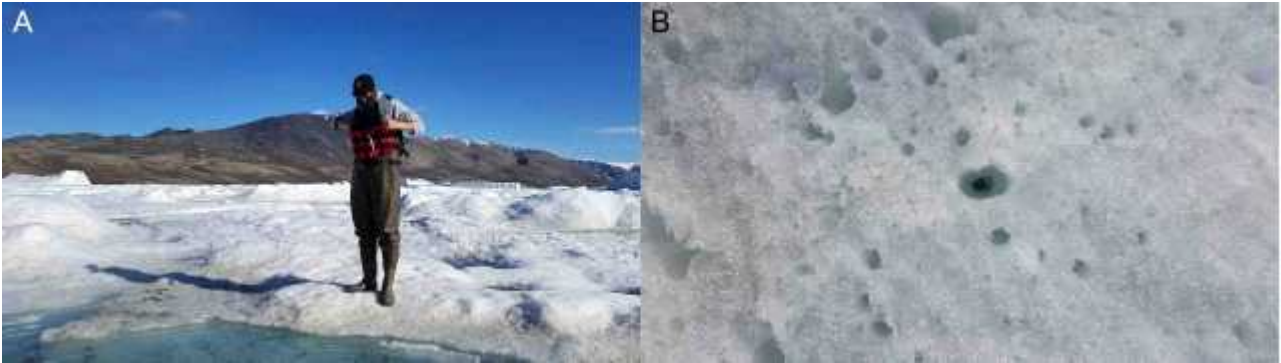


그림 47. 바다 위 빙하의 Cryoconite hole에서 완보동물을 채집하는 모습

- 담수 시료의 경우 요각류나 톡토기, 개형충 등이 많이 서식하는 것으로 보아 이런 포식자들 때문에 완보동물이 서식하기 힘든 것으로 판단됨
- 이끼/지의류 시료의 경우에는 현재까지 적어도 2개 강 (class), 3개 목 (order), 4종 이상의 완보동물을 획득(그림 48,49)
- 각 종마다 그 형태나 크기 뿐만 아니라 알의 형태나 알을 낳는 방식 등 생활사에도 서로 다른 특징을 보임
- Cryoconite hole 시료의 경우에는 1개의 알을 포함하여 1종 5개체의 완보동물을 획득

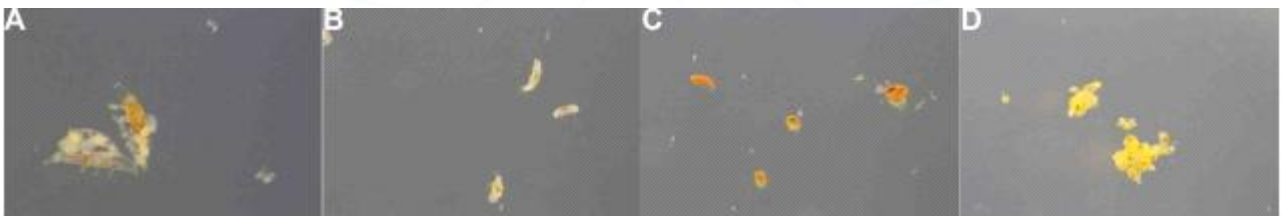


그림 48. 북그린란드 Sirius Passet에서 채집한 완보동물. A, *Milnesium* sp.; B, *Richtersius* sp.; C, *Cornechiniscus holmeni*; D, Macrobiotidae

- 2017년도에는 Sirius Passet에서 완보동물을 죽은 상태로만 확보하였는데, 이번 현장조사에서는 살아있는 상태로 확보
- 그 중 *Milnesium* sp.와 한 종의 *Parachela* 완보동물의 경우에는 현재 실험실 내에서 배양 중인 남극 완보동물 *Dactylobiotus* sp.의 먹이로 사용하고 있는 남극 유행동물 (rotifer)을 먹는 것이 관찰되어, 배양 체계 구축 가능성을 보임
- 특히, *Milnesium* sp.의 경우에는 현생 완보동물 중 원시 형질을 많이 보존하고 있는 그룹으로 생각이 되어 캄브리아기의 원시절지동물과의 형태 비교 연구와 향후 완보동물 내 계통발생과정연구에 도움이 될 것으로 기대(그림 48C,D)

- 현재까지 이완보강 (Class Heterotardigrada) Echiniscoidea목 (Order)의 *Cornechiniscus holmeni*, 진완보강의 (Class Eutardigrada) Apochela목의 *Milnesium* sp., Parachela목의 *Richtersius* sp., 그리고 Macrobiotidae과 (Family)의 완보동물 1종이 동정됨

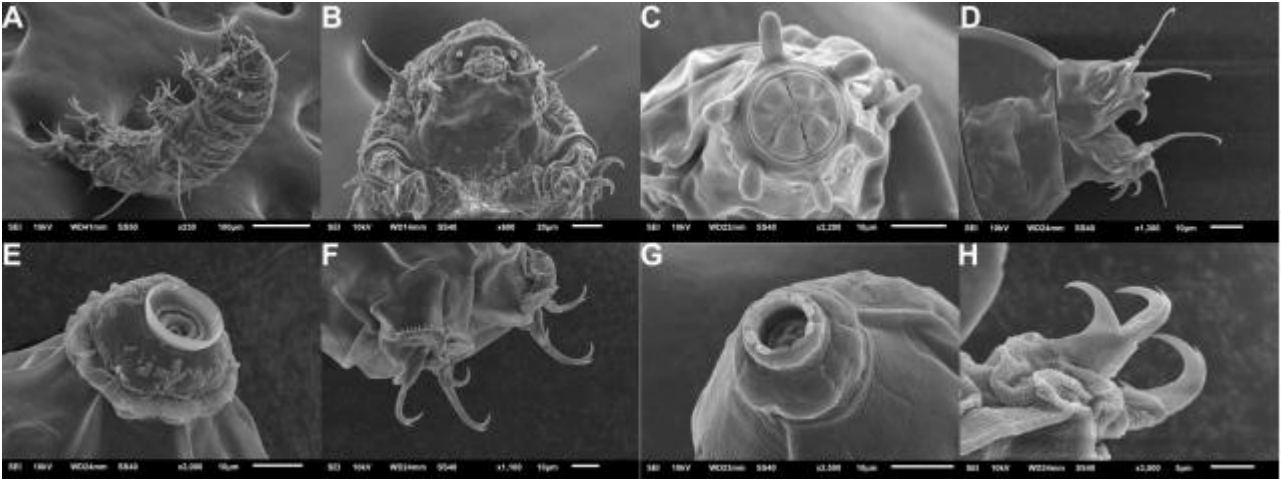


그림 49. 북그린란드 Sirius Passet에서 채집한 완보동물. A-B, *Cornechiniscus holmeni*; C-D, *Milnesium* sp.; E-F, *Richtersius* sp.; G-H, Macrobiotid 완보동물

○ 남극 완보동물 *Dactylobiotus* sp. 종 동정 및 형태 연구

- 세종기지 주변에서 채집된 완보동물 *Dactylobiotus* sp.의 경우 배양 조건과 먹이를 찾아 내어 실험실 내 배양체계를 갖추고 연구소에서 배양 중
- 1.5% Bacto agar 배지에 생수 (Volvic 사용)를 넣어주고 먹이로는 남극 Bdelloid 율형동물을 사용
- *Dactylobiotus* sp.는 적게는 1~2개에서 많게는 10개 정도의 알을 낳으며 처녀생식을 통해 낳아 한 마리의 완보동물을 배양을 하여 lineage 구축 시도 중
- *Dactylobiotus* sp.의 입-인두구조, 발톱 구조, 알의 형태를 중심으로 형태 데이터를 획득하여 종 동정 중에 있으며, 현재까지의 결과로 보아 신중으로 판단되어 논문 작성 중(그림 50)

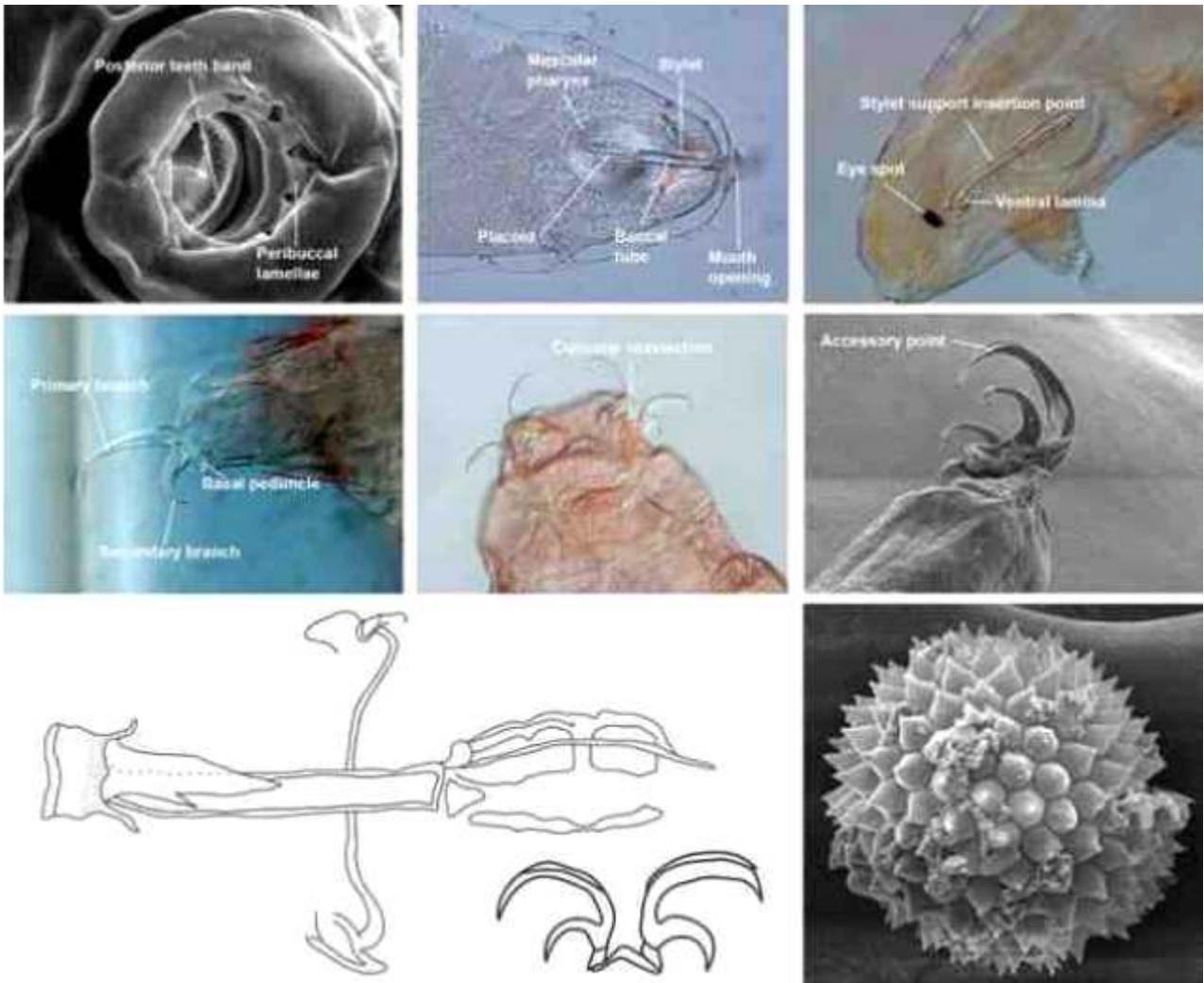


그림 50. 그림 *Dactylobiotus* sp.의 형태 그림.

- *Dactylobiotus* sp.의 종 동정 결과를 Polar 2018학회 (스위스 다보스), International Symposium on Tardigrada 학회 (덴마크 코펜하겐)에서 포스터로 발표

3.3.4. 캄브리아기의 원시절지동물과의 형태 비교 연구

- 중국 캄브리아기 화석산지 Chengjiang Fauna의 화석 데이터 획득
 - 완보동물은 절지동물, 유조동물과 함께 현생 범절지동물군을 형성하고 있으며 같은 공통 조상으로부터 갈라져 나왔기 때문에, 완보동물과의 형태비교연구는 원시절지동물의 형태 진화와 범절지동물군의 진화 연구에 도움이 될 수 있음.
 - 이를 위해 중국 Xi'an Northwest University의 Chengjiang Fauna 원시절지동물 전문가인 Liu Jianni 박사를 방문하여 소장 중인 Chengjiang Fauna의 원시절지동물 화석들을

관찰하고 형태 데이터를 획득

- Chengjiang Fauna에서는 원시절지동물이 현재까지 13종이 보고가 되어 있는데, 그 중 절지동물에 가까운 Radiodontan 화석종들과 완보동물과 동떨어진 *Diania cactiformis*를 제외한 *Onychodictyon ferox*, *O. gracilis*, *Miraluolishania haikouensis*, *Luolishania longicruris*, *Hallucigenia fortis*, *Cardiodictyon catenulum*, *Paucipodia*, *Jianshanopodia decora*, *Megadictyon haikouensis*의 형태를 관찰 및 이미지 데이터 획득(그림 51)

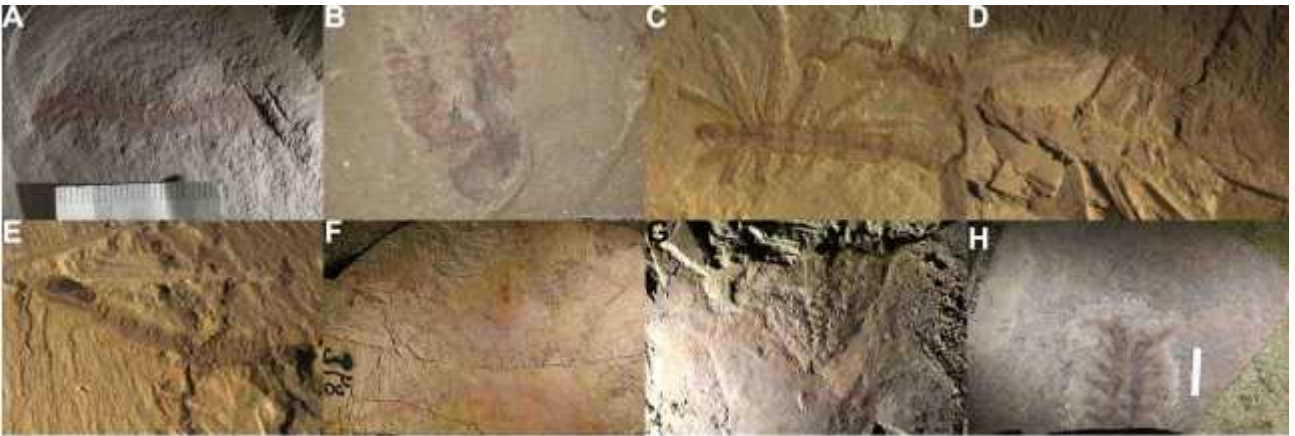


그림 51 Northwest University에 방문하여 획득한 화석 형태 데이터. A-B, *Onychodictyon ferox*; C, *Miraluolishania haikouensis*; D, *Hallucigenia fortis*; E, *Cardiodictyon catenulum*; F-G, *Jianshanopodia decora*; H, *Megadictyon haikouensis*.

○ 해양 완보동물 채집 및 표본 제작 습득

- 해양 완보동물은 육상 완보동물과는 매우 다른 형태를 가지고 있으며, 그 다양성이 크기 때문에 이전부터 해양 완보동물이 완보동물의 가장 원시적인 동물군이라고 생각되어, 완보동물과 범절지동물군의 진화연구에 중요한 동물군
- 그러나 해양 완보동물은 그 크기가 너무 작고 서식지에서의 밀도가 작아 채집하기가 쉽지 않음
- 해양 완보동물의 채집과 표본 제작 방법에 대해 배우기 위하여 해양 완보동물 전문가인 일본 Tohoku university의 Fujimoto Shinta 박사를 방문하여 채집, 표본을 제작 및 형태를 관찰하는 방법을 습득(그림 52)
- 해양 완보동물은 그 크기가 작고 숫자가 적어 자세한 해부학적 구조에 대해 그 연구가 육상 완보동물에 비해 상대적으로 미진하여 Fujimoto Shinta 박사와 해양 완보동물의 입 구조에 대해 공동 연구 중



그림 52. Tohoku University에 방문하여 해양 완보동물 채집, 고정 및 관찰 방법을 배우면서 만든 표본. A, *Echiniscoides* sp.; B, *Batillipes* sp.; C, *Parastygarctus* sp.; D, *Neostygarctus lovedeluxe*

○ 현생 완보동물과 원시절지동물과의 형태 비교 연구

- 획득한 Chengjiang Fauna 형태 데이터를 극지연구소에 소장중인 북그린란드 Sirius Passet의 원시절지동물 화석 데이터와 현생 완보동물 데이터를 비교하며 형태 비교를 통한 진화 연구 수행 중
- 이전의 가설에서는 완보동물 중 해양 완보동물 (Order Arthrotardigrada)이 가장 원시적인 완보동물이라고 여겨졌는데, 이번 연구를 통해 육상 완보동물 중 하나인 Order Apochela의 Milnesiidae 완보동물들이 해양 완보동물에 비해 공통조상으로부터 유래한 원시형질을 더 많이 가지고 있다는 것을 발견
- 이 결과를 14th International Symposium on Tardigrada (덴마크 코펜하겐)에서 구두발표

극지연구소

3.3.5. 현생 완보동물 및 화석 형태 데이터 베이스 축적

○ 현생 극지 완보동물의 형태 연구

- 세종기지에서 채집한 완보동물 형태 및 유전자를 이용한 종 동정을 통해, 신종임을 확인, *Dactylobiotus ovimutans*라 명명(그림 53)
- *D. ovimutans*의 분류연구를 진행하면서 현생 완보동물의 형태연구에 대해 많은 지식과 표본 제작, 이미지 획득 기술, 실험실내 배양기술을 습득(그림 54)
- 이를 통해 현재까지 알려지지 않았던, 완보동물의 새로운 구조를 발견하였으며, 발생과정에 따른 완보동물 알의 형태변화를 관찰(그림 55)
- 알의 다양한 형태가 환경조건과는 무관하다는 것을 규명

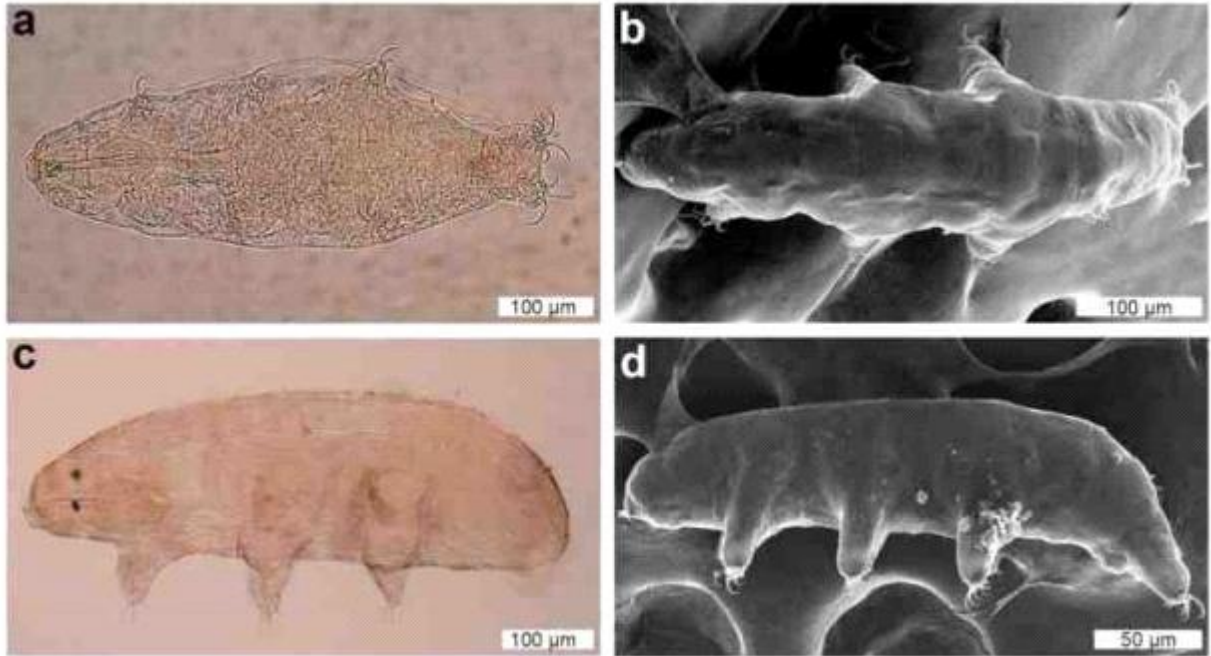


그림 53. 남극 세종기지 주변에서 채집한 신종 *Dactylobiotus ovimutans*

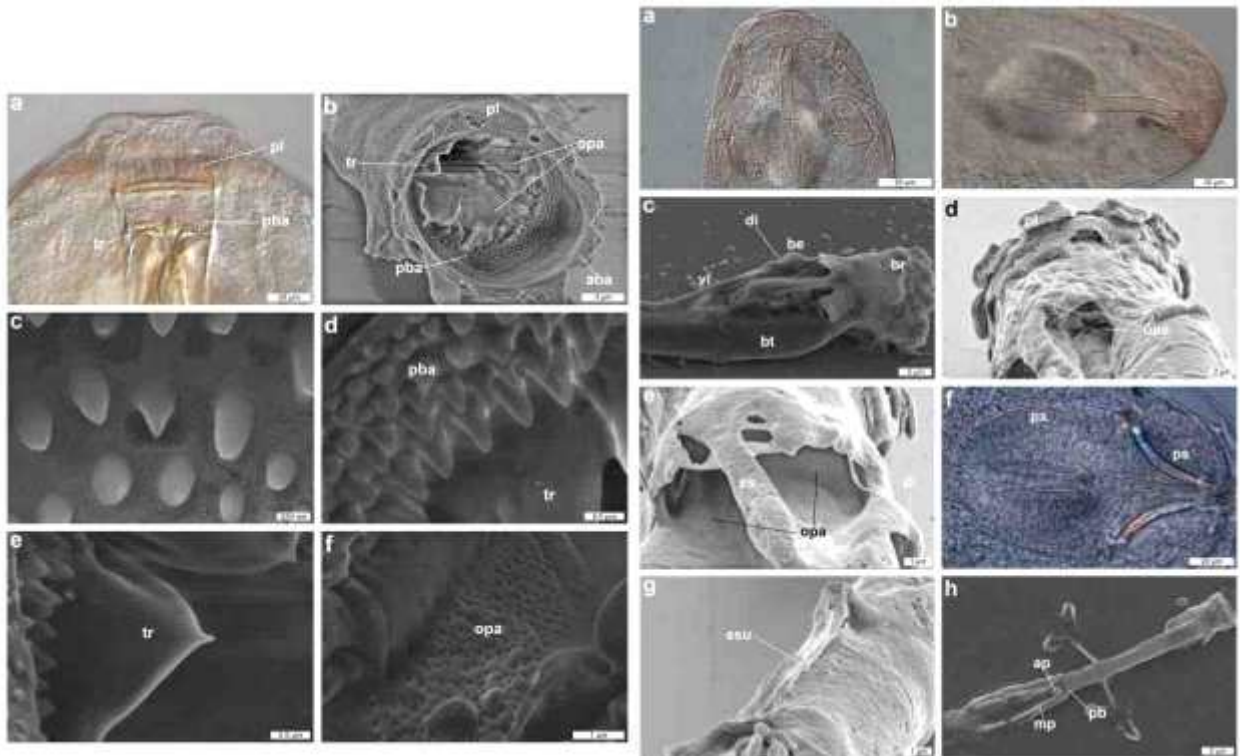


그림 54. 왼쪽: *Dactylobiotus ovimutans*의 입 내부 구조, 오른쪽: *D. ovimutans*의 입-인두구조.

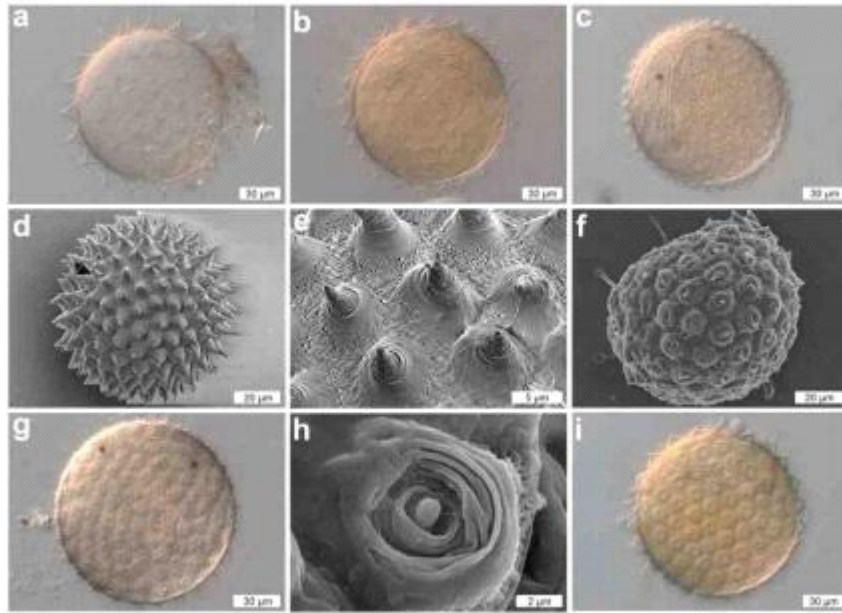


그림 55. *Dactylobiotus ovimutans*의 다양한 알 형태 변이

- 현생 완보동물과 캄브리아기 엽족동물과의 형태 비교 연구
 - 범절지동물군의 진화사 이해를 위해, 먼저 완보동물문 내 진화에 대한 연구를 수행
 - Sirius Passet과 중국 Chengjiang에서 산출된 캄브리아기 엽족동물과의 형태 비교 연구를 통해 현생 완보동물의 형태 형질 중 원시형질을 규명
 - 이를 통해 원시 형태 형질을 가장 잘 보존하고 있는 완보동물 그룹이, 현재까지 가장 원시형태라고 여겨지는 Heterotardigrada강의 *Parastygarctus*속이 아닌 Eutardigrada강의 *Milnesium*속이라는 것을 알 수 있었음(그림 56, 표 1)

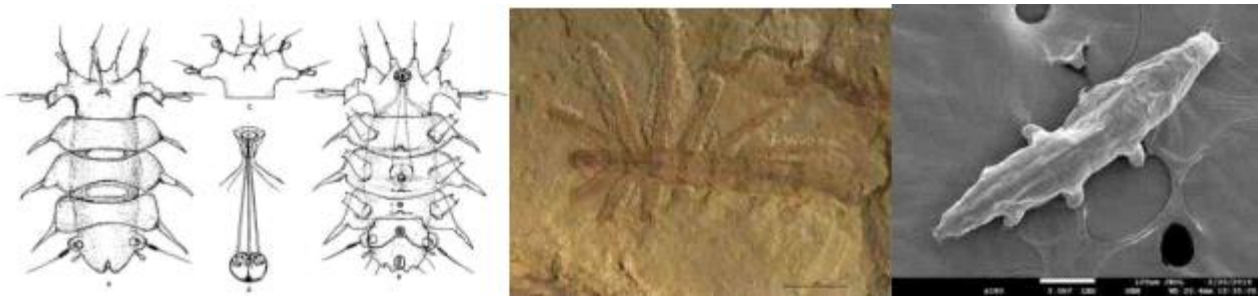


그림 56. 왼쪽: 현생 완보동물 *Parastygarctus renaudae*. 가운데: 캄브리아기 엽족동물 *Miraluolishania haikouensis*. 오른쪽: 현생 완보동물 *Milnesium* sp.

Character	<i>Parastygactus</i>	Cambrian Lobopodia	<i>Milnesium</i>
Mouth position	Ventral or antero-ventral	Terminal	Terminal
Peribuccal papillae	Absent	Present in some lobopodia	Present
Circum-oral element	Absent?	Present	Present
Pharyngeal teeth	Absent	Present	Present
Pharynx	Circular	Elongated & Transversely striped	Elongated & Transversely striped
Rostral spine or stylet	Cross	Parallel	Parallel
Limb morphology	Telescopic	Lobe-like	Lobe-like
Claw insertion	Inserted directly on the foot	Inserted directly on the foot	Inserted directly on the foot
Sclerotized element on the trunk	Whole body but not biomineralized	Plate or spine Biomieralized	Absent

표1. 현생완보동물 *Parastygactus*와 *Milnesium*, 캄브리아기 엽족동물의 중요 형태 형질 비교 표

- 완보동물문 내 계통 발생도 작성을 위해 중요한 형태 형질을 선정하여 형태비교 매트릭스 작성(그림 25)



그림 25. 계통진화 연구를 위한 형태비교 캐릭터 매트릭스

3.3.6. 현생 완보동물 및 선형동물 형태 데이터 베이스 축적

○ 북동그린란드 Ella Island에 서식하는 현생 완보동물 연구

- 완보동물 연구가 상대적으로 많이 진행된 서/남그린란드에 비해 동/북그린란드는 완보동물 연구가 잘 이루어지지 않아, 북그린란드의 Sirius Passet에 이어 북동그린란드의 Ella Island 지역에서 완보동물 채집
- 이끼/지의류 환경에서 50개체 이상의 완보동물을 채집하여 고정 후 현재 시료 제작 (그림 58)

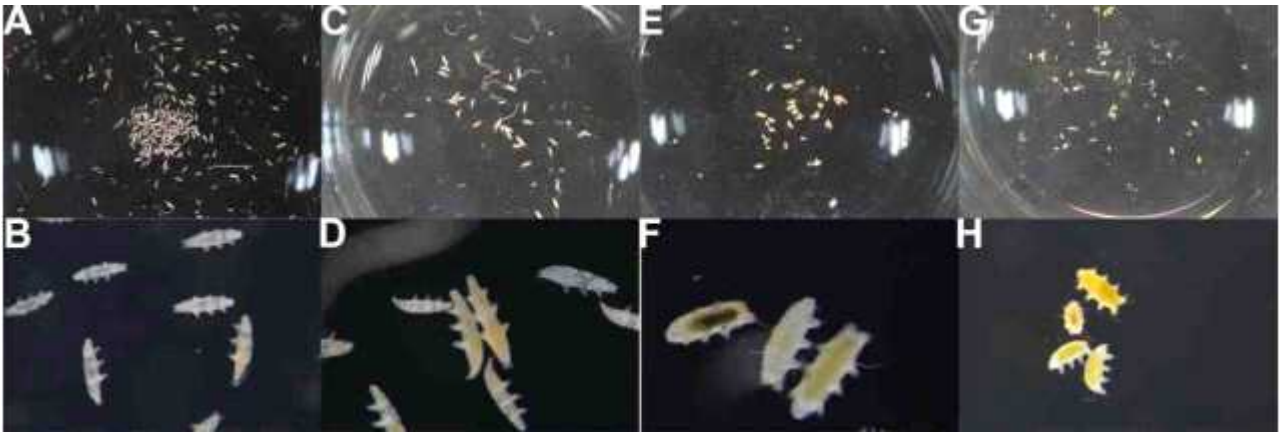


그림 58. 3% 포르말린에 고정한 완보동물 시료. A,B: *Macrobiotus* sp. C,D: *Milnesium* sp. E,F: *Cornechiniscus holmeni* G,H: Echiniscid sp. 1, 2, 3

- SEM, DIC 현미경, partial DNA sequences (COI, 18S, 28S, ITS2) 분석을 통해 종 동정 분류 연구 진행(그림 59)

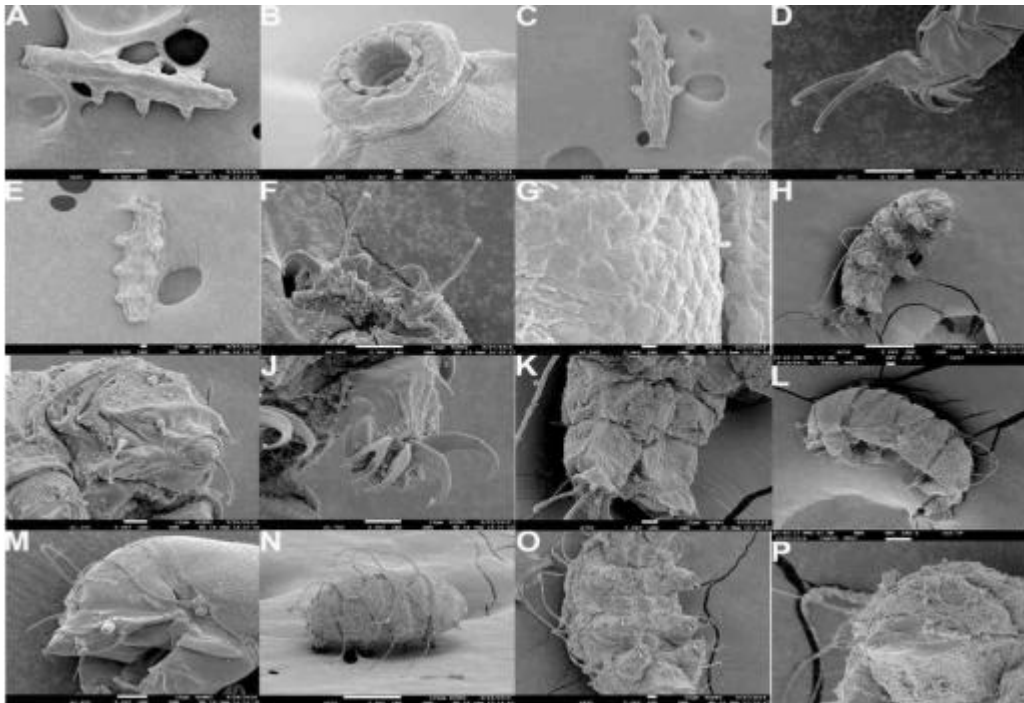


그림 59. 동그린란드 Ella Island에서 산출된 완보동물 SEM 이미지. A,B: *Macrobiotus* sp. C,D: *Milnesium* sp. E~G: *Ramazzottius* sp. H~K: *Cornechiniscus holmeri* L,M: Echiniscid sp. 1 N~P: Echiniscid sp. 2

- 차후 1200 Km 떨어진 Sirius Passet의 유사한 환경에서 채집된 완보동물 종 구성과 비교 하여 동/북그린란드의 완보동물 생지리 분포 연구에 활용 예정

○ 북그린란드 Sirius Passet에서 산출되는 선형동물 연구

- 캄브리아기 동물 중 선형의 형태를 가지는 Palaeoscolecids의 형태적, 진화적 기원을 연구 하기 위해 현생 북극 선형동물의 형태와 비교 연구를 진행 중
- Sirius Passet 인근의 이끼와 물소의 분변에서 40여 개체의 선형동물을 채집해 고정 후 시료 제작(그림 60a, b)
- 북극 해양 선형동물 채집을 위해 북극해(East Siberian Sea, Barents Sea, Svalbard Fjord) Svalbard Fjord에서 채취한 해양 퇴적물 시료 분석(그림 60c, d)



그림 60. 채집한 시료 사진 A, B Sirius Passet 일대의 육상 시료 및 실체현미경 사진. C, D Svalbard Fjord 인근의 해양 시료 및 실체현미경 사진.

- SEM, DIC 현미경, confocal 현미경, partial DNA sequences (18S, 28S, ITS, D2D3) 분석을 통해 Sirius Passet 인근의 선형동물의 신종 확인 및 종 동정 분류와 종간의 형태적 특징 비교 연구 수행(그림 61)

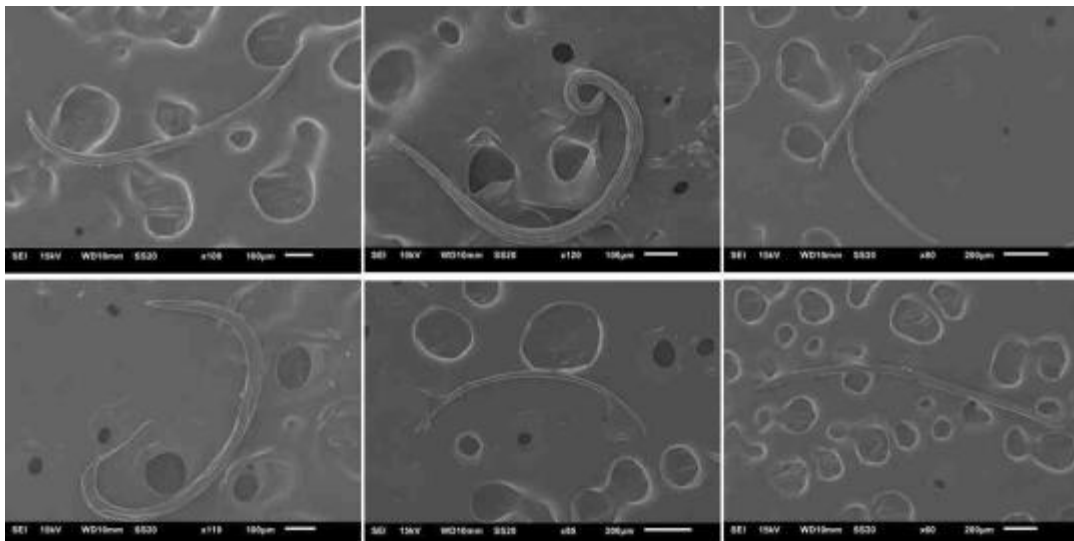


그림 61. 북그린란드 Sirius Passet 인근 이끼와 사향소 분변에서 채집한 여러 종의 선형동물의 SEM 이미지. 꼬리의 길이와 형태, 크기와 두께의 비율로 보아 다른 종임을 확인

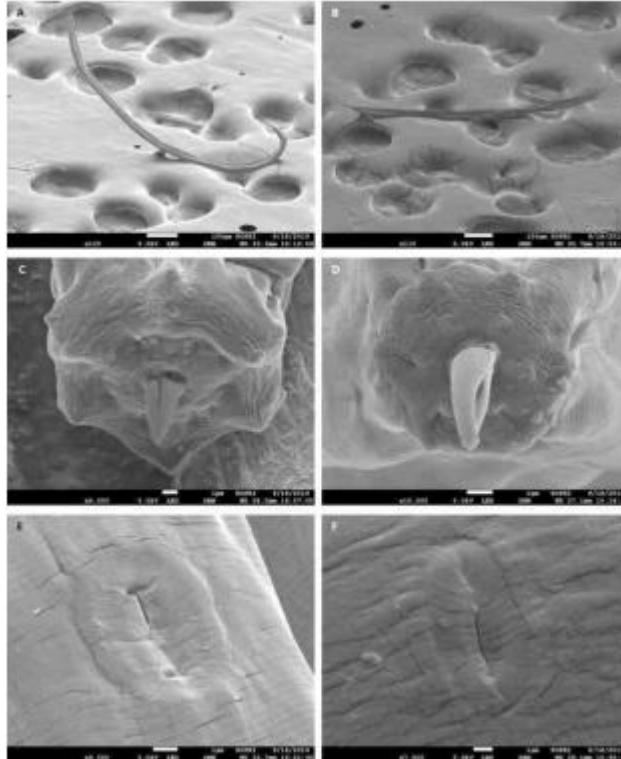


그림 62. 북그린란드 Sirius Passet 인근에서 채취한 사향소 분변 및 이끼에서 채집한 Dorylaimia아강 선형동물의 SEM 이미지. A, B 개체 전체이미지. C, D 일부 종의 후두부분 확대이미지. Teeth, pharynx, papillae의 서로 다른 구조가 확인됨. E, F 일부 종의 생식기 확대이미지. horizontal, vertical 방향의 서로 다른 형태를 가짐. 선형동물의 형태적 종 분류의 특징들이 다르므로 여러 종이 있음을 확인

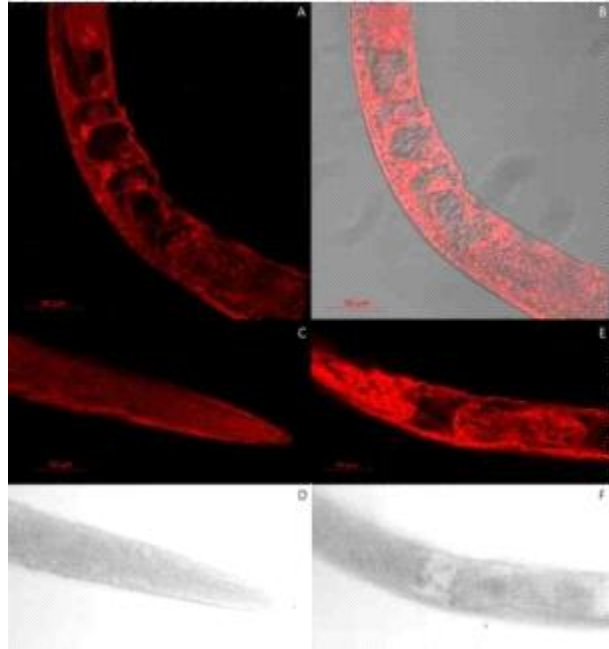


그림 63. Svalbard Fjord 내 해양 퇴적물에서 채집한 선형동물의 cLSM 이미지. A, B 수정과 발생의 과정. C, D 후두부분 및 인두부분의 내부구조. E, F 체내에서 발생중인 선형동물



3.4 북부그린란드 현장조사 및 지질도 작성

3.4.1. Remote sensing을 이용한 북그린란드 지질도 작성

○ Remote sensing을 이용한 북그린란드 지질도 작성

- 북그린란드는 80년대에 적은 수의 인원으로 헬리콥터를 이용하여 먼거리에서 관찰이 이루어지면서 지질도 작성이 되었던 곳
- 지질도가 맞지 않는 부분이 많이 있다는 것이 2016년, 2017년의 극지연구소 주도 현장조사에 의해 밝혀짐
- Sirius Passet같은 화석산지를 새로운 지역에서 찾는다면, 새로운 캄브리아기 생태계 데이터를 얻을 수 있음
- 북그린란드의 지질도를 최근 Landsat-8와 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 데이터를 활용하는 Remote sensing기법(그림 64)을 통해 작성 중

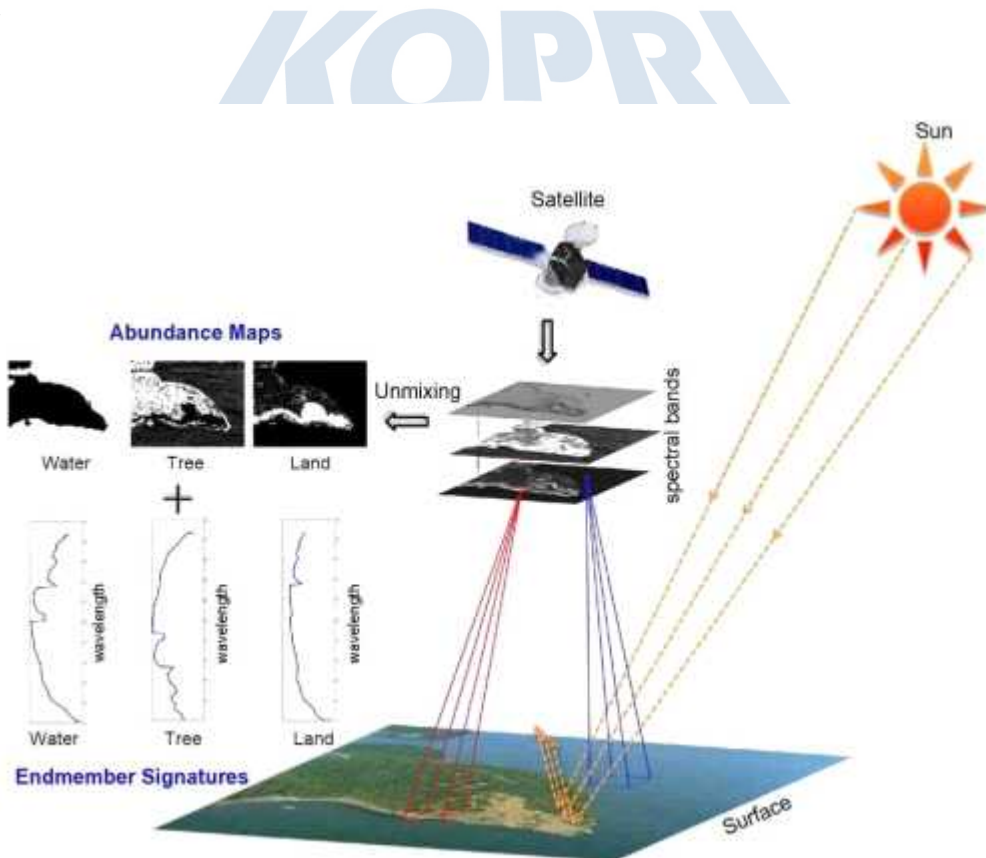


그림 64. Remote sensing을 이용한 표면 지질 정보 획득 기법을 모식적으로 나타낸 그림
(출처 <http://ehdattheyat.ae>)

- Remote sensing을 통해 Sirius Passet 주변 지역의 기존지질도가 맞지 않는 것을 알 수 있었음(그림 65)

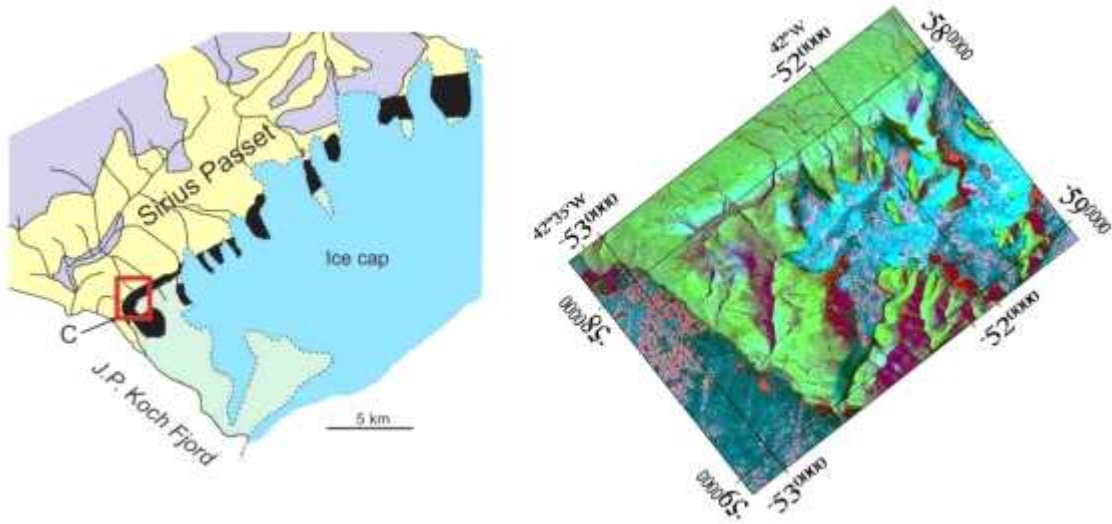


그림 65. 1980년대에 작성된 화석산지 주변의 지질도(좌)와 새롭게 Remote Sensing을 통해 작성한 화석산지 주변의 지질도(우). 검은색으로 표시된 화석이 산출되는 Buen층이 기존의 지질도와는 다르게 동쪽으로 연결되지 않는다는 사실을 알 수 있음.

극지연구소

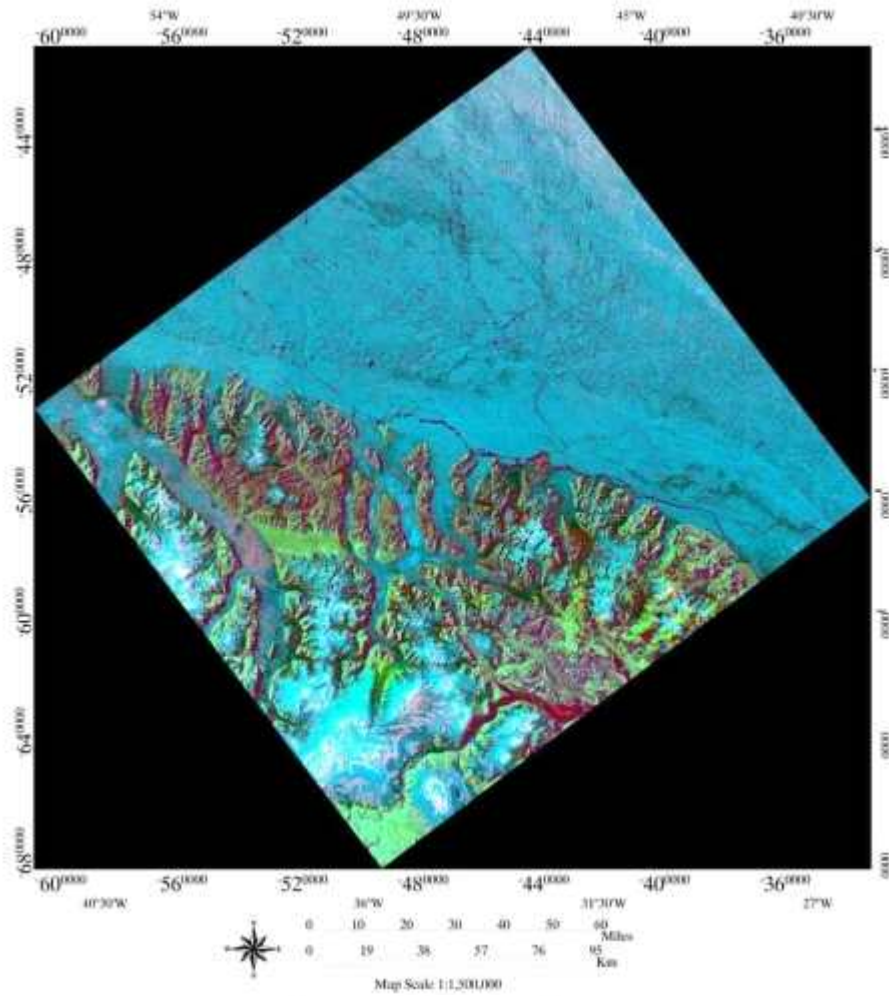


그림 66. 북그린란드 Peary Land의 Landsat-8 이미지

- Remote sensing 기법을 이용해 북그린란드 Peary Land의 지질도 영상을 작성(그림 66)
- 새롭게 얻은 지질도를 분석하여 남서쪽 약 25 km 떨어진 지역이 Sirius Passet의 지질과 유사하다는 사실을 확인(그림 67)

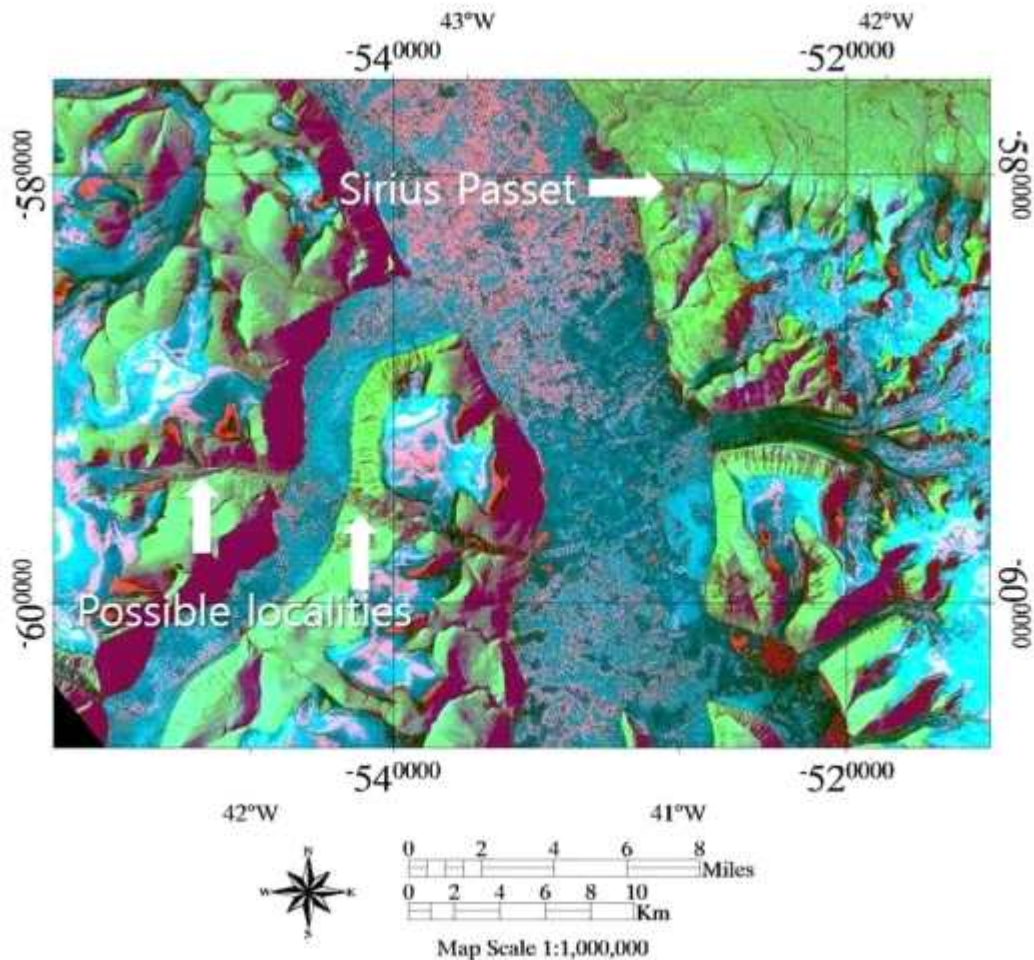


그림 67. Sirius Passet 일대의 Landsat-8 이미지. Sirius Passet과 유사한 지질을 보이는 지역이 possible localities로 표현되어있음.

- 새로운 화석산지 후보로 결정된 지역은 2018년 탐사에서 헬리콥터를 이용하여 방문할 예정

3.4.2. Remote Sensing을 이용한 북그린란드 광물자원 분포 연구

○ Landsat-8와 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 데이터를 활용하는 Remote sensing 기법 확립 관련 논문 게재(그림 68)

- Pour, A.B., Park, Y., Park, T.-Y., Hong, J.K., Hashim, M., Woo, J., & Ayoobi, I. (2018) Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions. Geocarto International (published online)
- Landsat-8/ASTER 데이터를 활용함에 있어서 Independant Component Analysis (ICA)

와 Constrained Energy Minimization (CEM) algorithms를 통해 극지역의 지질도 작성 방법을 확립

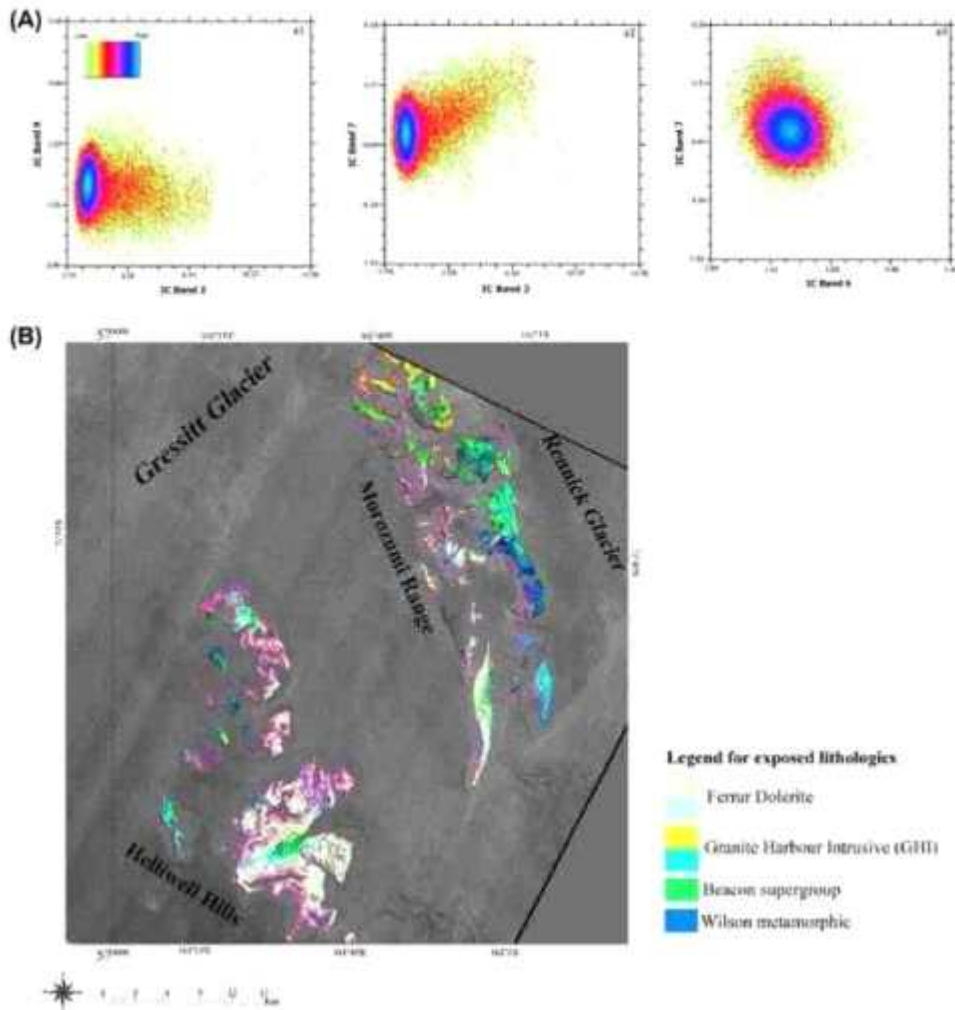


그림 68. (A) 2D scatter plots for ICA bands 2 and 6 (a1), ICA bands 2 and 7 (a2), and ICA bands 6 and 7 (a3). (B) ASTER image map derived from IC2, IC6, IC7.

- Pour, A.B., Park, T.-Y., Park, Y., Hong, J.K., Zoheir, B., Pradhan, B., Ayooobi, I. & Hashim, M. (2018) Application of multi-sensor satellite data for exploration of Zn-Pb sulfide mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland. Remote Sensing 10, 1186.
- Landsat-8, ASTER 및 Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) 데이터를 활용하여 북그린란드 Peary Land의 Franklinian 분지에서 Zn-Pb 광물의 분포를 탐사
- 이를 통해 Zn-Pb sulfide 광물 다수 분포하는 것으로 보이는 몇몇 지역을 북그린란드 일

대에서 확인

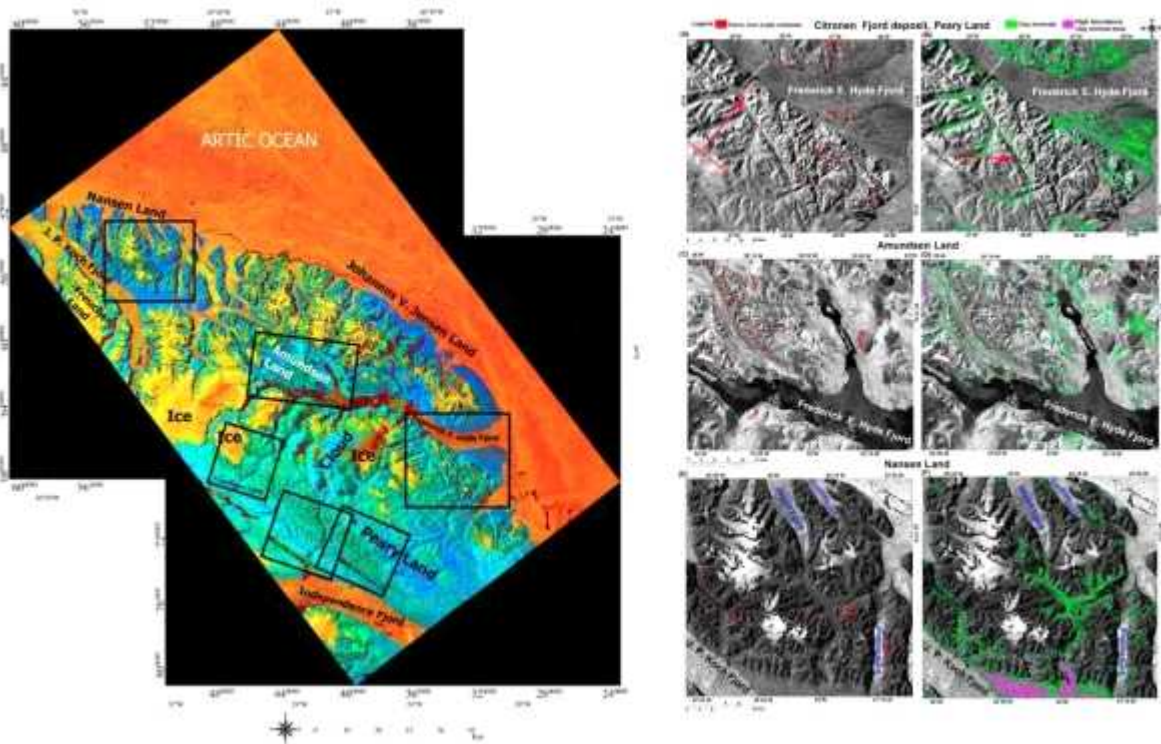


그림 69. 북그린란드 Peary Land 지역의 Landsat-8 이미지(좌)와 세부지역의 철광물(붉은색)과 Zn-Pb가 포함된 점토광물(녹색 및 자주색) 분포(우)

3.4.3. 북서그린란드 광물자원 지질도 작성

- 북서 그린란드 Inglefield Land 의 구리, 금 광물 분포도 작성
 - 관련논문 Remote Sensing에 게재
 - Landsat-8, ASTER, WorldView-3 위성 데이터를 활용한 구리, 금 분포도 이미지 작성 (그림 70 - 73)

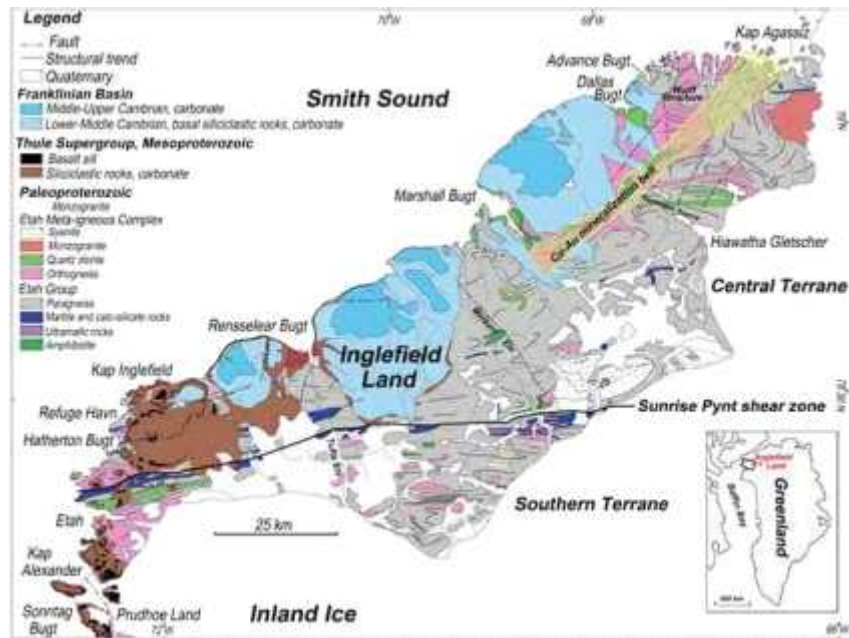


그림 70. Geological map of the Inglefield Belt. Cu-Au mineralized belt in the northeastern part of Inglefield Land shows as yellow color shadow (modified after Dawes, 2004; Kolb et al., 2016)

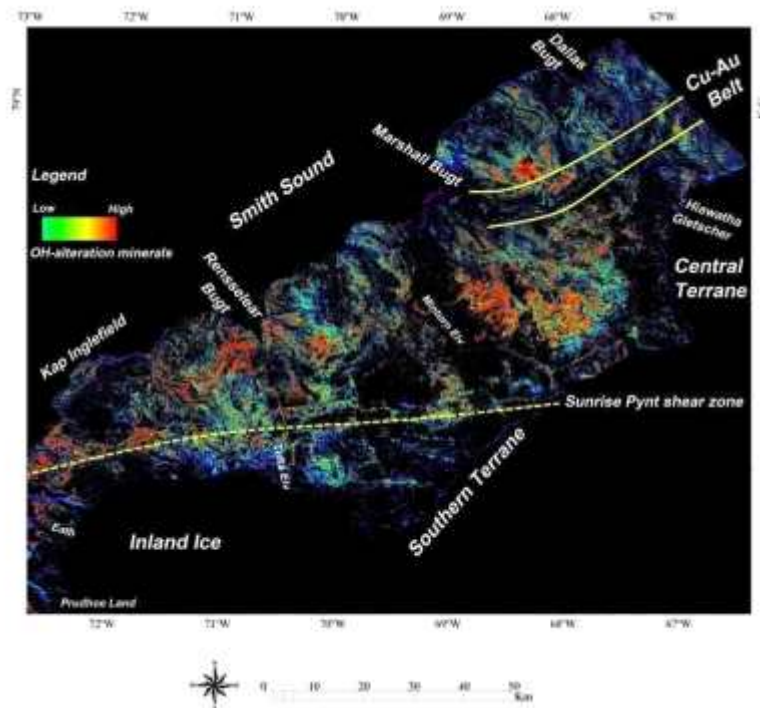


그림 71. Pseudocolor ramp of the DPCA4 rule image covering the IMB

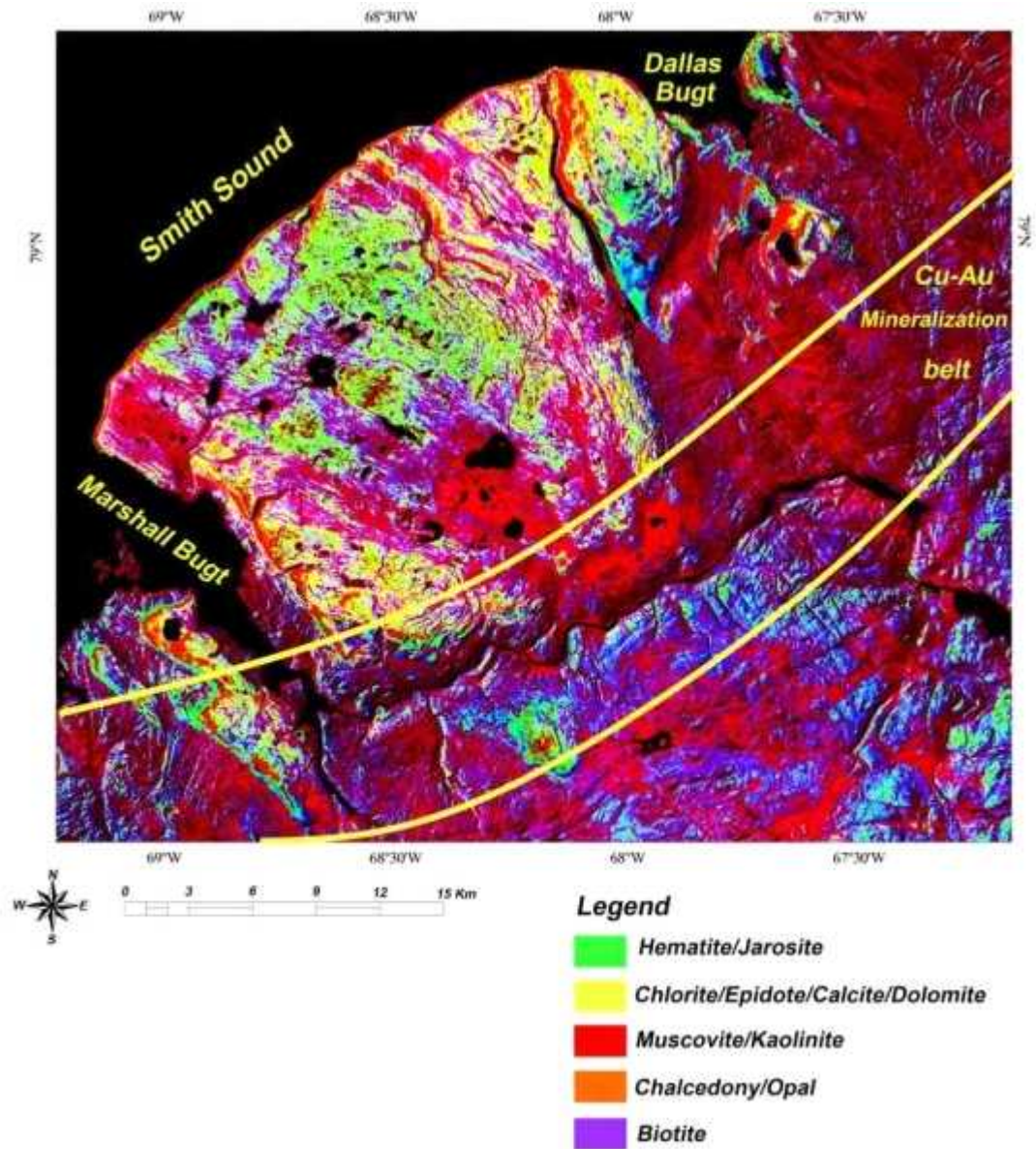


그림 72. (A) The n-D classes (end-member spectra) extracted for a selected spatial subset (ASTER VNIR+SWIR) covering Cu-Au mineralization belt and surrounding areas. ASTER band center positions are shown. (B) ASTER LSU classification mineral map for the selected spatial subset covering Cu-Au mineralization belt and surrounding areas

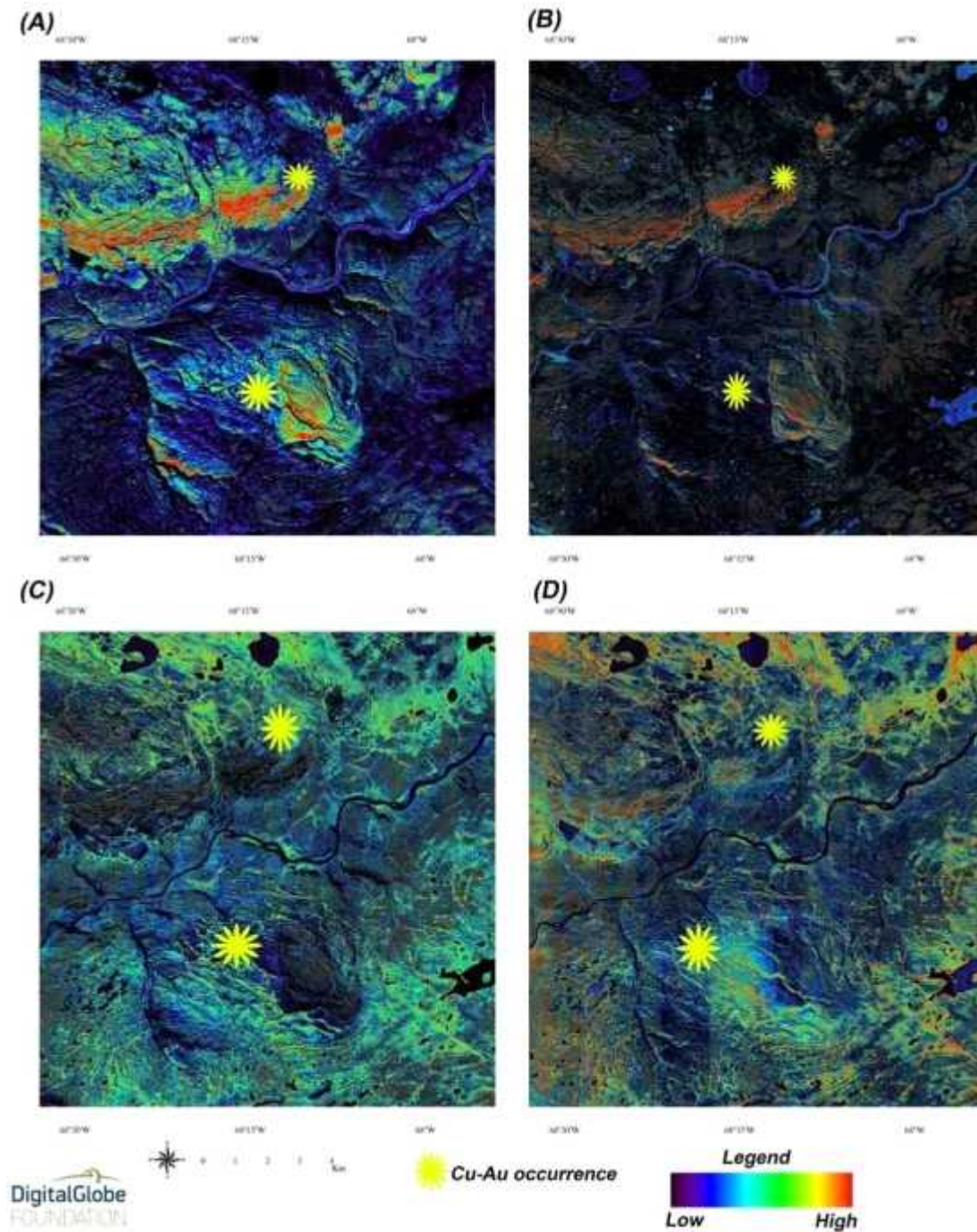


그림 73. Pseudocolor ramp of the WV3 (VNIR) DPCA rule images covering the selected spatial subset of the southern part of the Cu-Au mineralization belt. (A) Fe_3+ iron oxides image-map; (B) Fe_2+ iron oxides image-map; (C) ferric silicates image-map; (D) ferrous silicates image-map (WV-3 image, courtesy of the DigitalGlobe Foundation (www.digitalglobe.com))

3.4.4. 북그린란드 현장조사 및 샘플채취

○ 북그린란드 Sirius Passet 화석산지 현장조사

- 총 7명의 인원이 6.30~7.21 동안 현장캠프 구축 및 현장조사 성공적 수행(그림 74)



그림 74. 극지연구소의 2017년도 북그린란드 Sirius Passet 현장 캠프 전경

- 사용했던 장비들은 철수 시 2018시즌 탐사를 위해 현장에 두고 옴(그림 75)



그림 75. 북그린란드의 Sirius Passet 현장에 두고 온 현장장비 모습

- Sirius Passet 캠프 현장에 최초로 현미경, 조명, 화석 전처리 기기, 생물 채집 도구, 냉장고 등이 갖추어진 연구실 텐트를 구축(그림 76)



그림 76. 캠프 현장에 구축한 연구실 텐트의 내부 모습. 현미경을 비롯한 주변 시설(상)과 냉동시스템을 갖춘 냉장고의 모습(하)

- 2017시즌의 북그린란드 헬리콥터 운용은 덴마크 현지 대행사인 POLOG가 전담하여, 비용적 문제로 헬리콥터를 운용하지 못하였음
- POLOG측과 St. Nord측과의 협상을 통해 다음 시즌의 헬리콥터 운용을 위한 jet oil을 8드럼 더 구축하는 데 성공(기존의 10드럼은 2016 시즌에 구축)

○ 북그린란드 Sirius Passet 화석산지 샘플채취

- 총 1톤이 넘는 화석 및 암석 시료를 채취(그림 77)
- 2017.9.6.에 극지연구소에 도착하여 카탈로깅 시작



그림 77. 2017시즌 북그린란드 Sirius Passet에서 채취한 1톤의 화석 및 암석 시료

- 캠프 현장의 작업용 텐트 및 전처리 도구를 이용하는 새로운 방법으로 임팩트있는 샘플들 다수 채취(그림 78)
- 머리쪽 신경이 잘 보존된 신종 *Kerygmachela* 시료 발견(그림 78A)
- 원시절지동물인 *Aysheaia*의 신종과 매우 드물게 발견되는 *Hadrax* 발견(그림 78B, C)
- 그동안 중국 Chengjiang에서만 산출된다고 알려졌던 anomalocaridid의 일종인 *Amplectobelua* 발견(그림 33D)
- 캐나다 Burgess Shale에서만 발견되었던 *Amiskiwia*의 신종 발견(그림 78G)
- 2016시즌 척삭동물 화석 발견에 이은, 척삭동물로 추정되는 샘플들 추가 발견(그림 78 J-K)

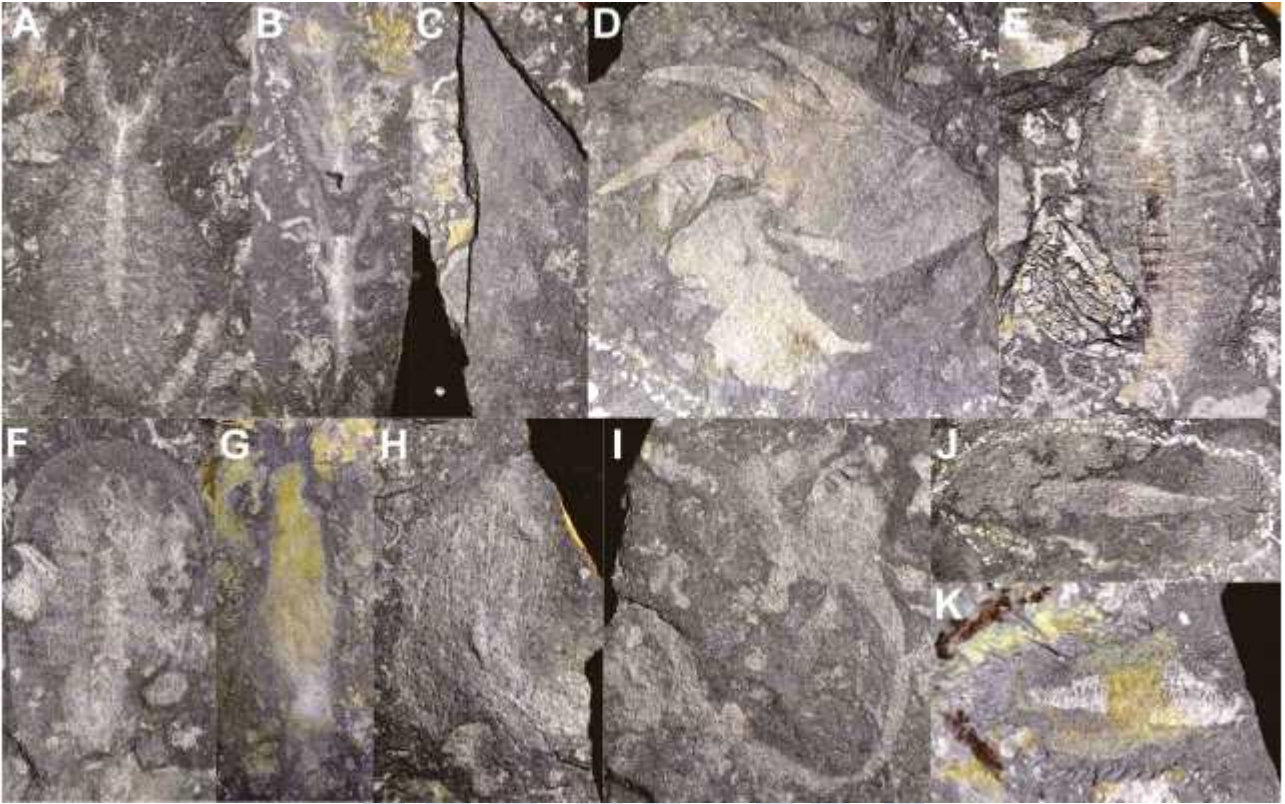


그림 78. A, 신경이 잘 보존된 신종 *Kerygmachela* 시료. B, 신종 *Aysheaia* 시료. C, 매우 희귀한 *Hadranax* 시료. D, 새롭게 발견된 anomalocaridid의 일종인 *Amplectobelua*의 frontal appendage 끝부분. E, 신경이 보존된 초기 절지동물 *Kiisortoqia* 시료. F, 절지동물 *Arthroaspis*의 어린 개체. G, 새롭게 발견된 신종 *Amiskwia* 시료. H, loriciferan동물인 *Siriolorica granulata* 시료. H, soft-bodied brachiopod로 추정되는 샘플. J-K, 척삭동물로 추정되는 샘플들

- 길이가 30 cm에 달하는 초대형 chaetognath (화살벌레) 화석 채취
- 80년대 아노말로카리스류(anomalocaridids)의 발견 이후 최초로 나온 캄브리아기의 대형 육식동물 화석
- 현생화살벌레는 일반적으로 길이가 3 cm 정도로 동물플랑크톤을 주로 잡아먹음
- 현생 동물플랑크톤들은 화살벌레로부터 피하기 위해 긴 가시들을 진화시켰음
- 따라서 캄브리아기의 삼엽충을 비롯한 작은 절지동물들이 긴 가시를 진화시키도록 만들었던 거대포식자가 이 초대형 화살벌레라는 것을 유추할 수 있음
- 그 동안 베일에 싸여있던 캄브리아기 동물들의 방어시스템 진화에 대한 비밀을 푸는 샘플임

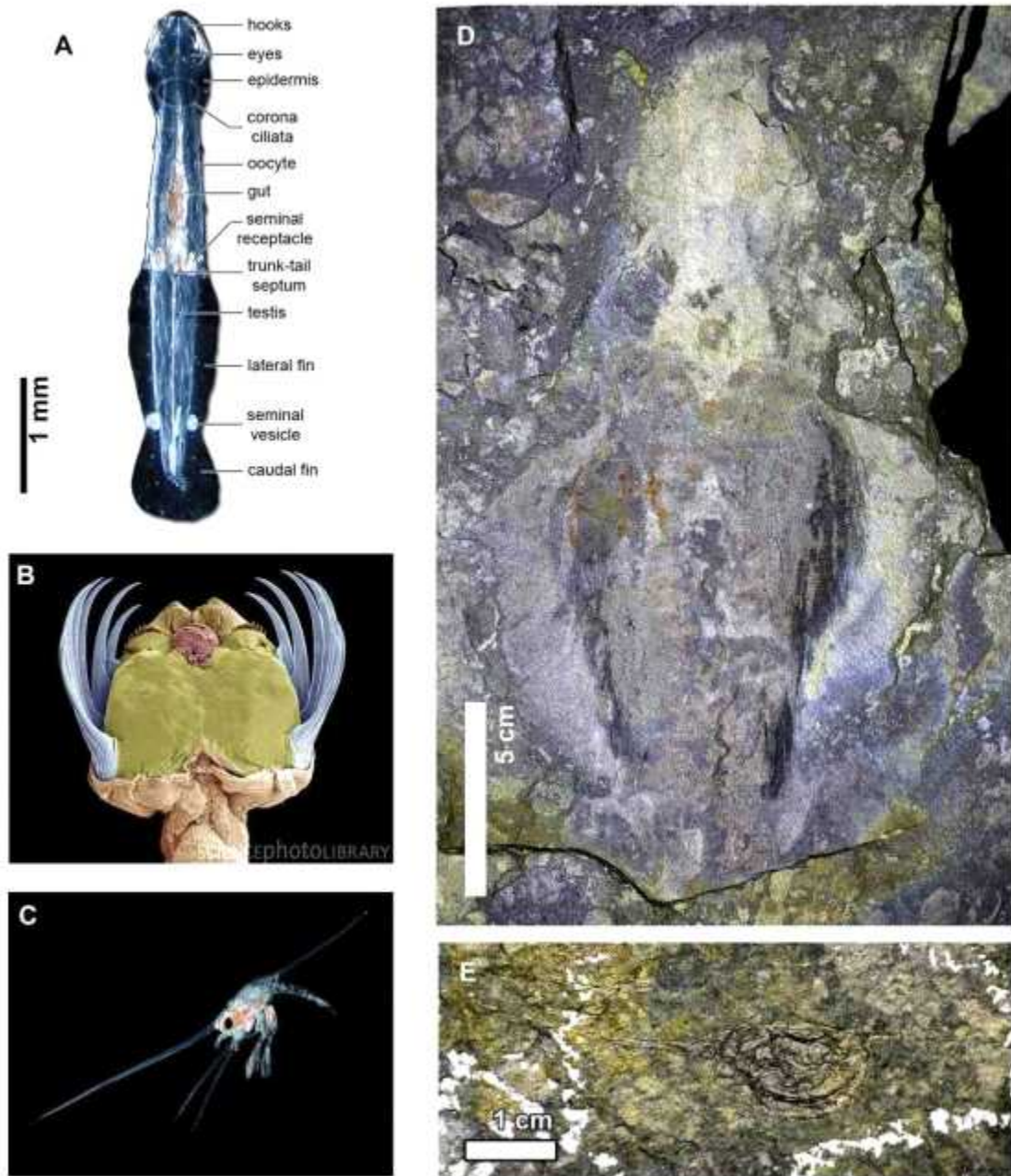


그림 79. A-C 현생 chaetognath (화살벌레). A, 길이가 5 mm가 되지 않는 현생 화살벌레 *Saggita* sp. (출처 www.quasargroupconsulting.com). B, 현생 화살벌레의 머리 부분에 있는 포식용 가시들(출처 www.farm8.static.flickr.com). C, 현생 화살벌레의 주 먹이인 갑각류의 유생 zoea(출처 www.i0.wp.com). Carapace 앞뒤로 긴 가시는 화살벌레의 포식에 대항하기 위해 진화한 형태. D, 2017시즌 북그린란드 Sirius Passet 현장조사를 통해 채취한 캄브리아기의 초대형 화살벌레 화석. E, Sirius Passet에서 가장 많이 산출되는 절지동물 *Isoxys*의 carapace 화석. 현생 zoea처럼 carapace 앞뒤로 긴 가시를 진화시킨 것을 볼 수 있음

○ 시리우스 파셋 퇴적환경 규명을 위한 현장조사

- 화석이 산출되는 이암(Buen Formation) 주변의 동시대 석회암(Portfjeld Formation)에 대한 현장조사를 통해 이암과 석회암의 층서관계, 석회암과 퇴적상 분석을 위한 맵핑 자료와 시료 확보(그림 80)

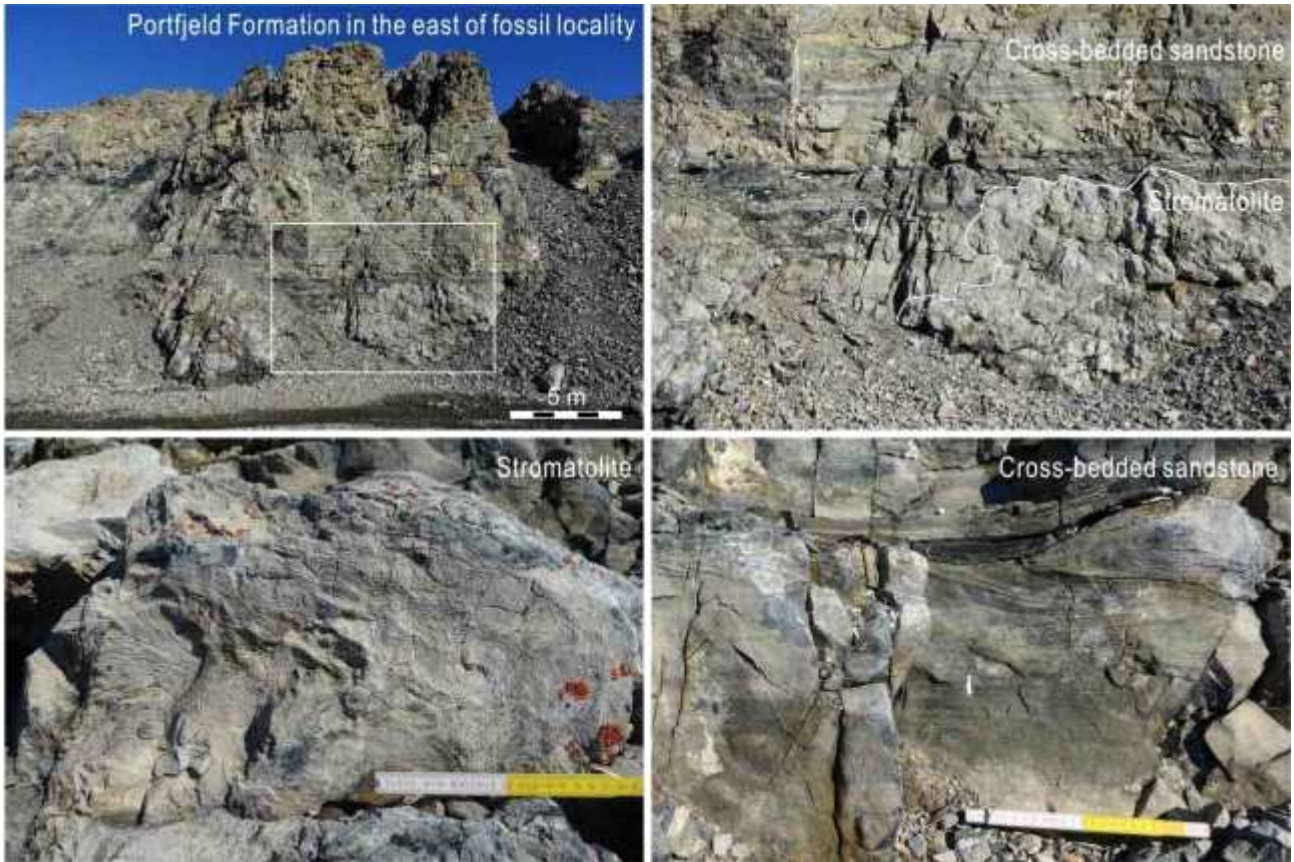


그림80. 화석산지 주변 석회암층의 노두와 주요 암상 사진

○ 북그린란드 피요르드 주변 퇴적체 조사

- 캠프 주변에 산출되는 미고화 퇴적층에 대한 주상도 작성, 변형구조방향 측정 및 연대측정을 위한 시료 채취
- 대부분 이질 퇴적물로 이루어져있으며, 종종 얇은 실트층이 협재함. 특정구간에 왕자갈에서 잔자갈 크기의 역이 포함되어 있음. 모두 7매의 변형퇴적층이 발달하며 주로 횡와습곡형태의 변형구조를 가지고 있으며 모두 해안쪽으로 경사하고 있음(그림 81)

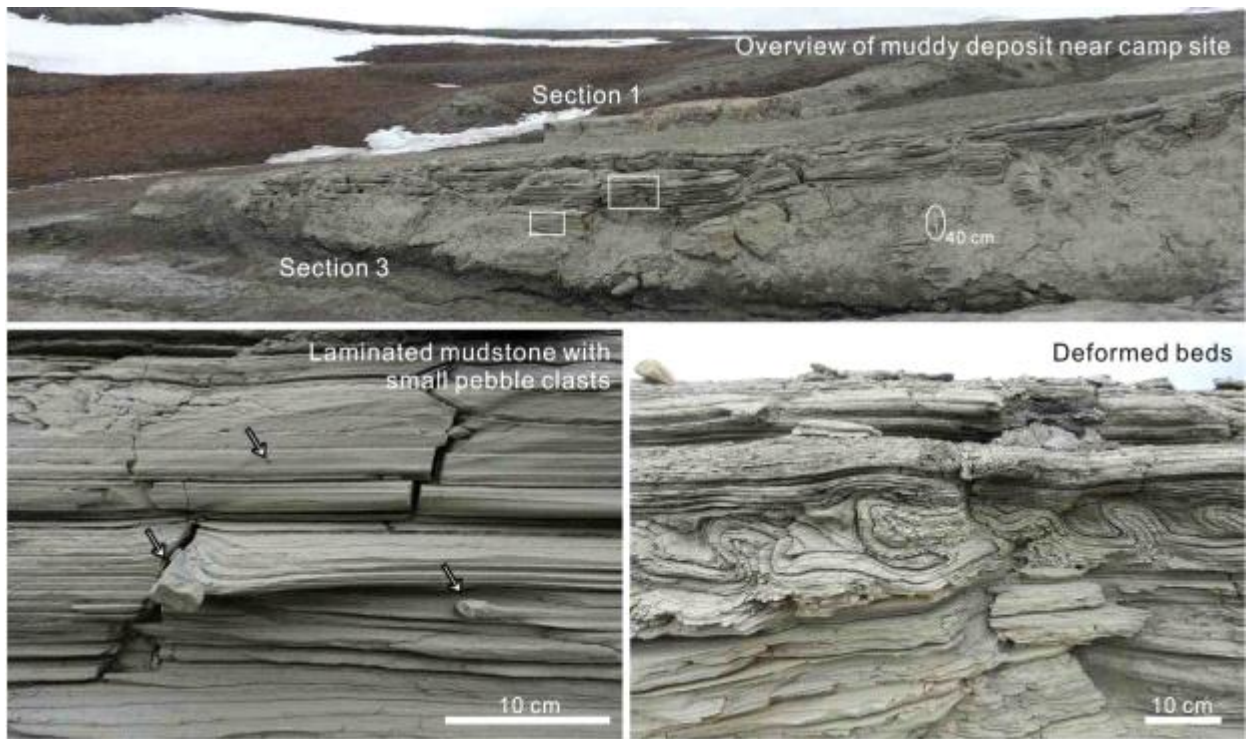


그림 81. 캠프지 주변의 미고화 퇴적층 전경과 상세구조

- 2018. 07. 11 ~ 2018. 07. 21 동안 북그린란드의 Sirius Passet 지역에서 현장조사 수행
 - 북그린란드 현장조사 사상 가장 많은 12명의 인원이 현장조사 수행(그림 82)
 - Sirius Passet 화석산지에서 330 kg의 캄브리아기 초기 동물 시료 채취
 - 완보동물을 포함한 현생 무척추동물 다수 채취



그림 82. 북그린란드 역대 최대 규모의 극지연구소 2018년도 현장 캠프 모습



그림 83. 북그린란드 현장에 설치된 극지형 이글루

○ 북그린란드 현장 인프라 구축

- 현장조사 장비 저장을 위한 극지형 이글루 구축(그림 83)
- 북그린란드 지역 중심부 최초의 Automatic Weather Station (AWS) 설치(그림 84)
- 기존에 설치된 유일한 AWS는 북그린란드에는 북쪽 끝 Kap Morris Jesups에 있음

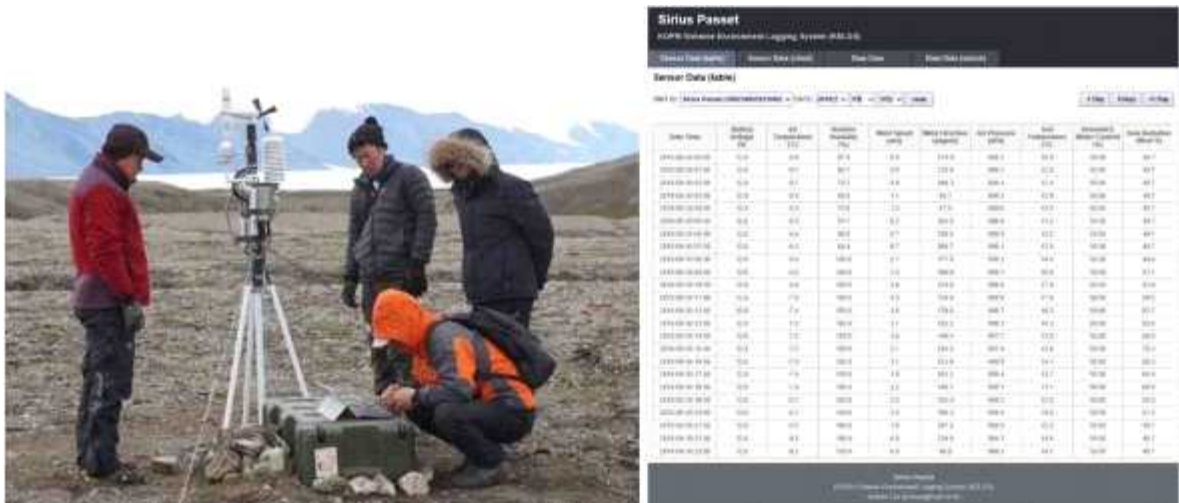


그림 84. 2018년 북그린란드 현장에 설치된 AWS(좌)와 인공위성을 통해 들어오는 데이터(우)

- 고무보트와 수심측정기를 이용하여 J.P. Koch Fjord의 최초 해양 조사(그림 85)
- 100 m 이상의 깊이를 J.P. Koch Fjord에서 확인하고, Arctic char와 같은 어류 및 단각류 (amphipod)의 존재 확인



그림 85. 고무보트를 활용하여 J.P. Koch Fjord의 수심을 측정하는 모습

- 북동그린란드의 Ella Island에서 대한민국 최초 현장 조사 수행
 - 10명으로 구성된 현장조사 인원이 2019. 8. 5 ~ 2019. 8. 15 까지 현장 캠프를 설치하고 현장조사 수행 (그림 86)
 - 현장조사를 위해 아이슬란드의 Norland Air와 직접 계약을 체결하고 트윈오토를 섭외(그림 87)



그림 86. 북동그린란드의 Ella island에 설치한 현장 캠프 전경



그림 87. 현장조사 지역까지 이용한 트윈오팀터 모습



그림 88. 캠프에서 바라본 에디아카라기-전기오르도비스기 암체(좌)와 근접 사진(우)

- 해당 지역의 선캄브리아기, 캄브리아기, 오르도비스기의 샘플 최초로 채취 (그림 88)
- 전기 캄브리아기(Cambrian Stage 4)의 Bastion층 상부의 새로운 노두 발견하고, 세일 층 사이의 탄산염 노두 채취
- 최후기 에디아카라기에서만 산출되는 것으로 알려진 cloudinid의 일종으로 보이는 새로운 형태의 자포동물 관련 화석 발견(그림 89)

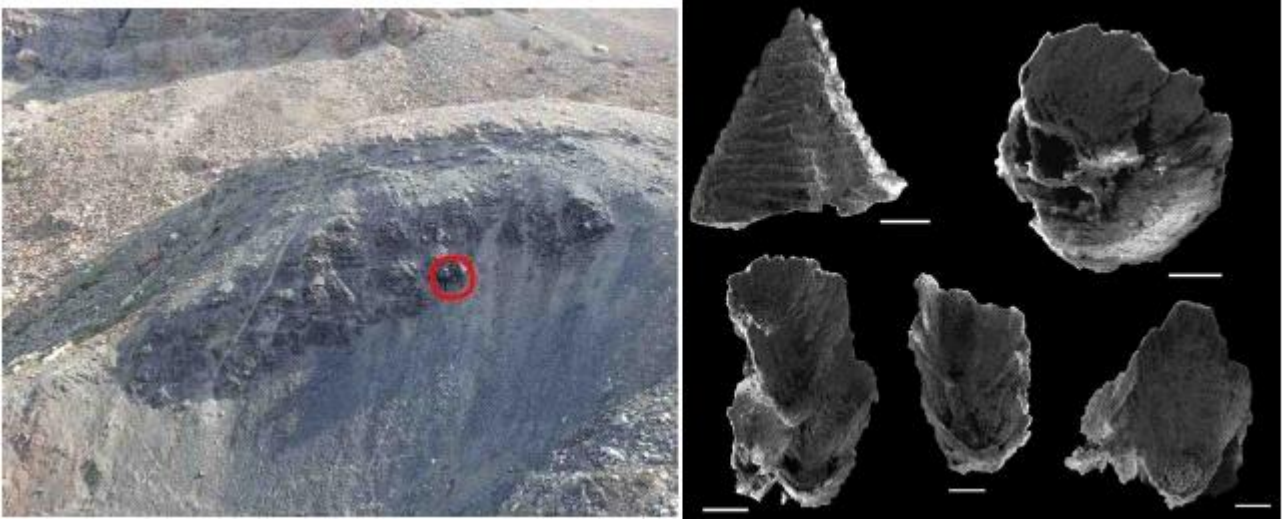


그림 89. 새롭게 발견한 Cambrian Stage 4의 Bastion층 상부 노두(좌)와 채취한 탄산염 노두에서 추출한 새로운 형태의 자포동물 관련 화석(우). 스케일을 위한 붉은 원 안의 연구자들

- Bastion층 상부에 위치한 Ella 층의 새로운 노두 2 지역 발견(그림 90)



그림 90. 새롭게 발견한 Ella 층의 노두 2곳. 스케일 위한 붉은 원 안의 연구자들

- 미생물 bioherm 형태로 이루어진 초기오르도비스기의 생물초 발견(그림 37)
- 미생물로 이루어진 bioherm의 기본 형태는 원통형으로, 생물초의 상부 표면에서 보았을 때, 특징적인 원모양을 보이는데, 이러한 형태의 미생물 bioherm은 완전히 새로운 유형(그림91)



그림 91. 새롭게 발견된 초기 오르도비스기 미생물초의 상부표면(좌)와 측면모습(우, 붉은선으로 표시)

- 현장조사 장비를 동남그린란드의 관문인 Konstabel Pynt에 보관. 추후에 다시 사용 예정 (그림 92)



그림 92. 동남그린란드의 관문인 작은 공항, Konstabel Pynt에 보관 중인 현장조사 장비

3.5. 원시지구환경 규명

3.5.1. 그린란드 선캠브리아이언 지각 진화

그린란드는 초시생대(Eoarchean)에서부터 신생대에 이르기까지의 다양한 암석으로 구성되고, 시생누대-원생누대-현생누대에 이르는 다양한 시기의 조산운동 기록을 간직한다(그림 93). 시생누대 암체인 북대서양 강괴(North Atlantic Craton)는 38억년에서 28억년의 원암형성 연령을 보이고 여러 종류 터레인의 병합(대륙-대륙 충돌)에 의해 시생누대에 완성되었다(Henriksen, 2008; Windley and Garde, 2009; 그림 94).

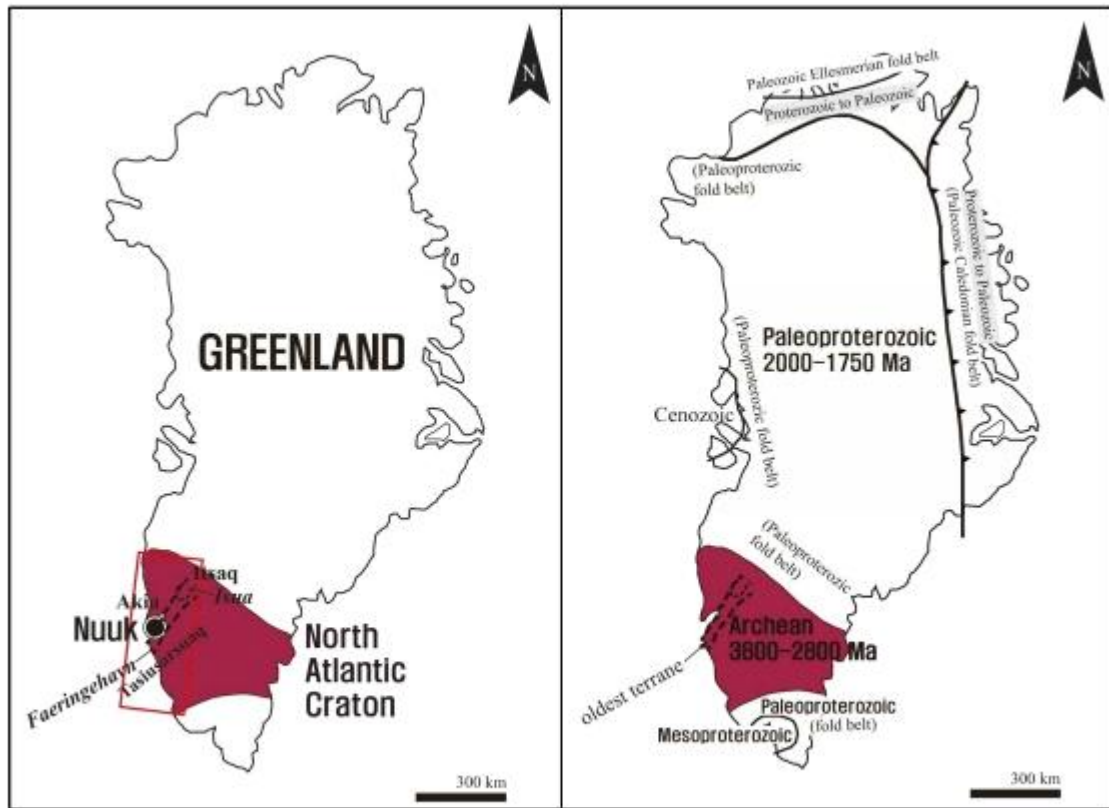


그림 93. 그린란드의 지체구조와 시생누대 암체(북대서양강괴, North Atlantic Craton; Henriksen, 2008)

그린란드 고원생대 암체는 시생누대 암체의 분열, 재활성화, 재결합에 의해 형성되었다. 북대서양 강괴 주변으로 고원생대 조산대(19~18억년 전)가 형성되었고, 18~17억년전 시기에 이르러 그린란드 대륙은 현재와 비슷한 규모의 대륙으로 발전하였다(Henriksen, 2008; St-Onge *et al.*, 2009). 이후 중원생대 퇴적분지가 북동(Independence Fjord Basin)과 북서(Tule Basin)그린란

드에 형성되었고, 대규모 열곡대(Gardar rift zone)가 남그린란드에 발달하였다(Henriksen, 2008). 신원생대 퇴적분지는 북동(Hagen Fjord Basin)과 동(Eleonore Bay Basin) 그린란드에 발달하였다(Henriksen, 2008). 초기 고생대 퇴적분지는 북그린란드(Franklinian Basin)와 동그린란드(Kong Oscar Fjord Basin)에 발달하였고, 이들 퇴적분지는 중기 고생대에 각각 엘래스머리안(Ellesmerian) 조산운동과 칼레도니안(Caledonian) 조산운동을 경험하였다(그림 90).

3.5.2. 그린란드 초기 시생누대 지구조환경

남서그린란드는 초시생대 잇사크 편마암 복합체(Itsaq Geniss Complex)와 중시생대(Mesoarchean) 아키아(Akia)-타시우스사수악(Tasiusarsuaq) 터레인으로 구성된다. 잇사크 편마암 복합체의 이수아(Isua)지역은 초시생대의 원암형성연령(38~37억년 전)과 변성연령(~36.5억년 전, 이수카시안(Isukasian) 조산운동)을 간직하는 그린란드 최고기 oldest 암체 지역이다(그림 93-95).

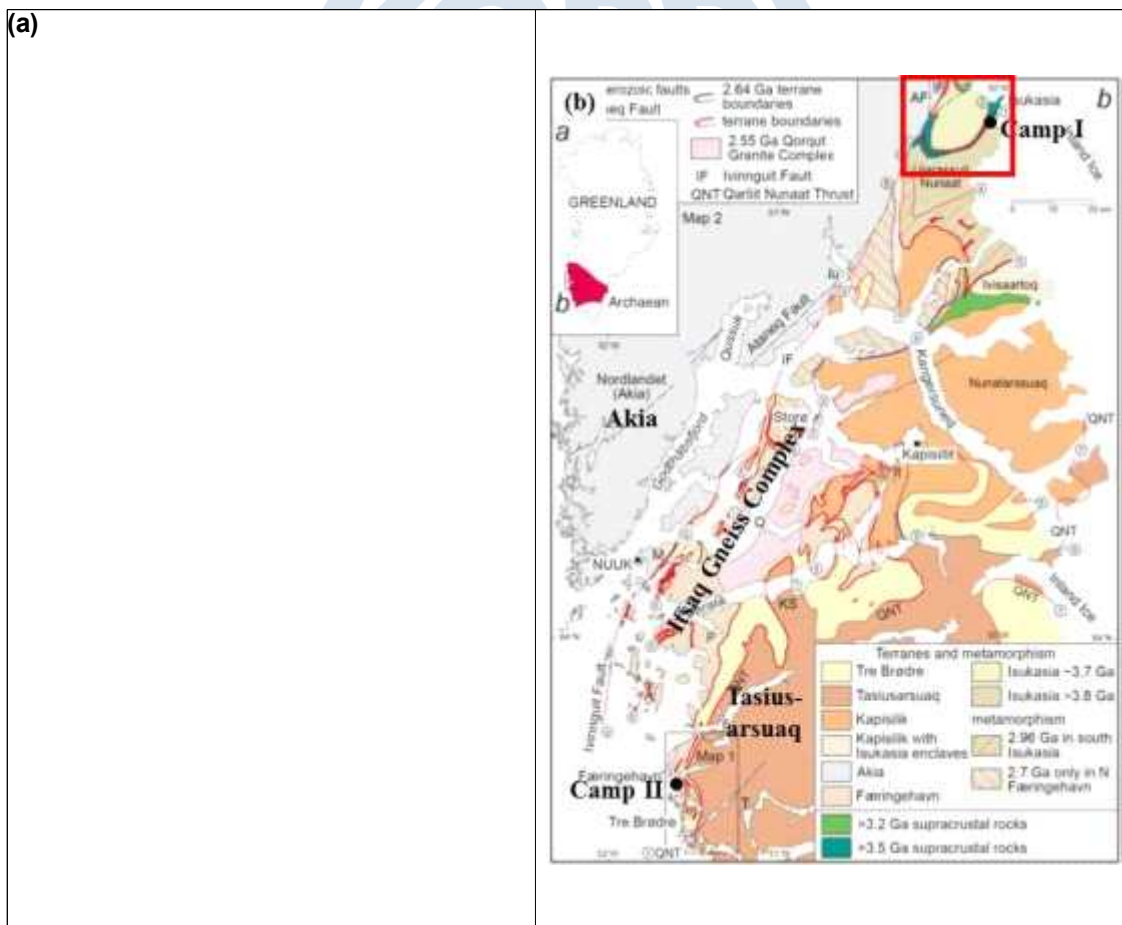


그림 94. 그린란드 시생누대 암체와 지체구조. (a) 남서 그린란드 시생누대 지질(Windley and

Garde, 2009), (b) 초시생대 잇사크(Itsaq) 편마암 복합체(그린란드 최고기oldest 암체)와 주변 지질(Friend and Nutman, 2019). 2018년 극지연구소 연구 캠프(Camp I, Camp II) 위치

초기 시생누대 지구조운동양상을 파악하기 위해 2018년 이수아복합체 지역을 지질조사하였다(그림 95-99). 이수아복합체 북부, 상부지각암대(supracrustal belt)에서 초시생대 심성암, 화산암, 쇠설성 퇴적암, 변성퇴적암, 맨틀 감람암, 호상철광(banded iron formation, BIF) 등 15개 (40 kg) 시료를 확보하였다. 조사 과정에서 3.7 Ga 이상의 연령으로 보고된 초시생대 퇴적구조와 생물흔적(스트로마톨라이트)을 관찰하였다. 확보된 시료는 초시생대 쇠설성 퇴적암(사암), 생화학 퇴적암(돌로마이트), 호상철광(BIF) 시료를 포함한다(그림 96, 97). 초기 시생누대 변성작용과 변형과정을 파악하기 위하여 초시생대 변성암(> 3.7 Ga 원암 연령, 3640~3680 Ma 변성작용) 시료를 채취하였고, 빙하하부 미노출지의 지질정보를 획득하기 위하여 빙하 전면부의 하천에서 현생 쇠설성퇴적물 시료 채취하였다(그림 98). 변성감람암은 맨틀암석으로써 3640~3680 Ma 시기 이수아복합체 형성과정(변성작용)에서 맨틀 깊이에서 지각으로 올라온 것으로 추정된다. 변성 전 맨틀광물을 선별한 후 미량원소 분석을 수행하여 초시생대(> 3.7 Ga) 맨틀성분을 획득할 예정이다. 상부지각암대 대부분의 변성암은 압쇄암화 되었고 일부 지역에서는 습곡된 압쇄엽리가 관찰된다(그림 99). 상부지각암대에서 확인되는 미변형 퇴적암과 변형된 변성암의 동시 출현은 초기 시생누대 이수아복합체 형성과 당시 변성작용을 해석하는데 큰 시사점을 지닌다.

획득된 시료에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 분석 결과는 이수아복합체 지역이 ~37억년전 화성활동(G11/#171 변성토날아이트, 3703 ± 2.5 Ma; G11/42 규장질 변성화산암 3709 ± 2.8 Ma)과 ~36.5억년전의 화성활동(G11/37 화강섬록암, 3636 ± 5.0 Ma) 및 변성작용(G11/#171, 3678 ± 4.2 ; G11/42, 3640~3680 Ma)에 의해 형성되었음을 지시한다(그림 95, 100). 이수아복합체 초시생대 변성작용의 양상을 추적하기 위하여 상부지각암대에서 획득된 석류석-흑운모 편암(G11/L051)에 대한 변성 압력(P)-온도(T) 조건을 계산하였다. 석류석-흑운모 편암(G11/L051)은 석류석 반상변정의 발달과 매트릭스의 변형 양상을 토대로 초시생대 변성과정(~3.65 Ga)에서 주로 전단변형 되었음이 드러난다(그림 101). 석류석 반상변정의 성분 변화는 중심부(core)의 높은 Ca(Xgrs) 함량과 다소 낮은 Mg(Xprp) 함량, 주변부(rim)에서의 낮아진 Ca(Xgrs) 함량과 다소 높아진 Mg(Xprp) 함량으로 대표된다(그림 102). 석류석-흑운모 편암(G11/L051)의 전암 성분(MnNCKFMASHT) 가상단면(pseudosection), 석류석 성분(garnet isopleth), 석류석-흑운모 지온계(garnet-biotite geothermometer)를 이용하여 변성 P-T를 계산하면, 석류석-흑운모 편암(G11/L051)은 520~530°C의 정점온도에서 5.5 kbar에서 2.0 kbar로 압력이 하강하는 저압형(low-P/T type) 변성작용을 경험한 것으로 해석된다(그림 103, 표 2~6). 초기 시생누대의 지온구배, 이수카시안 조산운동 양상, 이수카시안 이후 조산운동의 영향 등을

고려하여 이수아복합체 상부지각암대에서 획득된 저압형 변성작용의 실체를 추후 구체화할 필요성이 제기된다.

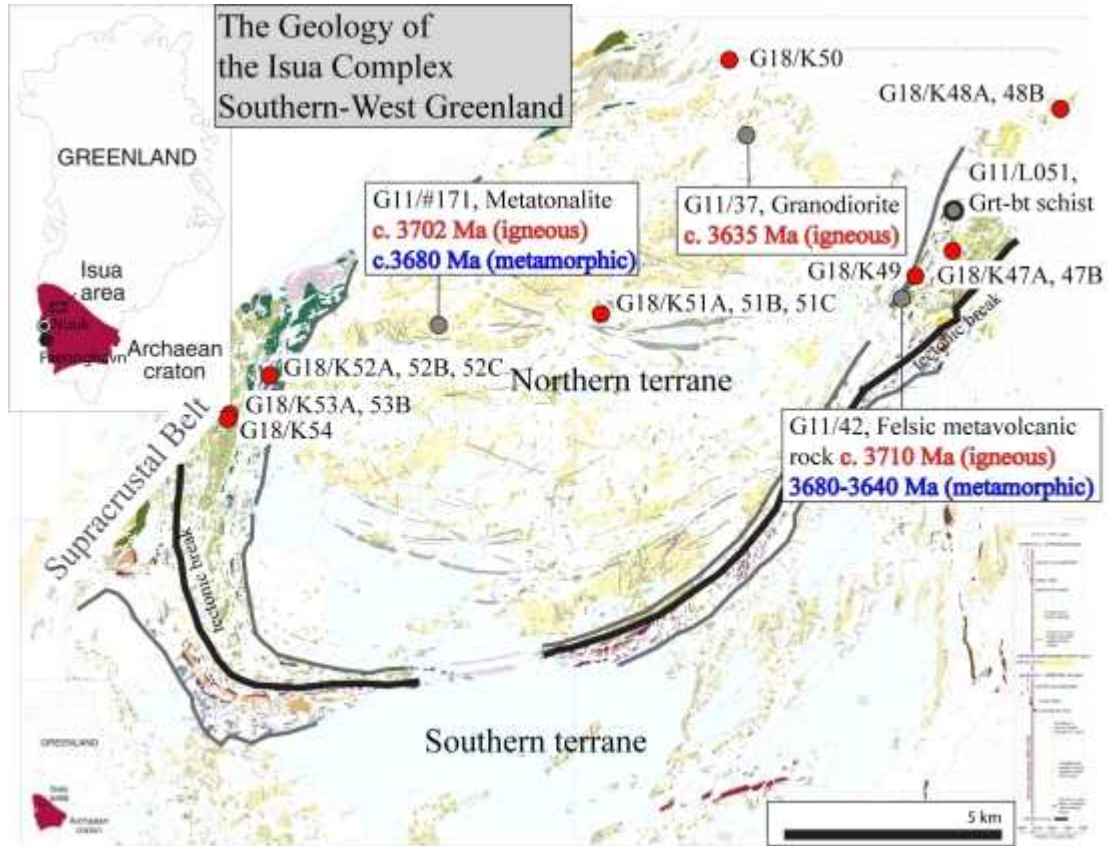


그림 95. 초기 시생누대 이수아 복합체와 주요 시료 채취 지점, SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 분석 결과(지질도 출처: Nutman and Friend, 2009). 상부지각암대(supracrustal belt) 석류석-흑운모 편암(G11/L051)의 시료 채취 지점.



그림 96. 초기 시생누대 이수아복합체 현장 지질조사(2018년), 호주 Wollongong 대학 연구진과
 공동 야외조사: 초시생대 심성암, 화산암, 쇄설성 퇴적암, 변성퇴적암, 맨틀 감람암,
 호상철광(BIF) 시료 확보



그림 97. 초시생대(> 3.7 Ga) 퇴적구조 및 생물흔적. (左) 초시생대 돌로마이트와 퇴적층리, (右
上) 사암에서 확인되는 초시생대 사층리, (右下) 초시생대 스트로마톨라이트



그림 98. 초시생대 변성암과 현생퇴적물 채취. (左上) 호상철광(BIF), (右上) 석류석-흑운모
편암, (左下) 변성토날라이트, (右下) 빙하하부 기반암의 연대정보를 파악하기 위하여 빙하전면
하천에서 현생쇄설성퇴적물 채취

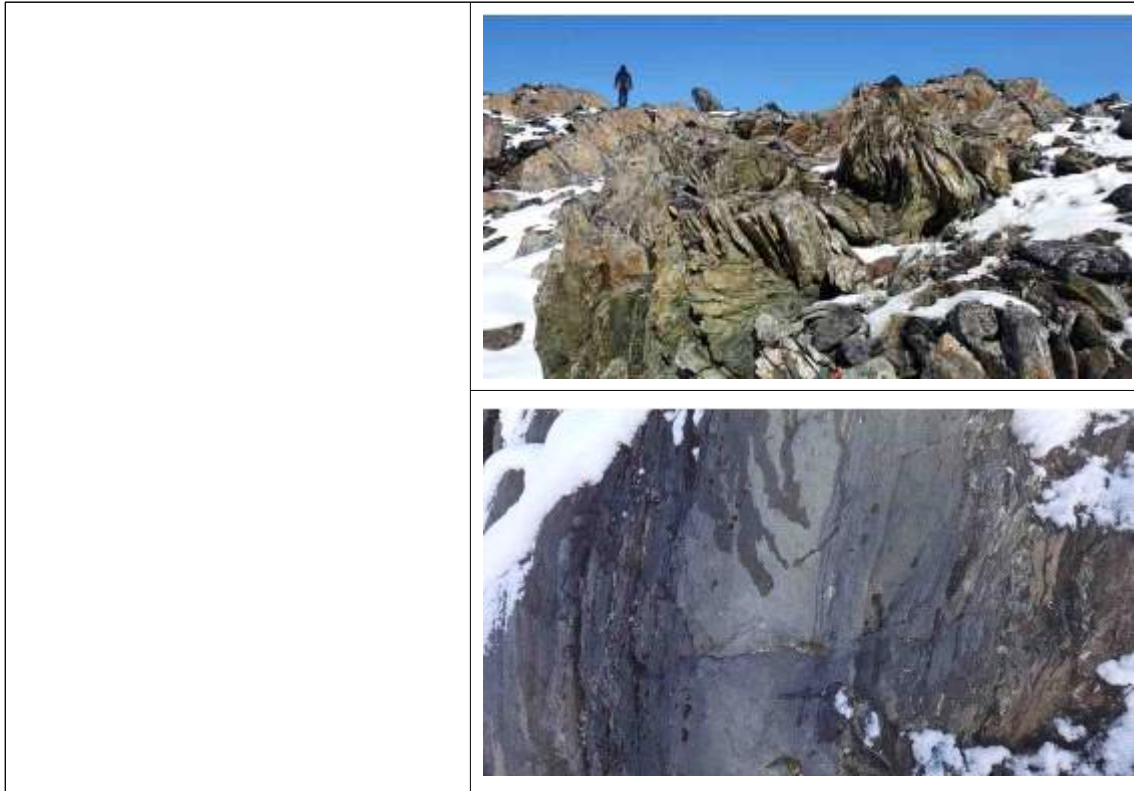


그림 99. 초시생대 변성암. (左) 보니나이트질 변성화산암, (右上) 압쇄작용과 습곡작용에 의해 변형된 변성감람암(맨틀), (右下) 저변성 이질암.

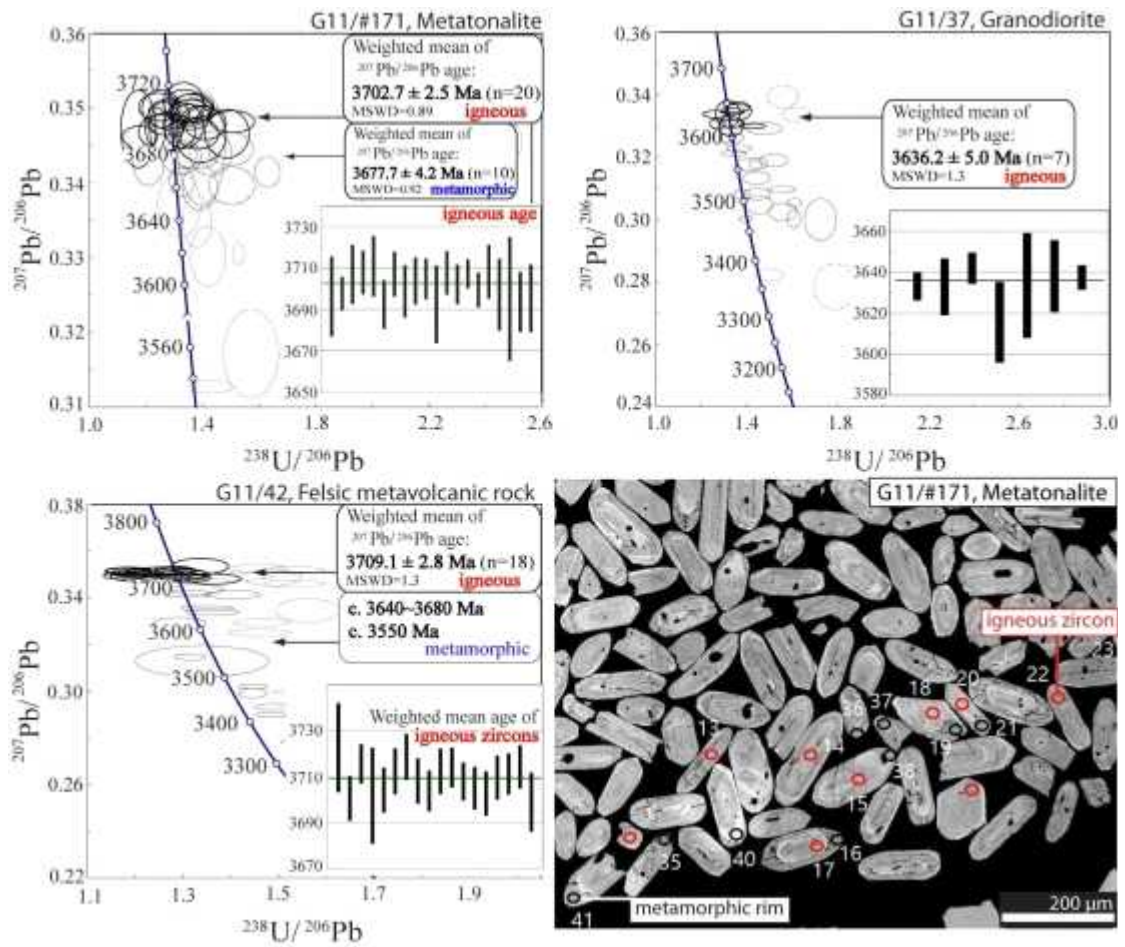


그림 100. 이수아복합체 주요 시료 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 분석 결과와 변성토날라이트(G11/#171) 저어콘 BSE 이미지. 분석장비: SHRIMP IIe, JEOL 6610LV(한국기초과학지원연구원)



그림 101. 이수아복합체 석류석-흑운모 편암(G11/L051)의 편광현미경 사진. (a) 개방니콜, (b) 직교니콜, 약어: 석류석(grt), 흑운모(bt), 석영(qtz)

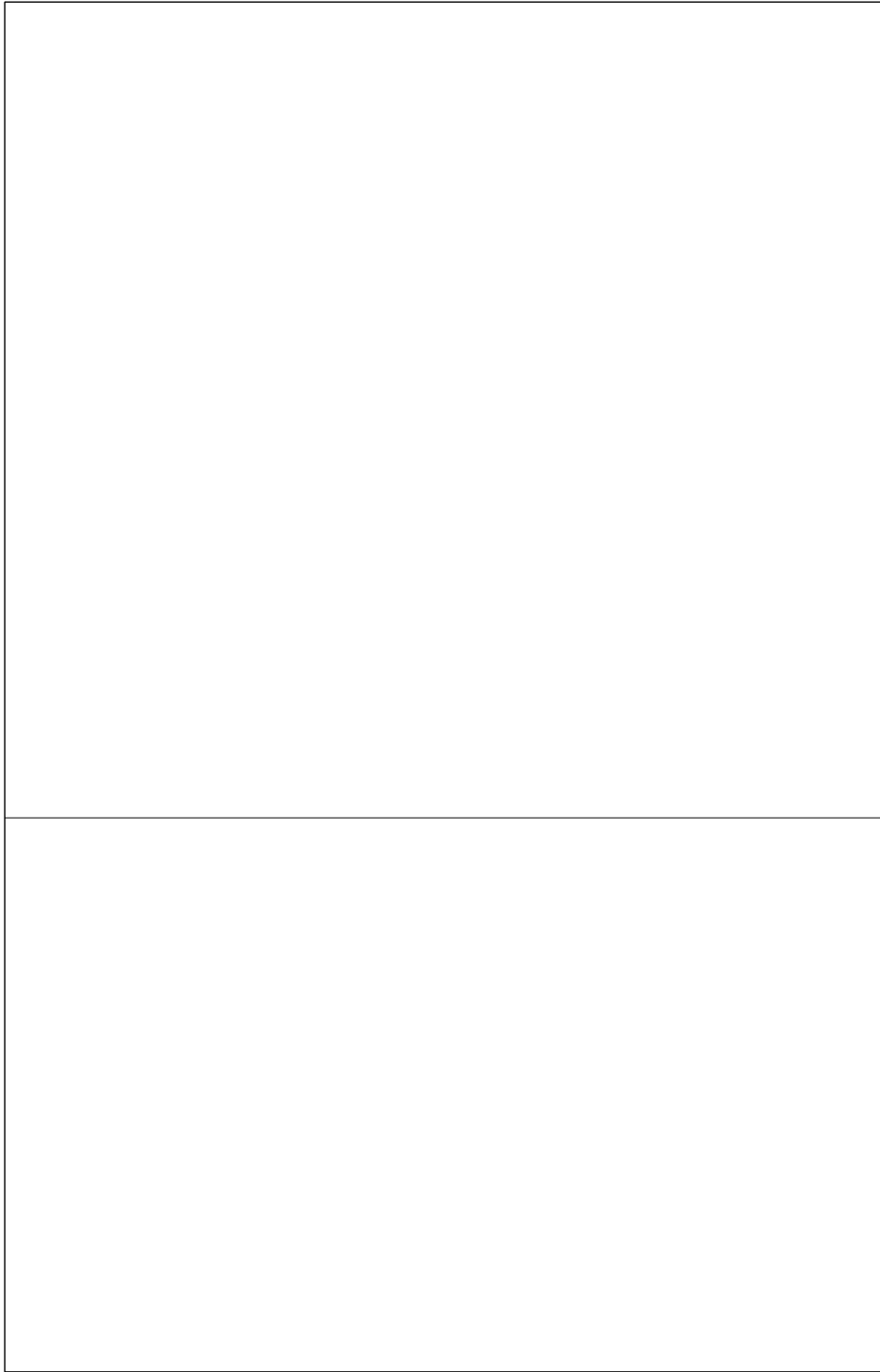


그림 102. 석류석-흑운모 편암(G11/L051)의 석류석 반상변정 BSE 사진과 성분변화 그림.
분석장비: 전계방사 전자현미경(JEOL JXA-8530F; 극지연구소)

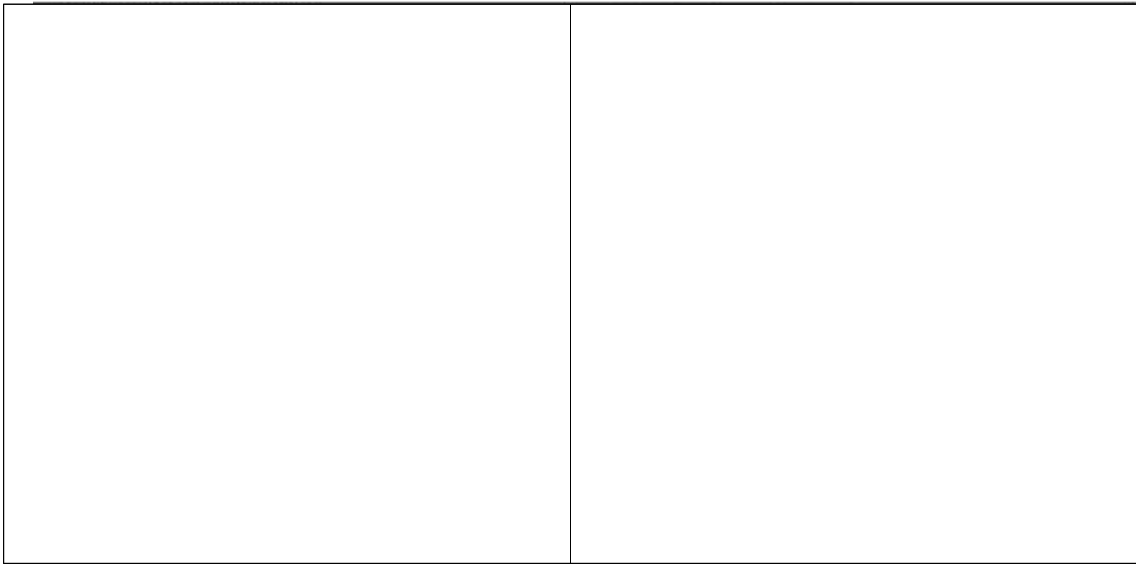


그림 103. PERPLE_X 프로그램을 이용한 석류석-흑운모 편암(G11/L051)의 변성
 가상단면(MnNCKFMASHT). 석류석 반상변정 성분의 isopleth(Xalm, Xgrs)와
 석류석(grt)-흑운모(bt) 지온계(geothermometer)를 이용한 변성 P-T 계산. 석류석-흑운모
 편암(G11/L051)의 평형 광물 조합은
 석류석(grt)+ 흑운모(bt)+석영(qtz)+사장석(pl)+티탄철석(ilm)+함수(H₂O)로 대표됨

표 2. 이수아복합체 상부지각암대의 주요 암체 전암 주원소 조성

Sample	G11/L051 grt bt schist	G11/42 felsic metavolcanic rock
<i>Major elements (wt.%)</i>		
SiO ₂	53.20	71.83
TiO ₂	0.43	0.28
Al ₂ O ₃	13.82	14.10
Fe ₂ O ₃	26.36	2.95
MnO	0.30	0.09
MgO	2.28	1.13
CaO	1.42	2.54
Na ₂ O	0.06	3.50
K ₂ O	2.78	2.67
P ₂ O ₅	0.03	0.04
LOI	-0.84	0.88
Total	99.84	100.00

LOI, loss on ignition

분석장비: X선 형광분석기(PANanalytical Axios Max; 극지연구소)

표 3. 석류석-흑운모 편암(G11/L051) 석류석 반상변정의 성분. 전자현미경 분석 결과(JEOL JXA-8530F; 극지연구소)

Sample Part No.	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282		
SiO ₂	36.79	37.11	36.78	36.94	37.13	37.01	37.12	37.14	37.22	37.23	36.96	36.85	36.87	37.06	37.11	37.17	37.07	36.99	37.19	37.14	37.2	37.15	36.99	37.3	37.22	37.62	37.16	37.09	37.14	37.33	37.35	37.25	37.37	37.23	36.84		
TiO ₂	0.22	0.03	0.05	0.06	0.03	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.03	0.07	0.08	0.05	0.04	0.05	0.03	0.06	0.05	0.05	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05	0.07	0.05	0.07	0.04	0.06	0.05	0	0.02			
Al ₂ O ₃	19.83	20.35	19.59	20.07	20.03	20.12	20.06	20.21	20.33	20.08	20.19	20.05	20.12	19.99	20.23	20.04	19.99	20.08	19.98	20.06	20.14	20.03	20.06	20.27	20.01	19.98	20.11	20.1	20.08	20.14	20.22	20.12	20.19	20.04			
Cr ₂ O ₃	0.13	0.08	0.05	0.08	0.11	0.14	0.16	0.08	0.11	0.14	0.13	0.11	0.13	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11				
FeO	39.74	40.4	40.24	40.15	39.73	36.99	36.62	36.58	36.7	36.73	36.99	36.62	36.58	36.4	36.21	36.01	36.38	36.53	36.47	36.73	36.4	36.09	36.39	36.74	36.43	37.05	35.99	36.45	36.08	37.18	35.93	37.05	37.32	38.32	40.53		
MnO	0.3	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12	0.22	0.32	0.46	0.73	0.9	0.88	0.88	0.74	0.55	0.64	1.07	0.89	1.08	1.11	1.17	1.17	1.11	0.78	0.83	0.52	0.63	0.76	0.6	0.44	0.39	0.3	0.26	0.14	0.2		
MgO	14.4	13.2	13.6	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2		
CaO	1.39	1.5	1.44	2	4.39	4.85	5.71	5.38	5.25	4.7	4.59	4.61	4.75	4.97	5.95	5.97	4.63	4.4	4.38	4.74	4.8	4.76	4.89	4.81	5.16	4.6	4.94	5.27	4.69	4.84	5.55	4.82	4.7	3.41	1.27		
Na ₂ O	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Total	99.85	101.12	99.91	100.36	100.3	100	100.38	100.33	100.39	99.89	99.85	99.73	100.11	99.81	100.47	99.95	99.5	100.19	100.43	100.4	100.64	100.18	100.47	100.05	100.12	99.53	100.41	100.1	100.67	100.12	100.53	100.51	100.44	100.19			
Abundant of cations on the basis of 22 oxygens																																					
TS	3.02	3.01	3.02	3.01	3.02	3.02	3.01	3.02	3.02	3.01	3.03	3.02	3.01	3.02	3.02	3.02	3.04	3.03	3.02	3.02	3.02	3.01	3.01	3.03	3.01	3.02	3.04	3.01	3.03	3.03	3.04	3.02	3.03	3.03	3.02	3.02	
TAI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Sum.T	3.02	3.01	3.02	3.02	3.02	3.01	3.02	3.02	3.02	3.02	3.03	3.02	3.01	3.02	3.02	3.02	3.04	3.03	3.02	3.02	3.02	3.01	3.01	3.03	3.01	3.02	3.04	3.01	3.03	3.03	3.04	3.02	3.03	3.03	3.02	3.02	
Al ^{IV}	1.92	1.84	1.93	1.93	1.92	1.93	1.93	1.93	1.92	1.92	1.93	1.93	1.93	1.93	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Cr	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Sum.A	1.94	1.85	1.94	1.93	1.92	1.94	1.93	1.94	1.93	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.93	1.93	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	
Fe ²⁺	2.75	2.75	2.77	2.74	2.57	2.52	2.59	2.68	2.69	2.51	2.51	2.49	2.68	2.67	2.68	2.68	2.51	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	
Mg	0.16	0.16	0.16	0.14	0.10	0.09	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Ca	0.12	0.13	0.13	0.18	0.38	0.42	0.46	0.47	0.46	0.41	0.40	0.49	0.42	0.43	0.44	0.44	0.49	0.39	0.38	0.41	0.42	0.42	0.43	0.42	0.43	0.40	0.43	0.40	0.43	0.40	0.43	0.40	0.43	0.40	0.43	0.40	
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Sum.B	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	
Sum.Cat	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
X _{Fe}	0.69	0.65	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	
X _{Mg}	0.89	0.92	0.90	0.85	0.80	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	0.85	0.84	0.82	
X _{Ti}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
X _{Cr}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
X _{Ca}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
X _{Na}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
X _{Sum}	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Total Fe as FeO, X _{Fe} = Fe ²⁺ /Fe ²⁺ +Mg; X _{Mg} = Mg/(Mg+Ca+Mn); X _{Ti} = Ti/(Ti+Mg+Ca+Mn); X _{Cr} = Cr/(Cr+Mg+Ca+Mn); X _{Ca} = Ca/(Ca+Mg+Ca+Mn); X _{Na} = Na/(Na+Mg+Ca+Mn)																																					

표 4. 석류석-흑운모 편암(G11/L051) 석류석 반상변정의 성분. 전자현미경 분석 결과(JEOL JXA-8530F; 극지연구소)

Sample Point No.	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311		
Garnet locality sheet (G11/L051), porphyroblast garnet																															
SiO ₂	37.09	36.67	37.06	37.34	37.05	36.91	37.44	37.12	36.92	36.96	37.19	37.15	37.07	36.99	36.95	37.29	37.31	37.08	36.98	37.15	36.97	37.44	37.31	37.16	37.11	37.45	37.42	37.3	37.31		
TiO ₂	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.08	0.04	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.06	0.1	0.08	0.07	0.08	0.03	0.05	0.06	0.07	0.05		
Al ₂ O ₃	20.2	20.1	20.17	20.29	20.16	19.99	20.3	20.06	19.99	20.01	19.95	20.18	20	20.03	20.04	19.9	20.22	20.02	20.09	20.11	19.97	20.12	20.05	20.12	19.99	20.27	20.1	20.02	20.19		
Cr ₂ O ₃	0.06	0.08	0.07	0.08	0.08	0.11	0.13	0.07	0.16	0.09	0.08	0.08	0.06	0.12	0.06	0.11	0.12	0.12	0.16	0.11	0.1	0.09	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.07	0.09		
FeO	40.49	40.8	40.75	37.51	37.74	35.79	34.23	37.4	36.81	36.6	35.69	36.83	36.12	36.82	36.63	35.83	36.97	36.48	36.91	36.59	36.67	36.74	36.41	36.84	37.48	34.27	36.29	37.41	36.08		
MnO	0.19	0.16	0.14	0.29	0.53	1.03	1.13	0.73	0.84	0.77	0.83	0.85	0.87	0.99	0.96	0.98	1.31	0.99	1.12	1.05	1.03	1	1.02	0.98	1.15	0.71	0.47	0.49			
MgO	1.2	1.08	0.94	0.65	0.69	0.58	0.5	0.62	0.61	0.57	0.61	0.58	0.61	0.65	0.62	0.62	0.63	0.56	0.6	0.58	0.59	0.58	0.61	0.56	0.52	0.64	0.7	0.67			
CaO	1.38	1.24	1.08	0.77	4.26	5.14	6.87	4.08	4.75	4.72	5.62	4.68	5.21	4.38	4.85	4.79	4.54	4.73	4.43	4.59	4.58	5.08	4.87	4.52	4.08	6.61	4.94	4.57	5.51		
Na ₂ O	0	0.03	0.02	0	0.01	0	0	0.02	0.03	0	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.02	0	0	0	0.01	0.03	0	0	0.03	0		
Total	100.63	100.16	100.26	100.95	100.54	99.9	100.64	100.11	100.05	99.86	99.88	100.41	99.96	100.04	100.21	99.57	100.84	100.38	100.26	100.12	100.01	101.16	100.45	100.47	100.35	100.44	100.27	100.67	100.39		
Number of cations on the basis of 12 oxygens																															
TS	3.02	3.03	3.02	3.02	3.01	3.02	3.02	3.03	3.01	3.02	3.03	3.02	3.02	3.02	3.01	3.05	3.02	3.02	3.01	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.03	3.04	3.03	3.03	
TAl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Sum.T	3.02	3.03	3.02	3.02	3.01	3.02	3.02	3.03	3.01	3.02	3.03	3.02	3.02	3.02	3.01	3.05	3.02	3.02	3.01	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.03	3.04	3.03	3.03	
AlVI	1.94	1.94	1.94	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.92	1.93	1.91	1.93	1.92	1.92	1.93	1.92	1.93	1.92	1.93	1.92	1.92	1.91	1.92	1.93	1.92	1.93	1.92	1.91	1.93		
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Cr	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
Sum.A	1.94	1.95	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.93	1.94	1.92	1.94	1.93	1.94	1.93	1.93	1.94	1.93	1.94	1.93	1.92	1.93	1.94	1.93	1.94	1.93	1.94	1.92	1.94		
Fe ²⁺	2.76	2.80	2.64	2.54	2.56	2.45	2.31	2.55	2.51	2.50	2.43	2.50	2.46	2.52	2.49	2.45	2.50	2.48	2.52	2.49	2.50	2.48	2.48	2.50	2.56	2.32	2.47	2.54	2.45		
Mg	0.15	0.13	0.11	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.08	0.09	0.08		
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07	0.08	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03		
Ca	0.12	0.11	0.27	0.41	0.37	0.45	0.59	0.35	0.42	0.41	0.49	0.43	0.46	0.38	0.42	0.42	0.39	0.41	0.39	0.40	0.40	0.44	0.42	0.39	0.36	0.57	0.41	0.40	0.48		
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Sum.B	3.04	3.05	3.04	3.05	3.06	3.04	3.04	3.05	3.04	3.05	3.04	3.05	3.04	3.05	3.04	3.04	3.05	3.04	3.05	3.04	3.05	3.06	3.04	3.05	3.03	3.02	3.05	3.04			
Sum_cation	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		
X _{Fe}	0.949	0.955	0.959	0.970	0.968	0.972	0.975	0.971	0.971	0.973	0.970	0.973	0.971	0.970	0.971	0.970	0.971	0.973	0.972	0.973	0.972	0.973	0.972	0.971	0.974	0.974	0.969	0.968	0.968		
X _{Mn}	0.000	0.017	0.017	0.032	0.039	0.045	0.060	0.041	0.042	0.042	0.047	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044			
X _{Ca}	0.038	0.033	0.086	0.133	0.119	0.144	0.191	0.134	0.131	0.133	0.158	0.131	0.147	0.122	0.136	0.136	0.136	0.131	0.122	0.128	0.128	0.141	0.135	0.126	0.113	0.185	0.139	0.128	0.154		
X _{Mg}	0.048	0.043	0.038	0.028	0.027	0.023	0.020	0.025	0.024	0.023	0.024	0.023	0.024	0.026	0.025	0.025	0.025	0.022	0.024	0.023	0.023	0.023	0.024	0.024	0.022	0.021	0.026	0.028	0.027		
X _{Na}	0.004	0.004	0.003	0.007	0.012	0.023	0.025	0.017	0.016	0.019	0.017	0.019	0.019	0.020	0.020	0.022	0.022	0.020	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021		

Total Fe as Fe²⁺; X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)
 X_{Mn} = Fe/(Fe+Mg+Ca+Mn); X_{Ca} = Ca/(Fe+Mg+Ca+Mn); X_{Mg} = Mg/(Fe+Mg+Ca+Mn); X_{Na} = Na/(Fe+Mg+Ca+Mn)

표 5. 석류석-흑운모 편암(G11/L051) 석류석 반상변정의 성분. 전자현미경 분석 결과(JEOL JXA-8530F; 극지연구소)

Sample	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517		
Port No.	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517		
	Garnet-biotite schist (G11/L051), porphyroblast garnet																															
SiO ₂	36.16	36.25	36.28	36.21	36.22	36.29	36.05	36.18	36.09	35.69	36.19	36.15	36.30	36.39	36.44	36.43	36.41	36.47	36.42	36.41	36.28	36.24	36.28	36.27	36.18	36.10	36.14	36.12	36.25	36.09		
TiO ₂	0.06	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.05	0.04	0.07	0.03	0.03	0.01	0.01	0.05	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	0.12		
Al ₂ O ₃	21.06	20.91	21.27	21.22	21.02	21.11	20.91	21.07	21.02	20.98	21.10	21.02	21.02	21.24	21.19	21.02	21.00	21.11	21.12	21.22	21.07	21.23	21.21	21.12	21.21	21.10	21.16	21.24	21.20	21.13		
Cr ₂ O ₃	0.11	0.06	0.11	0.04	0.07	0.06	0.13	0.11	0.07	0.13	0.08	0.09	0.08	0.11	0.09	0.15	0.07	0.10	0.06	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.05	0.09	0.05	0.07		
FeO	39.33	39.67	38.80	39.50	40.60	40.85	40.37	40.60	41.39	41.05	39.14	38.36	39.10	37.02	37.97	37.77	38.06	39.07	38.63	38.90	38.64	38.78	40.01	39.65	40.97	40.29	39.61	39.03	39.43	41.11		
MnO	0.22	0.21	0.22	0.21	0.19	0.13	0.10	0.11	0.09	0.13	0.09	0.11	0.09	0.16	0.12	0.15	0.13	0.13	0.13	0.12	0.10	0.10	0.12	0.06	0.07	0.14	0.21	0.19	0.25	0.20		
MgO	1.07	1.14	1.08	1.21	1.25	1.05	0.94	1.00	0.93	0.97	0.86	0.83	0.83	0.67	0.71	0.76	0.80	0.86	0.85	0.87	0.85	0.90	0.95	0.96	1.17	1.24	1.20	1.16	1.18	1.04		
CaO	2.64	2.10	3.10	2.25	1.19	1.61	1.65	1.78	1.47	1.44	2.92	1.62	3.00	4.71	4.17	4.13	3.73	3.00	3.20	3.26	3.17	2.20	2.20	2.13	1.19	1.29	2.96	2.85	2.24	1.03		
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Total	100.66	100.35	100.83	100.64	100.59	101.11	100.19	100.88	101.15	100.42	100.63	100.21	100.44	100.31	100.74	100.46	100.21	100.79	100.45	100.91	100.23	100.58	100.95	100.34	100.92	100.28	100.42	101.10	100.60	100.80		
Number of cations on the basis of 12 oxygens																																
Si	2.93	2.95	2.93	2.94	2.95	2.94	2.95	2.94	2.93	2.92	2.95	2.94	2.95	2.95	2.95	2.96	2.96	2.96	2.96	2.94	2.95	2.95	2.94	2.96	2.94	2.94	2.94	2.93	2.94	2.94		
Ti	0.07	0.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06		
Sum_T	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		
AlVI	1.95	1.96	1.95	1.96	1.96	1.95	1.96	1.95	1.94	1.93	1.97	1.96	1.96	1.98	1.97	1.96	1.97	1.97	1.97	1.98	1.96	1.97	1.98	1.96	1.98	1.96	1.97	1.94	1.97	1.96		
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01		
Cr	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
Sum_A	1.96	1.96	1.96	1.97	1.97	1.96	1.97	1.96	1.94	1.95	1.98	1.96	1.97	1.99	1.97	1.98	1.98	1.99	1.99	1.97	1.98	1.99	1.97	1.99	1.97	1.98	1.97	1.95	1.97	1.97		
Fe ₂	2.67	2.70	2.62	2.68	2.76	2.77	2.76	2.76	2.81	2.80	2.66	2.61	2.66	2.51	2.57	2.56	2.59	2.65	2.63	2.63	2.70	2.71	2.70	2.78	2.75	2.69	2.63	2.68	2.80	2.80		
Mg	0.13	0.14	0.13	0.15	0.15	0.13	0.11	0.12	0.11	0.12	0.10	0.10	0.10	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15	0.15	0.16	0.14	0.13		
Mn	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
Ca	0.23	0.18	0.27	0.20	0.10	0.14	0.15	0.16	0.13	0.13	0.25	0.32	0.26	0.41	0.36	0.36	0.33	0.26	0.28	0.28	0.28	0.19	0.20	0.19	0.10	0.11	0.18	0.25	0.20	0.09		
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Sum_B	3.04	3.04	3.04	3.04	3.03	3.04	3.03	3.04	3.06	3.06	3.02	3.04	3.03	3.01	3.03	3.03	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.01	3.03	3.01	3.03	3.02	3.03	3.05	3.03	3.03		
Sum_tot	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00		
X _{Fe}	0.954	0.951	0.953	0.948	0.948	0.956	0.940	0.958	0.961	0.960	0.962	0.963	0.963	0.969	0.968	0.965	0.964	0.962	0.962	0.962	0.962	0.961	0.959	0.958	0.952	0.948	0.949	0.942	0.950	0.957		
X _{Mn}	0.877	0.889	0.864	0.883	0.911	0.910	0.911	0.907	0.918	0.918	0.879	0.860	0.878	0.834	0.849	0.847	0.857	0.876	0.871	0.868	0.872	0.897	0.894	0.897	0.917	0.910	0.888	0.862	0.880	0.924		
X _{Ca}	0.072	0.058	0.085	0.063	0.032	0.044	0.044	0.047	0.059	0.038	0.081	0.101	0.083	0.132	0.117	0.114	0.105	0.083	0.090	0.091	0.090	0.061	0.063	0.059	0.031	0.034	0.058	0.078	0.063	0.027		
X _{Fe₂}	0.043	0.045	0.043	0.048	0.050	0.042	0.038	0.040	0.037	0.039	0.034	0.033	0.033	0.027	0.028	0.031	0.032	0.034	0.034	0.035	0.034	0.036	0.038	0.039	0.047	0.050	0.048	0.053	0.047	0.042		
X _{Mg}	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.003	0.005	0.004	0.006	0.005	
Total Fe as FeO; X _{Ca} = Ca/(Fe+Mg)																																
X _{Mn} = Mn/(Fe+Mg+Ca+Mn); X _{Fe₂} = Ca/(Fe+Mg+Ca+Mn); X _{Fe₂} = Mn/(Fe+Mg+Ca+Mn)																																

표 6. 이수아복합체 상부지각암대의 규장질 변성화산암(G11/42) 전암 미량원소 조성

	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
G11/42 Felsic metavolcanic rock	5.6	12.9	8.8	63	4	6.6	57	132	101	24	208	5.4	7.8	332	32.0	86.9	7.9	29.7	5.6	1.0	5.3
	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U									
	0.7	4.3	0.8	2.3	0.3	2.2	0.3	6.6	0.5	24	8.66	1.31	(ppm)								

분석장비: 유도결합 플라즈마 질량분석기(iCAP Q, Thermo Scientific, 극지연구소)

3.5.3. 그린란드 중·후기 시생누대 지구조환경

그린란드 중·후기 시생누대 지구조환경을 파악하기 위하여, 잇사크 편마암 복합체 남서쪽 끝의 패링하븐(Faeringehavn) 지역을 2018년 야외조사하였다(그림 93~94, 104). 야외조사 과정에서 초시생대 토날라이트(변성토날라이트), 화강암(화강편마암)과 중시생대 회장암(변성회장암), 반려암(변성반려암), 퇴적암(편암류), 화강암(변성화강암) 등 60개 시료(100 kg)를 획득하였다(그림 104~107).

초시생대 토날라이트와 화강암(> 3.6 Ga)은 변성퇴적암류를 포획하고 고철질 암맥에 의해 관입된다. 이들 암체는 변성작용 동안 편마암화-암쇄암화 후 습곡 되어 현재의 모습에 이르게 된다(그림 105). 중시생대 회장암 복합체는 회장암, 반려암, 초고철질암(누적화성암)을 포함한다. 회장암 복합체는 변성과정에서 변형되어 되어 초기의 화성조직이 대부분 재결정화 되어 나타난다(그림 106). 중시생대 암체는 포획체의 발달과 상호 관입 관계에서 변성퇴적암, 회장암 복합체, 이카토크 편마암(변성화강암)의 순서로 형성된 것으로 생각된다. 이들 암체는 대부분 변형되어 암쇄엽리를 가진다(그림 106, 107). 패링하븐 지역 초시생대 암체와 중시생대 암체는 대부분 NE-SW 방향의 암쇄엽리와 N-S 방향의 광물신장 선구조를 보인다. 이 변형구조는 중시생대 암체 형성 이후에 발달한 것으로 초시생대 암체와 중시생대 암체의 결합(병치)과 관련된 변성작용의 결과로 추정된다. 패링하븐 지역의 지질구조는 잇사크 편마암 복합체의 광역 습곡구조와 광역 암쇄구조의 지역적인 부분을 나타내는 것으로 사료된다(그림 94). 잇사크 편마암 복합체 주변으로 발달한 광역 습곡구조와 광역 암쇄구조의 발달 시기와 양상 그리고 광역 변성작용의 과정을 풀 수 있는 지구연대학-구조지질학-변성암석학적 연구가 추후 구체화되어야 한다.



그림 104. 2018년 캠프 준비(누크), 패링하븐 베이스캠프 설치, 호주 Wollongong 대학 연구진과 공동 야외조사

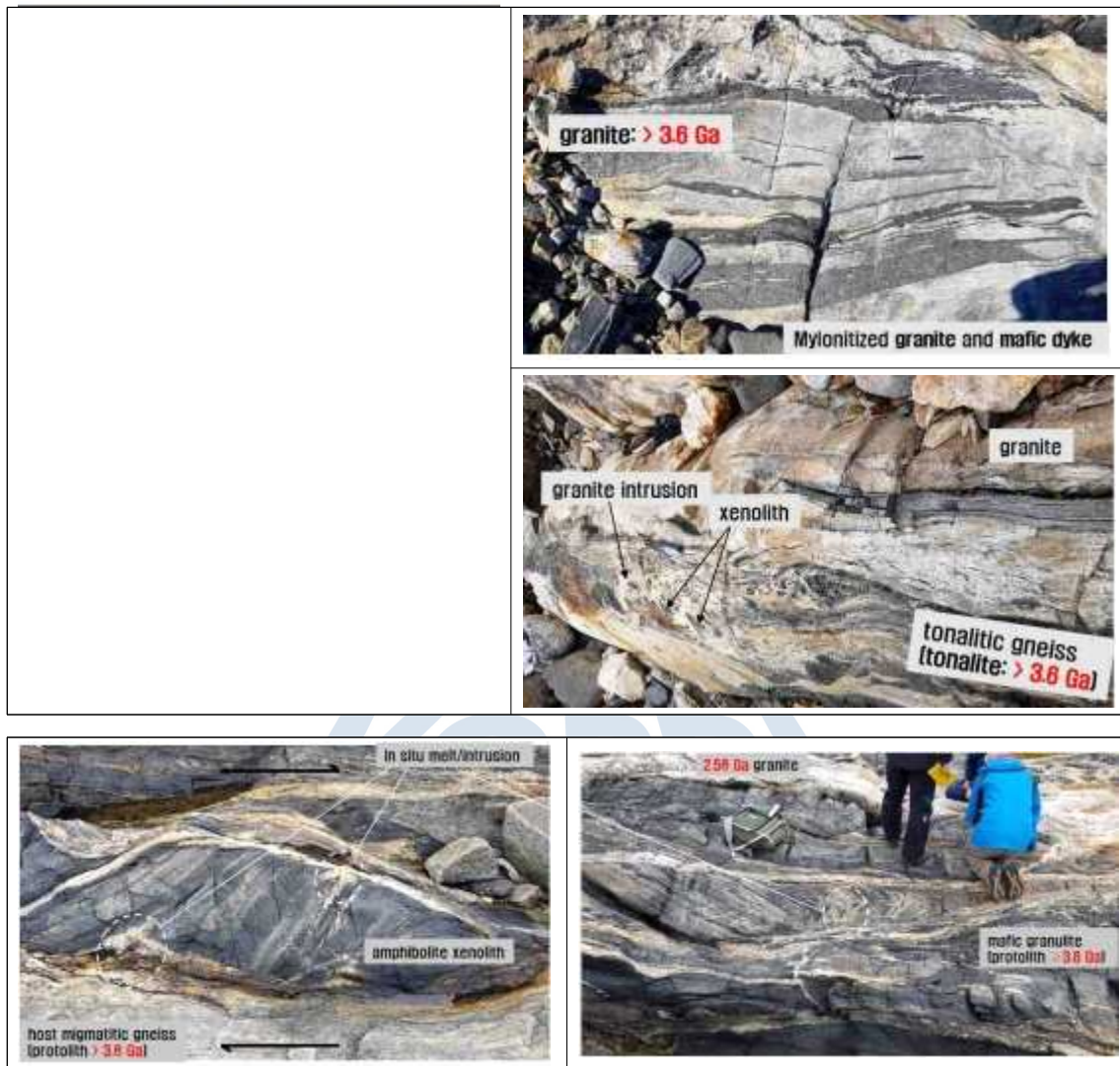


그림 105. 초시생대 토날라이트(토날라이트질 편마암)와 화강암류(화강편마암). (左上) 습곡된 토날라이트질 편마암, (右上) 화강암을 관입하는 고철질 암맥, 이후 두 암체의 압쇄암화, (右中) 변성퇴적암 포획체 + 토날라이트 + 고철질 암맥, 압쇄암화, 화강암 관입, (左下, 右下) 토날라이트 내 변성고철질암 포획체(mafic granulite, amphibolite), 변형구조와 S-C 조직, 후기 화강암 관입체



그림 106. 중시생대 회장암 복합체(변성회장암과 변성반려암). (左上) 회장암에 발달한 압쇄엽리 (右上) 회장암 복합체에서 확인되는 화성엽리(반려암-회장암), (左下) 회장암 복합체의 습곡구조(반려암-회장암) (右下) 회장암 복합체 내 반려암층



그림 107. 중시생대 퇴적암(변성퇴적암)과 회장암 복합체. (左上) 변성퇴적암(석류석 편마암과 각섬암)과 엽리조직, (右上) 지구조 경계부의 압쇄암화된 변성퇴적암, (左下) 중시생대 회장암 복합체 전면(남동쪽)에 발달한 초시생대 암체(짙은색, 정편마암), (右下) 이카토크 편마암(orthogneiss) 내 부단으로 나타나는 변성퇴적암(연홍색, grt-crd schist)

3.5.4. 북그린란드 Sirius Passet 원시 환경 연구

◦북그린란드 캄브리아기 퇴적암 시료 분석을 통한 고환경 및 고생태 데이터 확보(그림 108)

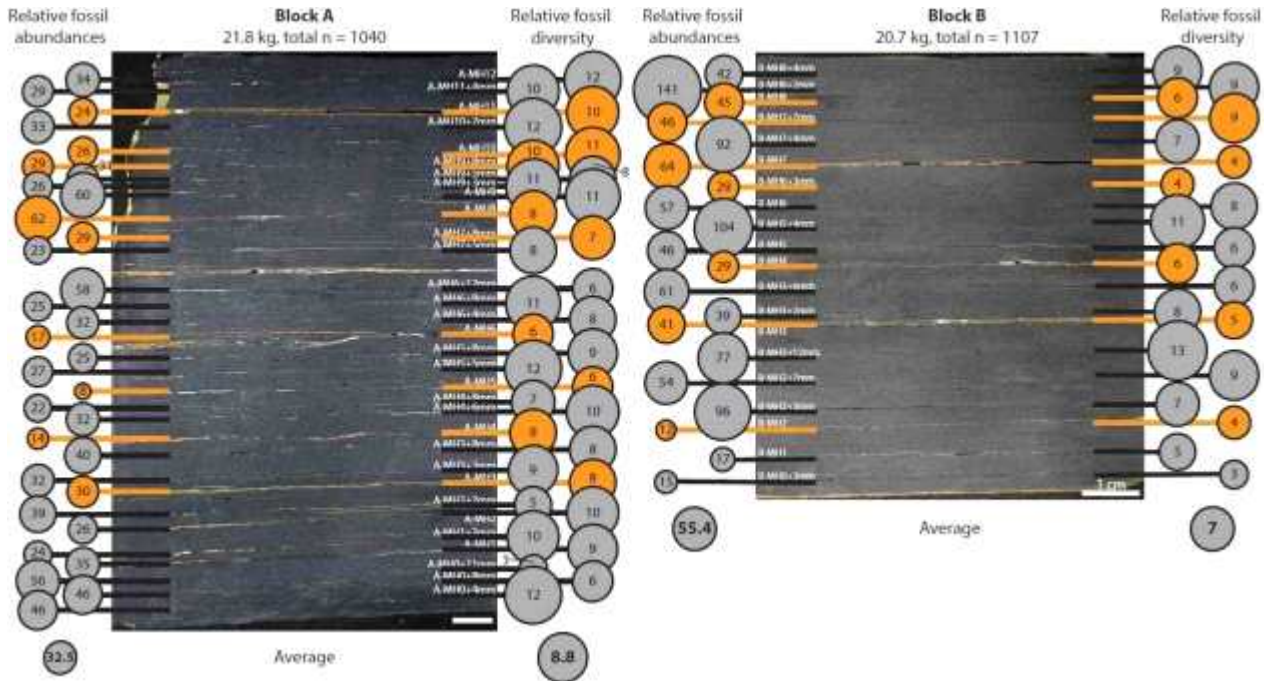


그림 108. Sirius Passet 화석 산출 층준의 연마편과 생태 및 고환경이 분석된 층준들

3.5.5. 층공충 화석을 이용한 고생대 지구환경 규명

○ clathrodictyid 및 labeciid 층공충 화석을 통한 고환경 분석

- 관련논문 Journal of Paleontology에 게재
- 층공충은 전기 고생대에 처음 출현하여 중기 고생대 말에 멸종한 대표적 저서생물로 골격구조가 주변 환경에 따라 큰 가변성을 보임
- 전기 고생대 층공충의 공생관계가 집중적으로 발생하는 암상을 연구함으로써 퇴적환경과의 연관성을 규명하고자 함 (그림 109)

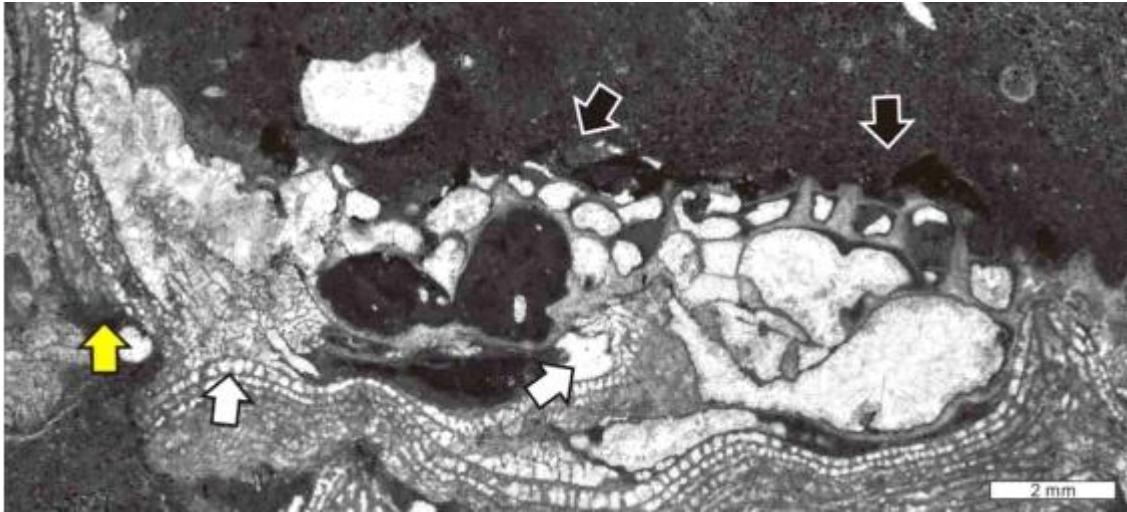


그림 109. 머드암 암상에서 산출된 3개 각기 다른 속의 층공충

- 일반적으로 층공충은 따뜻하고 얇은 해저환경에서 반구형 혹은 돔형으로 성장함
- 해당 연구에서의 암상은 주로 머드암 혹은 약간의 화석 조각들이 포함된 와케암 암상으로 보임
- 생물 골격의 유연성이 큰 *clathrodictyid*뿐 아니라 상대적으로 골격 형태가 덜 변하는 *labechiid* 역시 돔형보다는 해저를 덮는 방식의 기형적인 성장을 보임. 이 과정에서 형성된 층공충간 공생은 골격 성장을 위한 저서를 확보하기 위한 불가피한 전략으로 보임.
- 이는 결국 생물다양성이 높았던 전기 고생대의 해양환경이 생존압이 상당히 높았음을 반증
- 한편 다른 층준에서 층공충이 층공충이 아닌 다른 종류의 생물들을 포획하여 성장하는 형태를 포착, 포획된 생물들 및 퇴적물로 암상을 추정한 결과 주로 *patch reef*이 발달한 환경임을 알 수 있었음(그림 110)

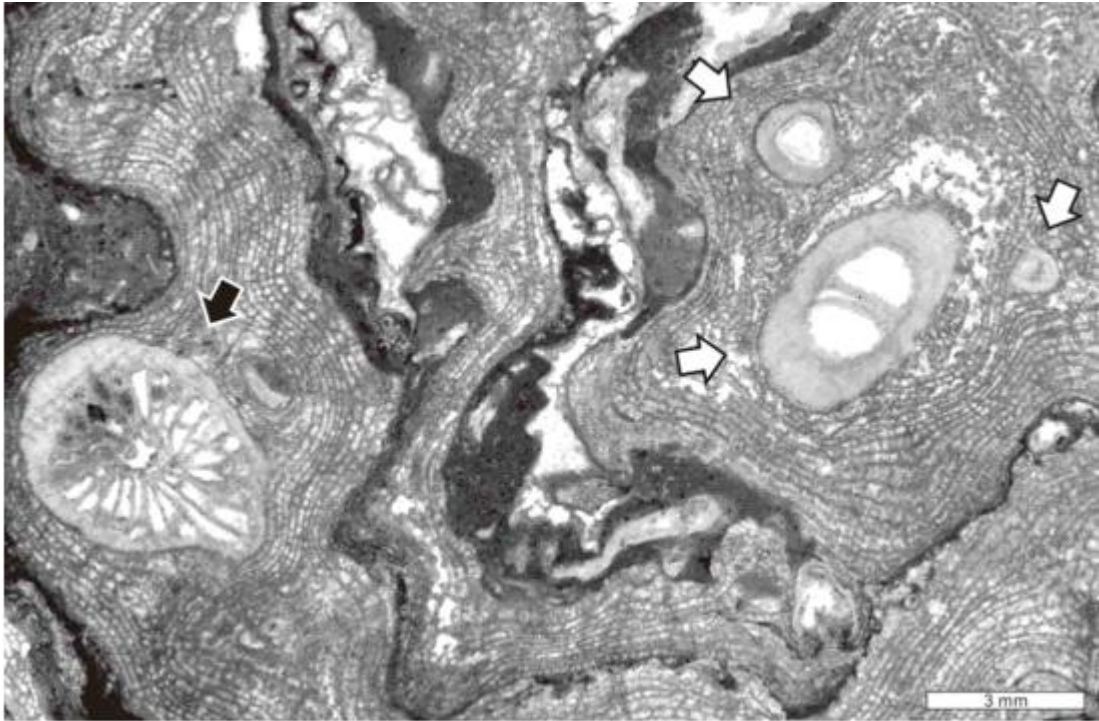


그림 110. 층공충이 다양한 종류의 생물들 및 퇴적물들을 포획한 암석의 박편

- 층공충은 주로 저위도 부근에서 생존하였으나 본 연구가 진행된 지역은 전기 고생대 시기 상대적으로 중위도에 위치하였을 것이라 예상되어 왔으므로, 곤드와나 연변부 지역들의 고지리 분포 및 기후 추정에 있어 추후 재검토가 필요할 것으로 보임

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4.1 연차별 연구개발 목표 및 달성내역

총 연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2017)	1. 원시절지동물 화석을 통한 절지동물 진화 규명	1-1. 북그린란드에서 산출된 원시 절지동물 화석의 형태 분석을 통하여 절지동물 초기 형태 진화 양상을 규명	0.5	형태분석 완료, 논문 작성 완료 및 제출 (in review) Micro CT의 화석 활용 논문 mrrIF 50%이상의 저널에 게재	50
	2. 초기동물 내부형태 분석	2-1. 북그린란드에서 산출되는 화석들의 EPMA 원소분석	0.1	목표치인 5개 이상의 샘플 분석 완료	100
		2-2. 암석코어용 MicroCT 분석방법 확립		위탁과제(협동과제)를 통한 MicroCT분석 방법 확립,	
	3. 북그린란드 현장조사	3-1. Remote sensing을 이용한 지질도 작성	0.3	Remote sensing을 이용한 지질도 작성 완료	100
		3-2 북그린란드 현장조사 수행		북그린란드 현장조사 완료	
	4. 현생 무척추동물 형태 비교 기반 마련	4-1. 캄브리아기의 초기 동물 형태와 비교연구를 위한 극지의 무척추동물 채집	0.05	북그린란드 및 북극 보퍼트해의 무척추동물 채집 완료	100
5. 그린란드 이수아복합체 시료분석	5-1. 초기 시생대 편마암복합체 시료 분석	0.05	초기 시생대 암석 시료 분석 완료	100	
계			1.0		75

2년차 (2018)	1. 초기 절지동물 및 무척추동물 진화 규명	1-1. 북그린란드에서 산출되는 캄브리아기의 절지동물 및 무척추동물 진화 연구	0.4	원시 절지동물 머리 신경 형태 진화 규명 논문 게재 논문 게재관련 보도자료 배포를 통한 다수의 언론 매체에 홍보	100
	2. 초기 동물 내부형태 분석	2-1. 북그린란드에서 산출되는 화석 10개 이상 EPMA 원소분석	0.1	목표치 10개 이상의 샘플 원소분석 완료	100
		2-2. Sirius Passet 화석 보존 상태 규명을 위한 비교 분석		중생대의 black shale에서 산출되는 거미 화석의 원소분석 완료 및 관련 논문 게재	
	3. 북그린란드 현장조사	3-1. Remote sensing을 이용한 광물 자원 지질도 작성	0.2	Remote sensing을 이용한 지질도 작성 완료	100
		3-2 북그린란드 현장조사 수행		북그린란드 현장조사 완료	
	4. 현생 완보동물과 원시절지동물 비교연구	4-1. 극지에서 채집한 현생 완보동물 형태 분석	0.1	북그린란드 및 북극 보퍼트해의 무척추동물 채집 완료	100
	5. 그린란드 이수아복합체 현장조사 및 샘플 분석	5-1. 이수아지역 현장야외조사 및 시료획득	0.2	현장조사 및 시료 채취 완료	100
5-2. 초기 시생대 시료 분석		원시지구환경 진화를 보여주는 저어콘 시료 분석 완료			
계		1.0		100	

3년차 (2019)	1. 초기 무척추동물 화석 형태 분석	1-1. 고생대 무척추동물 화석의 형태 분석	0.3	캠브리아기 원시 모악동물 화석 형태 분석 완료. 후기고생대 완족동물 형태 분석 및 진화 논문 게재	100	
	2. 초기동물 내부 형태 분석	2-1. 5개 이상 샘플 EPMA 원소 분석 및 암석코어용 Micro CT 분석을 통한 형태분석	0.1	10개 이상 샘플의 EPMA 원소 분석 수행. Micro CT를 활용한 모악동물 형태 분석 방법 확립	100	
	3. 현생 무척추동물 및 다른 지역의 캄브리아기 초기 동물 화석들과 비교연구	3-1. 현생 생물과 화석 생물의 형태 비교	3-2. 현생 완보동물 및 화석 형태 데이터 베이스 구축 3-3. 형태비교를 위한 극지 완보동물 및 선형동물 20개체 이상 채집	0.2	현생 해면동물과의 형태 및 생태 비교 논문 게재	75
		현생 신종 완보동물 형태 분석 논문 심사 중				
		그린란드의 완보동물 및 선형동물 채집 완료				
4. 북동그린란드 현장조사 및 광물자원 지질도 작성	4-1. 북동그린란드 현장조사 수행	4-2. 북서그린란드 광물자원 지질도 작성	0.2	북동그린란드의 Ella island에서 대한민국 최초 현장 야외조사 수행	100	
	Remote sensing을 활용한 북서그린란드 광물자원 지질도 논문 심사 중					
5. 원시지구환경 규명	5-1. 북극 지역 후기고생대 원시지구환경 규명	5-2. 원시지구환경 암석시료	0.2	북극 지역 후기고생대 원시지구환경 분석 논문 게재	100	
	원시지구환경 진화를 보여주는 시생대 및 캄브리아기 시료 분석 완료. 층공층 연구를 통한 전기고생대 환경 분석 논문 게재					
계			1.0		95	

4.1 대외기여도

□ 과학 분야

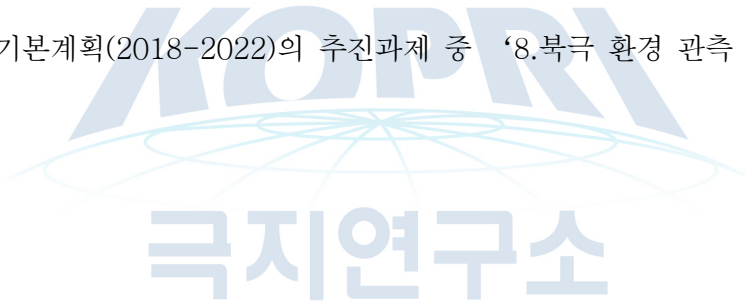
- 최고위도 북극 육상지역에서의 선도적 국제 공동 고생물학 연구
- 세계적 화석산지의 초기동물 화석 극지연구소 수장을 통한 데이터 접근성 제공

□ 사회/경제적 분야

- 본 과제를 통해 덴마크측과의 국제공동연구를 주도적으로 추진함으로써 국가역량 강화에 필요한 북극 네트워크 구성 및 북극권 국가와의 협력 기반 마련

□ 정책 분야

- ‘북극활동 진흥 기본계획(2018-2022)의 추진과제 중 ‘7.북극 파트너십 구축을 위한 기반 마련’에 기여
- ‘북극활동 진흥 기본계획(2018-2022)의 추진과제 중 ‘8.북극 환경 관측 활동 강화’에 기여



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 북극 현장조사 노하우 확립을 통한 미답지 연구 거점 구축
 - 북극에서 가장 외떨어진 오지의 극지연구소 다학제 연구 진출
 - 현장조사 노하우를 그린란드 및 타 북극 지역 진출에 활용

- 구축된 데이터를 바탕으로 초기동물 형태 진화 NSC급 논문 게재
 - 절지동물 다리의 초기 진화 연구
 - 초기 척삭동물 형태 분류 연구
 - 절지동물 머리 진화의 새로운 가설 제시
 - 최초로 화석으로 보고되는 동물문들의 초기 진화 규명
 - 좌우대칭 동물 초기 진화의 새로운 가설 제시

- EPMA를 활용한 고생물학 연구의 다변화 선도
 - 국제공동연구를 통한 다른 지역의 화석 EPMA 분석
 - 초기동물 연구 뿐만 아닌 고생물학 연구 전반의 세계적 선도기관으로 도약

- 극지연구 대국민 홍보
 - 북극에서 산출되는 화석의 세계적인 연구결과를 통한 극지 연구에의 대중적 주목
 - 세계 최초로 북그린란드 미답지역에 국내 미디어 동반 및 북극 다큐멘터리 제작

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 덴마크의 북동그린란드 인프라
 - 덴마크에서 북극 연구를 가장 활발하게 진행하고 있는 Aarhus 대학이 2015년 Villum Research Station(VRS)을 St. Nord 영내에 구축하여 북동그린란드 연구의 인프라를 지원
 - 그러나 덴마크 연구자들은 자국 연구비 부족으로 VRS를 활용한 연구과제들이 거의 없는 실정
 - Villum Research Station 운영진은 극지연구소를 비롯한 국제 연구기관의 VRS 인프라 사용을 적극 권장

- 독일의 북동 그린란드 연구
 - AWI는 2018년까지 그린란드에서 가장 큰 ice tongue인 북동그린란드의 79 glacier 연구를 대규모로 수행했음
 - BGR은 2018년 Circum Arctice Structural Evolution (CASE) 프로젝트의 일환으로 St. Nord에 헬리콥터를 동원하여 주변 지구물리 탐사를 수행

- 북부 그린란드에 대한 미-중-덴마크 정세
 - 미국은 그린란드에 중국의 영향력이 미치는 것을 극도로 경계하는 모습을 보임
 - 2018년 호주의 Ironbark 회사가 북그린란드 Citronen fjord에 소유하고 있는 아연광산에 중국인 투자자 2명을 방문시킴
 - 2019년 미국과 덴마크는 중국인의 북그린란드 방문을 막기위해 그린란드-롱이어비엔 간에 입국 절차가 없다는 것을 문제 삼아 2019년 5월까지 모든 그린란드-롱이어비엔 간의 인적 교류를 금지

제 7 장 참고문헌

- Budd, G.. 1993. A Cambrian gilled lobopod from Greenland. *Nature*, 364: 709–711.
- Budd, G. E.. 1995. *Kleptothule rasmusseni* gen. et sp. nov.: an? olenellid-like trilobite from the Sirius Passet fauna (Buen Formation, Lower Cambrian, North Greenland). *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 86: 1–12.
- Daley, A. C., and Peel, J. S.. 2010. A possible anomalocaridid from the Cambrian Sirius Passet Lagerstätte, north Greenland. *Journal of Paleontology*, 84: 352-355.
- Dawes, P. R.. 2004. Explanatory notes to the geological map of Greenland, 1: 500,000, Humboldt Gletscher, Sheet 6.
- Friend, C. R., and Nutman, A. P.. 2019. Tectono-stratigraphic terranes in Archaean gneiss complexes as evidence for plate tectonics: The Nuuk region, southern West Greenland. *Gondwana Research*, 72: 213–237.
- Henriksen, N.. 2010. Geological history of Greenland—four billion years of Earth evolution. *Polar Research*, 29: 469.
- Kolb, J., Keiding, J. K., Steenfelt, A., Secher, K., Keulen, N., Rosa, D., and Stensgaard, B. M.. 2016. Metallogeny of Greenland. *Ore Geology Reviews*, 78: 493–555.
- Lagebro, L., Stein, M., and Peel, J. S.. 2009. A new lamellipedian arthropod from the early Cambrian Sirius Passet fauna of North Greenland. *Journal of Paleontology*, 83: 820–825.
- Lee, S., Shi, G. R., Park, T. Y. S., Oh, J. R., Mii, H. S., and Lee, M.. 2017. Virtual palaeontology: the effects of mineral composition and texture of fossil shell and hosting rock on the quality of X-ray microtomography (XMT) outcomes using Palaeozoic brachiopods. *Palaeontologia Electronica*, 20(2), 3T.
- Nutman, A. P., Friend, C. R., and Paxton, S.. 2009. Detrital zircon sedimentary provenance ages for the Eoarchaeon Isua supracrustal belt southern West Greenland: Juxtaposition of an imbricated ca. 3700 Ma juvenile arc against an older complex with 3920–3760 Ma components. *Precambrian Research*, 172: 212–233.
- Park, T. Y. S., Kihm, J. H., Woo, J., Park, C., Lee, W. Y., Smith, M. P., Harper, D. A. T., Young, F., Nielsen, A. T. and Vinther, J.. 2018. Brain and eyes of *Kerygmachela* reveal protocerebral ancestry of the panarthropod head. *Nature communications*, 9: 1–7.
- Park, T.-Y., Nam, K.-S. and Selden, P.A. 2019 A diverse new spider (Araneae) fauna from the Jinju Formation, Cretaceous (Albian) of Korea. *Journal of Systematic Palaeontology*,

17: 1271–1297.

- Pour, A.B., Park, Y., Park, T.-Y., Hong, J.K., Hashim, M., Woo, J., and Ayoobi, I.. 2019. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions. *Geocarto International*, 34: 785–816
- Pour, A.B., Park, T.-Y., Park, Y., Hong, J.K., Zoheir, B., Pradhan, B., Ayoobi, I. and Hashim, M.. 2018. Application of multi-sensor satellite data for exploration of Zn-Pb sulfide mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland. *Remote Sensing*, 10: 1186.
- St-Onge, M. R., Van Gool, J. A., Garde, A. A., and Scott, D. J.. 2009. Correlation of Archaean and Palaeoproterozoic units between northeastern Canada and western Greenland: constraining the pre-collisional upper plate accretionary history of the Trans-Hudson orogen. *Geological Society, London, Special Publications*, 318: 193–235.
- Taylor, R. S.. 2002. A new bivalved arthropod from the Early Cambrian Sirius Passet fauna, North Greenland. *Palaeontology*, 45: 97–123.
- Vinther, J., Smith, M. P., and Harper, D. A.. 2011. Vetulicolians from the Lower Cambrian Sirius Passet Lagerstätte, North Greenland, and the polarity of morphological characters in basal deuterostomes. *Palaeontology*, 54: 711–719.
- Williams, M., Siveter, D. J., and Peel, J. S.. 1996. *Isoxys* (Arthropoda) from the Early Cambrian Sirius Passet Lagerstätte, North Greenland. *Journal of Paleontology*, 70: 947–954.
- Windley, B. F., and Garde, A. A.. 2009. Arc-generated blocks with crustal sections in the North Atlantic craton of West Greenland: crustal growth in the Archean with modern analogues. *Earth-Science Reviews*, 93: 1–30.

(국내 과제용)

주 의

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

극지연구소