

극지연구소장 귀하

북극권 그린란드 고생대 동물 초기진화와
원시지구환경 규명을 위한 기획연구

본 보고서를 “북극권 그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명을 위한
기획연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

Research planning for ealy animal evolution and the primitive
Earth system of the Arctic Greenland
(16 포인트 신명조체)

2017. 1. 31



2017. 01. 31

- 연구 책임자 : 박 태 윤
- 참여 연구원 : 우 주 선
- " : 최 문 영
- " : 이 종 익
- " : 이 미 정
- " : 진 영 근
- " : 박 창 근
- " : 김 대 영
- " : 김 효 선
- " : 오 창 환
- " : 김 지 훈

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

요 약 문

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2017.1.1.-1.31 (1개월)	단계 구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	중 사 업 명				
	세부사업명	연구정책·지원과제			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	북극권 그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명을 위한 기획연구			
연구책임자	박 태 윤	해당단계 참여연구원수	총 : 11 명 내부 : 9 명 외부 : 2 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지지구시스템연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>○ 북그린란드 캄브리아기 Sirius Passet 화석산지 현장조사 전략 수립</p> <p>○ 북그린란드의 캄브리아기 지층 연구 및 현장조사 범위를 설정</p> <p>○ Remote Sensing을 이용하여 지질도 작성이 불완전하게 되어있는 북부 그린란드 지역의 지질도 작성 방법 모색</p> <p>○ Sirius Passet 화석산지에서 산출되는 캄브리아기의 화석을 바탕으로 동물의 초기 형태진화 규명을 위한 연구 계획</p> <p>○ 북그린란드 Sirius Passet 화석산지에서 산출되는 초기 동물군에 대한 종합적 검토</p> <p>○ 극지연구소의 EPMA 및 지질자원연구원에서 개발한 암석용 MicroCT를 활용하는 캄브리아기 절지동물 화석 내부구조의 3차원 복원 방법 기획</p> <p>○ 국제 공동연구 협력 전략 구축: University of Bristol의 Jakob Vinther교수와 University of Copenhagen의 Arne Nielsen교수와 함께 공동으로 연구를 진행할 연구 주제 설정</p> <p>○ 지구상에서 가장 오래된 암석인 남서부 그린란드의 전기 시생대 이수아복합체 연구 전략 수립</p> <p>○ 남서부 그린란드 이수아복합체가 분포하는 지역의 현장조사 범위를 설정</p> <p>○ 그린란드 시생대로부터 캄브리아기까지의 원시지구환경 규명을 위한 연구방법 설정</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	그린란드, 캄브리아기, 동물 초기진화, 이수아복합체, 원시지구환경			
	영 어	Greenland, Cambrian, animal early evolution, Isua complex, primitive Earth environment			

I. 제 목

- 북극권 그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명을 위한 기획연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 극지연구소 연구부문 전략목표 ‘콜드 러시(Cold Rush)시대를 주도하는 전략적 북극진출 발판 마련’의 구체적 시행 필요
- 극지연구소 연구부문 성과목표 ‘북극 영향력 확대를 위한 환경, 자원 정보 확보’와 연계
- 그린란드 캄브리아기 화석 연구를 통해 캄브리아기에 최초로 등장했던 동물들의 초기 진화를 규명
- 그린란드 시생대 기반암 및 지체구조 진화 연구를 통해 최초 동물 등장의 바탕이 된 원시지구환경 진화 규명
- 따라서 본 과제는 그린란드의 고생물학 및 지질학 데이터를 바탕으로 지구상 최초로 동물이 등장했을 당시의 초기 진화와 그 바탕이 된 원시지구 환경의 진화과정을 규명하기 위한 연구를 기획하는 것을 최종 목표로 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 주요 연구지역인 북그린란드에서의 현장조사 대상 지역을 설정하고, 최신 Remote sensing 기법을 통하여 북그린란드의 새로운 지질도를 작성

할 수 있는 방법을 기획

- 북그린란드의 캄브리아기 동물 화석들을 바탕으로 Cambrian Explosion 당시 폭발적인 초기 형태 진화 양상 규명 방법을 기획
- EPMA와 Micro CT등을 활용하는 새로운 기법으로 북그린란드 캄브리아기 Sirius Passet 화석산지에서 산출된 캄브리아기 동물 초기 진화 양상 규명 연구 방법을 기획
- 그린란드에 폭넓게 분포하는 시생대에서 캄브리아기에 이르는 암석들로부터 원시 지구환경 진화를 밝힐 수 있는 방안 도출

IV. 연구개발결과

- 북그린란드 Sirius Passet 화석산지에서 현장조사 및 샘플링 계획 수립
- 최신 Remote sensing 기법을 통한 북그린란드의 새로운 지질도 작성 및 연구 대상 후보지 특성 파악 방안 모색
- 북그린란드에서 산출된 머리쪽 신경이 보존된 캄브리아기의 원시 절지동물 화석을 이용하여 동물 진화의 풀리지 않는 수수께끼로 남아있는 절지동물 머리 문제(arthropod head problem)를 해결 방안 확립
- EPMA 및 암석용 Micro CT를 활용하여 광물화되어 보존된 북그린란드의 캄브리아기 동물 화석들의 내부구조 화학 조성 파악 및 3차원 복원을 통한 고생태 및 미세 형태 규명 기획
- Cambrian Explosion으로 불리는 지구상 최초 동물 등장의 형태 진화 양상을 밝히기 위해 세계 다른 지역의 캄브리아기 Conservation Lagerstätte 화석과의 비교연구 방안 기획
- 형태 진화 이해를 위한 현생 무척추동물과의 형태 비교 연구 방안 기획
- 남서부 그린란드 이수아복합체 지역의 현장조사 후보지 선정
- 그린란드의 초기시생대 편마암 복합체 생성 기작 및 지각진화 연구를

통한 원시지구환경 진화 규명

V. 연구개발결과의 활용계획

- 지구상 최초로 등장한 캄브리아기 동물들의 형태진화 양상을 규명하여 현생 동물들의 진화적, 형태적 기원을 이해하는데 기여
- EPMA와 Micro CT등을 지구상 최초의 동물들인 캄브리아기 화석들의 형태 및 고생태 해석에 활용하는 새로운 분석기법 개발
- 최신 Remote sensing 기법을 활용하여 북그린란드 지질도를 작성하고, 이를 새로운 캄브리아기 화석산지를 찾는 데 활용
- 초기시생대 암석 샘플의 연구용 시료 확보 및 동위원소 분석법 개발

S U M M A R Y

I. Title

- Research planning for early animal evolution and the primitive Earth system of the Arctic Greenland

II. Purpose and Necessity of R&D

- Necessity for a project in relation to the KOPRI strategic goal for research area, 'promoting the advance into the Arctic for an initiative in the age of Cold Rush.'
- Related to one of the KOPRI performance goals for research area, 'Obtaining the environmental and resource information for expansion of influence in the Arctic'
- Elucidating the early evolution of the first animal on Earth, on the basis of the Cambrian fossils of Greenland
- Elucidating the primitive Earth environment for the first appearance of the animals through the research on the Archean basement rocks and the tectonic evolution
- Therefore, this project aims at research planning for elucidating the early evolution of the first animals on Earth and the evolution of the primitive Earth environment, on the basis of the paleontological and geological data of Greenland

III. Contents and Extent of R&D

- Selecting the research area in north Greenland, and finding a way to compose a new geological map in the area through the recent remote sensing technique
- Planning the way to elucidate the early morphological evolution during the

Cambrian Explosion of animals

- Devising a method of using EPMA and Micro CT for elucidating the morphology of the Cambrian animal fossils from Sirius Passet, north Greenland

IV. R&D Results

- Planning for an expedition to Sirius Passet, north Greenland
- Composing a new geological map of north Greenland through a recent remote sensing technique, and using it for setting the research area
- Solving the arthropod head problem using stem-group arthropod fossils from north Greenland, which preserve the nervous system in the head
- Utilizing the EPMA and Micro CT to investigate the chemical composition and for 3D reconstruction of the mineralized internal structure
- Comparative study with the Cambrian animal fossils from other Conservation Lagerstätte in order to understand the temporal and regional aspect of the Cambrian Explosion
- Comparative study with the extant invertebrates in order to understand the morphological evolution
- Selecting the research area around the Isua Complex in southwest Greenland
- Elucidating the evolution of the primitive Earth environment by studying the formative process of the early Archaean gneiss complex and tectonic evolution of Greenland

V. Application Plans of R&D Results

- Contributing to understanding the evolutionary and morphological origin of the extant animals by elucidating the aspect of morphological evolution of the Cambrian animals
- Devising a new technique to understand the morphology and ecology of the first animals on Earth, using the EPMA and Micro CT
- Composing a new geological map of north Greenland with a recent remote

sensing technique, and using the data for finding a new Cambrian fossil locality

- Securing the early Archaean samples for research and developing a new technique for isotope analysis

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
1. Purpose and necessity of R&D	1
2. Contents and extent of R&D	3
Chapter 2 Current R&D status in Korea and other countries	5
2-1. Status in Korea	5
2-2. Status in other countries	6
Chapter 3 Contents and results of R&D	10
3-1. Goals and contents of R&D	10
3-2. Results of R&D	12
Chapter 4 Degree of R&D goal achievement	41
Chapter 5 Application plans of R&D results	42
4-1. Future research aspect	43
4-2. Cooperative research plans (Korea and abroad)	45
4-3. Size of R&D project	46
4-4. Road map for research	47
4-5. Road map for utilizing infrastructure	47
Chapter 6 Research information collected during R&D	48
Villum Research Station: logistics for north Greenland	48
Chapter 7 References	60

제 1 장 서론	1
1. 연구개발 목적 및 필요성	1
2. 연구개발 내용 및 범위	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
2-1. 국내 동향	5
2-2. 국외 동향	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
3-1. 연구개발 목표 및 내용	10
3-2. 연구개발 수행 결과	12
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	41
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	42
5-1. 향후 연구방향	43
5-2. 국·내외 공동연구 추진 계획	45
5-3. 연구개발 사업 규모	46
5-4. 총 연구기간 로드맵	47
5-5. 인프라 활용 로드맵	47
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보	48
북그린란드의 logistics 활용을 위한 Villum Research Station	48
제 7 장 참고문헌	50

1. 연구개발 목적 및 필요성

북극에 대한 국가적 관심이 고조됨에 따라 극지연구소는 경영성과계획 비전 및 목표체계 내에 있어서 연구부문 전략목표를 ‘콜드 러시(Cold Rush)시대를 주도하는 전략적 북극진출 발판 마련’으로 설정하였고, 그에 관련된 성과목표 중 하나로 ‘북극 영향력 확대를 위한 환경, 자원 정보 확보’로 설정하였다. 그린란드는 이 목표들과 관련된 구체적 시행을 위한 최적지이며, 특히 북그린란드는 지질학적으로나 생태학적으로 거의 연구된 바가 없는 지역이기에, 극지연구소가 이 지역 연구의 세계적 선두 주자로 나설 수 있는 기회가 있는 곳이다. 또한, 북그린란드에는 지구 역사상 최초로 등장했던 동물들의 화석이 나오는 캄브리아기 지층이 있으며, 남서부 그린란드에는 원시지구환경을 규명할 수 있는 지구상에서 가장 오래된 암석이 있기에, 주목할 만한 지질학적 연구를 수행할 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있다.

약 46억 년 전, 지구가 형성된 후, 40억년동안 지구상에 우리가 알고 있는 동물은 전혀 등장하지 않고 있다가, 약 5억 4천만 년 전 캄브리아기의 시작과 함께 갑작스럽게 화석기록에 등장하여 비교적 짧은 시간동안 폭발적으로 진화하였다. 현재 지구상에 알려진 130만종의 동물들은 모두 약 35개 정도의 문(phylum)으로 분류되어질 수 있는데, 유전자를 이용한 분자시계(molecular clock)와 화석기록의 데이터는 전기 캄브리아기에 이미 35개의 문이 모두 등장한 것을 지시한다. 어떻게 동물들이 캄브리아기의 시작과 함께 갑자기 등장하여 비교적 짧은 시간 동안 우리가 알고 있는 형태를 갖추게 되었는지는 아직도 제대로 풀리지 않은 수수께끼로 남아있다. 이 동물 진화의 가장 중요한 사건은 은유적으로 Cambrian Explosion(캄브리아기 생명의 대폭발)으로 불리며 고생물학자 및 진화생물학자 뿐 아니라 대중들에게도 엄청난 호기심을 불러일으키고 있다.

일반적인 화석산지는 생물의 딱딱한 부분만이 화석으로 남아있다. 그러나 몸체의 일부에 일반적으로 화석으로 남을 정도의 딱딱한 부분을 가지는 동물은 전체 동물 종의 13% 정도에 불과하다. 그럼에도 불구하고 동물들의 부드러운 부분이 화석으로 남아있는 특별한 화석산지들이 있는데, 이를 Conservation Lagerstätte라고 부르며, 이와 같은 특별한 화석산지의 동물 화석들을 통해 Cambrian Explosion의 여러 가지 양상을 이해할 수 있다. 그 중 가장 유명한 Conservation Lagerstätte는 캐나다의 Burgess Shale과 중국의 Chengjiang biota로, 지난 수십 년 간 많은 고생물학자들에게 연구되어 각각 200여종에 달하는 캄브리아기의 동물들이 알려져 있으며, 최초 동물 형태 진화와 관련한 NSC급 논문도 각각 14편과 22편이 게재되었다. 북그린란드의 Sirius Passet 화석산지는 이 두 화석산지에 버금가는 보존양상을 보이지만, 지리적으로 문명과 매우 동떨어진 탓에 그 동안 6차례의 고생물학 현장조사만이 이루어졌다. 그럼에도 불

구하고 4편의 Nature 논문을 비롯한 30여편 SCI급 논문이 Sirius Passet 화석산지에서 산출된 화석들을 바탕으로 게재되었다. Sirius Passet 화석산지는 북그린란드 지역의 최초의 지질도 작성이 이루어지던 중, 1984년 최초로 발견되었으며, 이 후, 캠브리지대학 주도로 1989, 1991, 1994년에 고생물학 현장조사가 이루어졌다. 이 후, 2009년과 2011년의 덴마크 자연사박물관 주도의 현장조사를 통해서 화석이 산출되는 노두가 발견되었으며, 2016년 극지연구소 주도의 현장조사가 이루어져서 약 3000여점에 가까운 화석이 채취되어 극지연구소에 수장된 후, 연구가 이루어지고 있다.

이 Sirius Passet의 화석들이 특히 중요한 이유 중 하나는, 이 화석산지의 연대가 약 520Ma에 달하는 전기 캄브리아기로, 505Ma의 Burgess Shale과 518Ma 정도로 추정되는 Chengjiang biota보다 오래되었다는 것이다. 즉, 전 세계의 캄브리아기의 Conservation Lagerstätte 중 가장 오래되었기에, Cambrian Explosion의 양상을 연구하는데 있어서 가장 중요한 정보를 제공할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 극지에 위치해 있다는 단점으로 인하여 Sirius Passet 화석군은 제대로 연구되지 못하고 있었다.

약 46억 년 전 지구가 생성된 이후, 초기의 약 40억년 이상의 시간동안 어떠한 원시지구환경의 진화가 일어났기에 5억 4천만 년 전 캄브리아기에 들어서 최초로 동물이 진화할 수 있었는가를 알아보는 것 역시 Cambrian Explosion을 이해함에 있어서 중요한 요소이다. 그린란드의 남서부는 특히, 지구상에서 가장 오래된 기반암인 38억년 된 이수아복합체(Isua Complex)가 존재하는 곳이며, 지구상에서 가장 오래된 37억 년 전의 생명체의 흔적도 발견된 곳이다. 따라서 그린란드의 초기시생대 암석 연구를 통해 초기 지구시스템을 복원하고, 이 후에 어떠한 지각진화를 받았는지를 밝힌다면, 어떻게 캄브리아기의 동물이 등장할 수 있었었던 원시지구환경이 최종적으로 형성되었는가를 알아볼 수 있다. 하지만, 지금까지 그린란드의 시생대 암석에서부터 캄브리아기에까지 이르는 지질학적 데이터를 바탕으로 캄브리아기 생명의 대폭발이 일어날 수 있었던 환경적 배경을 규명하려는 시도는 없었다.

따라서 본 과제에서는 북그린란드의 캄브리아기 Conservation Lagerstätte에서 산출되는 지구상의 최초동물 화석들을 통하여, Cambrian Explosion의 형태진화 양상을 규명하고, 남서부 그린란드의 시생대 암석 및 지각진화 데이터를 바탕으로, 캄브리아기 최초동물 등장 환경적 배경이 시생대 이후 어떠한 원시지구환경 진화를 거쳐서 등장하게 되었는지를 추적하는 연구의 기획을 목표로 한다.

2. 연구개발 내용 및 범위



그림 1 연구개발 추진체계 모식도

○북그린란드 연구 대상지역 설정

- 기존에 알려진 Sirius Passet 화석산지 현장조사 계획 수립
- 북그린란드의 기존 지질도 검색
- Remote Sensing 기법을 이용한 북그린란드의 새로운 지질도 작성
- 기존의 지질도 자료와 Remote Sensing 자료를 종합하여 새로운 연구지역 설정 기획

○캄브리아기 동물 초기 진화 양상 규명 연구 기획

- 극지연구소에 소장되어있는 Sirius Passet 화석 샘플들 중에서 우선 연구대상 모색
- 초기 절지동물의 형태 진화를 규명할 수 있는 머리 신경이 보존된 원시절지동물 선정
- 극지연구소의 EPMA를 이용한 내부구조의 원소 분석을 통한 고생대 규명 방법 기획
- 지질자원연구원의 암석용 Micro CT를 이용한 내부구조의 3차원적 복원 방법 모색

○원시지구환경 진화 규명 연구 기획

- 그린란드 남서부 이수아복합체 현장조사 계획 수립

- 동위원소 분석 기법 활용을 통한 시생대 지구조환경 해석 계획 수립
- 전기 시생대 형성 기작 규명 및 이후 지각 진화 양상 규명 방법 모색

○ 국제 공동연구 협력 전략 구축

- 북그린란드 현장조사, 초기동물 진화연구, 및 시생대 원시지구환경연구를 위한 국제공동연구 협력 체계 구축

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 동향

- 현재 진행 중인 Seed형 선형과제 “북그린란드의 캄브리아기 화석을 중심으로 하는 무척추동물 초기 진화 규명(연구책임자: 박태윤)”이 극지연구소 사업으로는 유일한 북극권 육상 연구를 수행 중
- 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 2 극지연구소에 수장 중인 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 캄브리아기의 초기 동물 화석들

- 상기 사업을 통해 얻어진 화석 샘플들의 Cataloging이 진행 중
- 이 중 절지동물의 초기 형태진화를 규명할 수 있는 원시절지동물 화석에 관한 고생물학적 연구가 수행 중
- 한국기초과학지원연구원 주요사업 (과제책임자: 이기욱 박사)으로 그린란드 남서부 초기 시생대 암석에 대한 국내 최초 현장야외조사 장행 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)

2-2. 국외 동향

□ 북그린란드 지질도 작성 및 층서 연구

- 북그린란드의 지층에 대한 과학적인 기록은 1923년 Koch가 보고한 화석이 없는 석회암에 대한 것이 최초였고, 이후 1947-1950년 까지 진행된 Danish Peary Land Expeditions에 참여한 Troelsen에 의해 G.B.Schley Fjord에서 J.P. Koch Fjord에 이르는 지역에 대한 추가적인 지질 조사가 이루어짐.
- 1970년대 Jepsen, Christie & Peel 등에 의해 Peary Land지역 캄브리아기 지층에 대한 추가 조사가 이루어짐. 1970년대 후반과 1980년대에 수행된 North Greenland Project 1978-1980, 1984-1985, 등을 통한 체계적인 지질조사를 통해 북부그린란드 지층의 시대와 층서의 큰 틀이 잡혔으며(Ineson & Peel, 1980, 1987; Higgins et al., 1991a, b), 이를 기반으로 1:500,000 지질도가 작성됨.

□ 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 찾으려다가 Sirius Passet 화석산지에서 최초로 발견되었고, 이 화석들을 영국의 고생물학자들에게 보내어져서 1987년 Nature에 화석산지가 처음으로 소개됨 (Conway Morris et al. 1987)



그림 3 1989년 최초로 수행된 북그린란드 Sirius Passet의 고생물학 현장조사 모습

- 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 ; 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 게재

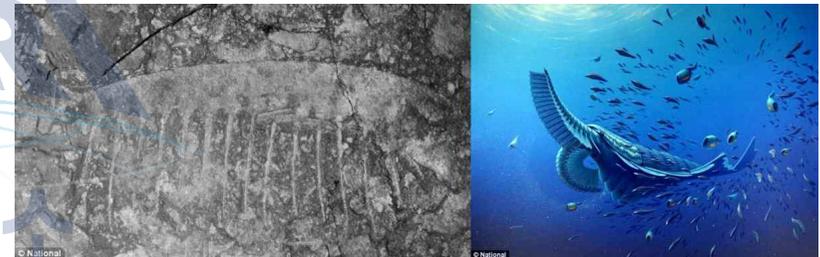


그림 4 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 원시절지동물 *Tamisiocaris*의 filter-feeding 관련된 논문 (from Vinther et al. 2014 Nature)

□ 캄브리아기 Conservation Lagerstätte을 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(그림 5)
- 그 중 초기 동물 진화에 있어서 중요한 연구 성과들은 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)

- 가장 최근에는 Burgess Shale의 화석을 바탕으로 캄브리아기의 초기 완족동물 진화를 다룬 논문이 Nature에 게재(Moysiuk et al. 2017)

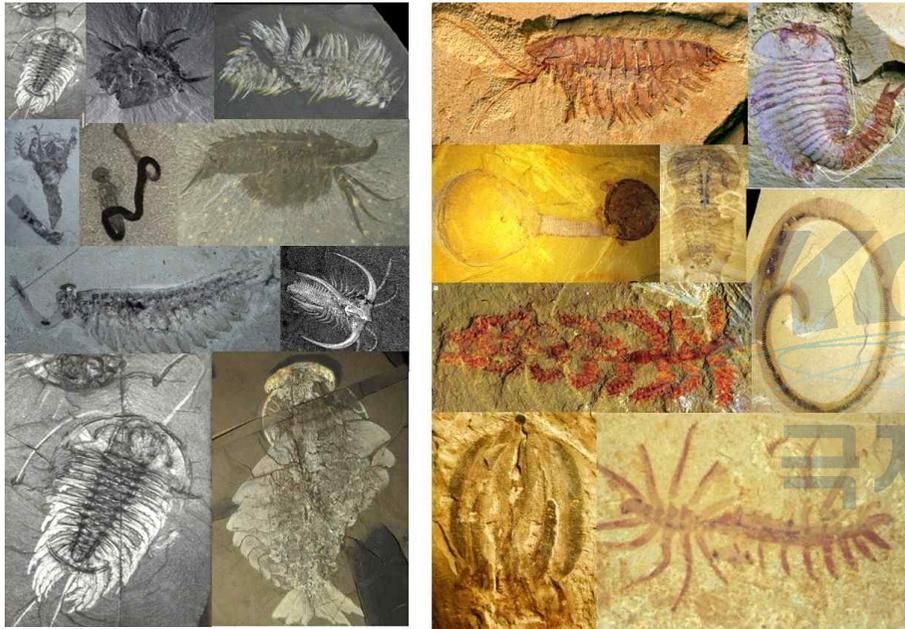


그림 5 세계적인 화석산지인 캐나다의 Burgess Shale(좌)과 중국의 Chengjiang biota(우)에서 산출된 화석들로, 부드러운 부분들까지 모두 화석으로 보존되어있다.

□ Conservation Lagerstätte의 퇴적환경과 화석화 과정에 대한 연구

- 화석을 통한 동물진화연구와 별도로 뛰어난 보존상태를 보이는 Conservation Lagerstätte 화석동물군을 만들어낸 특별한 퇴적환경과 화석화과정은 새로운 Conservation Lagerstätte를 발견하는 열쇠가 될 수 있다는 점에서 매우 중요함.
- 북그린란드 시리우스 파셋의 퇴적환경은 Ineson & Peel(2011)에 의해 제안된 바 있지만, 기존 Burgess Shale의 퇴적환경과 유사하게 탄산염대지의 급한 경계부에 접해있는 비교

적 깊은 퇴적환경으로 재구성하였으나, 최근 Burgess Shale의 일반적인 퇴적환경 모델에도 이의가 제기되고 있는 상황에서 보다 상세한 퇴적환경 연구가 필요함.

- 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 연구가 이루어졌지만(Strang et al., 2016a, b), 화석지내의 다양한 화석화 형태를 설명하고, 화석지 전반적으로 영향을 끼친 집축변성 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 편암 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 중요함.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발 목표 및 내용

연구개발의 최종목표

◦ 북부 그린란드를 바탕으로 하는 동물 초기 형태 진화 규명 및 서남부 그린란드를 바탕으로 하는 원시지구환경 연구 기획안을 도출하고, 연구 가치 극대화를 위해 연구 전략을 체계적으로 수립

연구개발 목표	내용
◦북그린란드 연구 대상지역 설정	<ul style="list-style-type: none"> - 기존에 알려진 Sirius Passet 화석산지 현장조사 계획 수립 - 체계적이고 자세한 층서별 샘플링 수행방법 기획 - 북그린란드의 기존 지질도 검색 및 Remote Sensing 기법을 이용한 북그린란드의 새로운 지질도 작성을 통한 새로운 연구지역 설정 기획
◦캠브리아기 동물 초기 진화 양상 규명 연구 기획	<ul style="list-style-type: none"> - 극지연구소에 소장되어있는 Sirius Passet 화석 샘플들 중에서 우선 연구대상 모색 - 초기 절지동물의 형태 진화를 규명할 수 있는 머리쪽 신경이 보존된 원시절지동물 선정 - 극지연구소의 EPMA를 이용한 내부구조의 원소 분석을 통한 고생태 규명 방법 기획 - 지질자연연구원의 암석용 Micro CT를 이용한 내부구조의 3차원적 복원 방법 모색 - 다른 지역 캄브리아기 Conservation Lagerstätte의 초기 동물 화석들과 비교연구 방법 모색 - 형태 진화 이해를 위한 현생 동물과의 형태 비교 방법 기획
◦초기시생대 원시지구 환경 및 지각진화환경 연구를 위한 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> - 그린란드 남서부 이수아복합체 지역 현장조사 계획 수립 - 초기시생대 편마암 복합체 생성환경 연구 - 빙하퇴적 쇄설성 저어콘 광물 동위원소 분석 - 초기시생대 최초 생명체 관련 연구
◦국제 공동연구 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> - 북그린란드 현장조사, 초기 동물진화연구, 및 시생대 원시지구환경연구를 위한 국제공동연구 협력 체계 구축

3-2. 연구개발수행 결과

2016년 현장조사를 통해 부족한 장비들을 보완하여 현장조사를 수행할 예정이다.

3-2-1. 북그린란드 연구 대상 지역 설정

○ 세계적인 Conservation Lagerstätte 화석산지인 Sirius Passet 화석 산지로의 현장조사 계획 수립

1차년도에는 안정적인 현장조사 및 데이터 획득을 위하여 기존의 현장조사 경험이 있는 북그린란드의 Sirius Passet (82°47.6' N, 42°13.7' W)으로의 현장조사를 기본적으로 수행할 예정이다(그림 6). Sirius Passet에서는 캄브리아기의 동물화석이 기존의 해외 연구자들 주도의 현장조사를 통해 약 10,000여점이 채취되었고, 2016년 극지연구소 주도의 현장조사를 통해 노두에서 채취한 신선한 화석을 비롯하여 약 3,000여점이 채취되었으나, 이는 화석산지에 노출되어있는 노두의 일부에 불과하다. 세계적인 주목을 받고 있는 Canada의 Burgess Shale이나 중국의 Chengjiang biota같은 경우는 수십만 점 이상의 화석 샘플들을 바탕으로 캄브리아기의 초기 동물 진화 연구를 진행하고 있다는 상황과 비교했을 때, Sirius Passet의 캄브리아기 초기 동물군을 심도 있게 이해하기 위해서는 훨씬 더 많은 샘플이 필요하다.

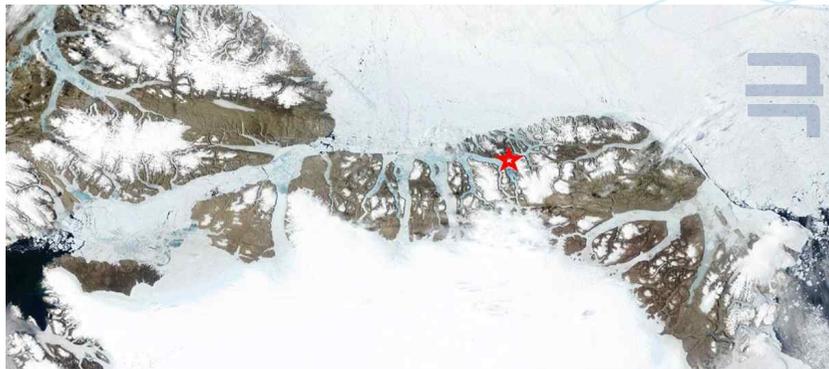


그림 6 북그린란드의 위성사진과 Sirius Passet의 위치(붉은별)

2016년 현장조사 후, 텐트를 비롯한 캠핑 장비들을 캠프사이트에 그대로 놓고 왔는데 (그림 7), 북그린란드라는 특수한 환경에서 임차비용이 상당히 높은 트윈오토를 비용을 절감하기도 하고, 앞으로 다시 있을 현장조사를 대비하기 위함이었다. 1차 년도에 있을 Sirius Passet으로의 현장조사에서는 이 캠핑 장비들을 그대로 사용함과 동시에,



그림 7 2016년 Sirius Passet의 현장조사 후, 캠프사이트에 두고 온 캠핑장비 및 가솔린 드럼들

○ 체계적이고 자세한 층서별 샘플링 수행방법 기획

특이하게도, 2009년 덴마크 자연사 박물관의 현장조사가 있기까지 Sirius Passet의 화석들은 모두 노두가 아닌, 풍화되어 주변에 흩어져 있는 전석에서만 발견되었다. 2016년 극지연구소 주도의 현장조사를 통해 덴마크 자연사박물관의 연구자들이 2011년에 수행한 것보다 더욱 자세한 수준의 층서를 기록하여, 화석 샘플들을 채취하였다(그림 8). 그러나 노두에서 찾은 화석들 중, 가장 중요한 정보를 담고 있는 화석들은 풍화되지 않은 reflective film 형태로 되어있어서 에탄올이나 물에 담은 채로 보아야 선명하게 인지할 수 있다. 따라서, 1차 년도 현장조사를 위해서는 실험실에서 사용하는 에탄올을 이용한 이미지 획득 시스템을 화석산지 현장에 대입하여 Sirius Passet 현장에서 최상의 샘플링 효과를 도모할 예정이다.



그림 8 노두의 층준마다 정확한 표시를 하고 화석을 찾는 모습

○ Sirius Passet 화석산지 퇴적작용과 퇴적환경 연구방안 모색

Sirius Passet의 화석은 약 8m 구간의 Transitional Buen Formation내의 세일에서 산출된다. 해당 구간을 포함한 주변지층에 대한 대략의 퇴적환경 해석(Ineson and Peel, 2011)과, 지화학 분석에 대한 연구는 이루어진 바가 있지만(Le Boudec et al., 2014), 퇴적학적인 상세한 연구가 선행되지는 않았다. 화석이 뛰어나게 보존된다는 것은 그 과정 자체로도 흥미로운 뿐 아니라, 또 다른 화석 Conservation Lagerstätte의 존재를 예측하게 해준다는 점에서 매우 중요하다. 2016년 하계 입수한 암석시료를 대상으로 박편을 제작하였고, 이를 바탕으로 예비 퇴적상 기술을 실시하였다. 이에 따르면, 화석산지의 암상은, 얇은 엽리가 발달한 세일, 희미한 엽리가 발달한 세일, 무구조 세일로 구분되며(그림 9), 화석은 무구조세일을 제외한 구간에서 산출됨을 확인하였고, 이는 화석보존에 해저면의 산소농도, 그리고 이에 따른 생물의 교란작용이 큰 조절요인 중의 하나였음을 암시한다.

추가 현장조사와 실험실 분석을 통해, 화석산출구간을 포함하는 Transitional Buen Formation과 Portfeld Formation의 퇴적환경을 밝히고, 상세한 퇴적상분석과 추가적인 지화학 연구를 수행해, 뛰어난 보존상태를 보이는 화석이 남을 수 있었던 물리·화학적 원인을 밝히고 이를 캄브리아기의 다른 화석산지의 퇴적환경과 비교연구한다면, 파급력 있는 연구결과를 산출할 것으로 생각되며, 조사지역 주변에서 새로운 화석산지를 찾는 데에도 기여할 것으로 보인다.

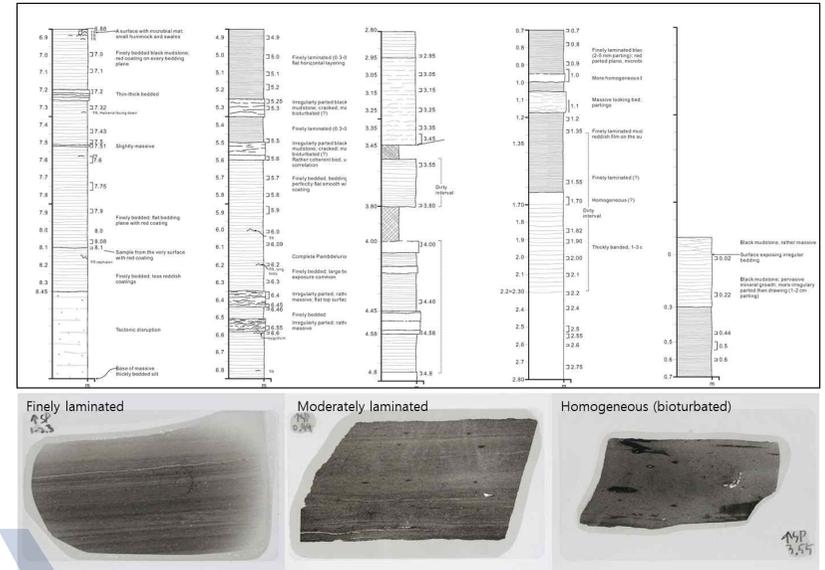


그림 9 Sirius Passet 화석지의 주상도와 박편사진(상), 그리고 박편관찰을 통해 구분한 퇴적상(하)

○ 북그린란드의 기존 지질도 검색 및 Remote Sensing 기법을 이용한 북그린란드의 새로운 지질도 작성 기획

세계적으로 유명한 캄브리아기 화석산지임에도 불구하고 Sirius Passet 화석산지는 바로 옆으로 mafic dyke가 지나가며, 단층과 접해있다. 따라서 여기서 산출되는 화석들은 열변성 및 단층작용에 의한 distortion을 받았을 수밖에 없다. 따라서 변성 및 변형의 영향을 받지 않은 Sirius Passet과 비슷한 북그린란드의 다른 화석산지를 찾는다면, Cambrian Explosion의 양상을 규명하는데 결정적인 역할을 할 수 있다. 또한 기존의 화석산지와 먼 곳에서 또 다른 화석산지가 발견될 경우, 일반적으로 산출되는 동물군도 차이가 있기에 고생태를 종합적으로 연구하는데 큰 도움이 될 수 있다. 일례로 캐나다의 Burgess Shale과 비슷한 화석산지가 Burgess Shale의 원 화석산지에서 약 40 km정도 떨어진 곳에서 발견되어서 Burgess Shale의 동물 생태계에 대한 이해를 비롯해, Cambrian Explosion의 양상 연구에 획기적인 기여를 하였다(Caron et al. 2014).

그러나 이 접근성이 극도로 제한된 북그린란드 지역에서 탐사를 하기 위해서는 남극에서와 마찬가지로 헬리콥터가 필요한데, 2017년 여름 시즌에는 St. Nord에 헬리콥터

가 있을 예정이기에, 이를 임차하여 지질조사를 수행할 계획이다.



그림 10 2016시즌 캠프철수 당시 구입하여 현장에 놓은 항공유 드럼들

또한 헬리콥터 운용을 위해서 2016년 현장조사 캠프 철수 당시 St. Nord에서 구매하여 캠프에 가져다 놓은 10통의 항공유가 사용될 예정이다(그림 10).

북그린란드의 Sirius Passet과 비슷한 변성, 변형을 받지 않은 화석군을 주변부에서 찾으려는 노력은 종종 있었지만 성공적이지 못했다(e.g. Conway Morris 1998; Peel and Ineson 2011). 가장 큰 이유 중 하나는 북그린란드 지역의 지질도가 정확하지 못하다는 것이다. 북그린란드의 지질도는 1980년대에 최초로 기초지질조사를 하면서 작성되었다(그림 11). 그러나 워낙 넓은 지역의 지질도를 적은 인력으로 작성해야 하다 보니 대부분의 지역에서 헬리콥터를 통해 먼 거리에서 색깔만으로 구분하는 방법으로 지질도가 작성되었다. 이 지역의 지질도가 정확하지 않다는 것은 2016년 극지연구소 주도의 현장조사를 통해서도 확인되었다.

따라서 원활한 현장 탐사를 위해선 좀 더 정확한 지질도가 작성되어야 한다. 이를 위하여 Remote Sensing을 통한 최신 지질도 작성 기법이 활용될 예정인데, 이는 최근 Landsat-8와 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 데이터를 활용하여 극지나 열대우림과 같은 접근성이 제한된 지역의 지질 및 광물 정보를 알아내는 방법이다 (e.g. Pour et al. 2014; Pour et al. 2015) (그림 12).



그림 11 덴마크 GEUS의 홈페이지에서 제공하는 북그린란드의 지질도

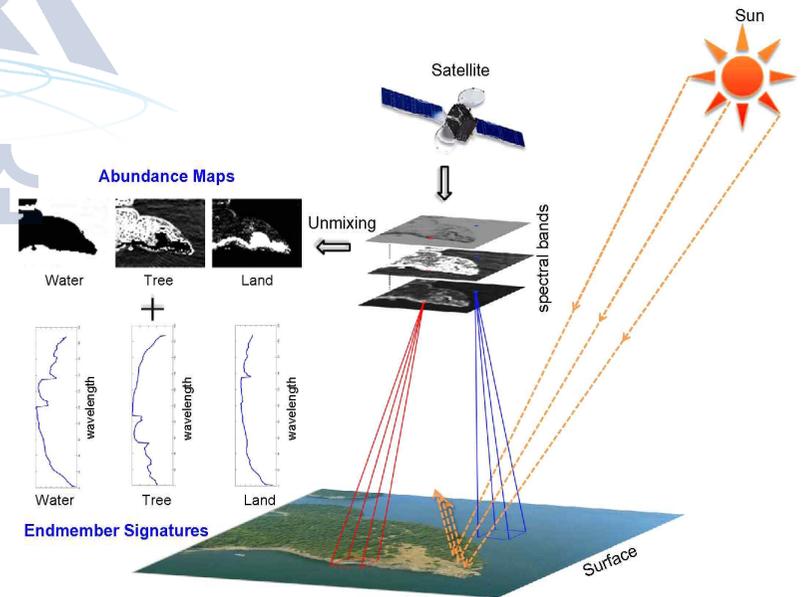


그림 12 Remote sensing을 이용한 표면 지질 정보 획득 기법을 모식적으로 나타낸 그림

Landsat-8 위성은 2013년 발사되었으며, Operational Land Imager (OLI)와 Thermal Infrared Sensor (TIRS)를 탑재했다. 이 두 기기를 통해 적외선에 가까운 9개의 단파 밴드와 2개의 장파밴드를 얻으며, 15m를 한 픽셀로 하는 resolution을 나타낸다. ASTER는 Visible and Near Infrared (VNIR), Shortwave Infrared (SWIR), 및 Thermal Infrared (TIR)의 세 개의 장치로 이루어져 있으며, 지표면의 광물 함량에 따른 지질도 작성이 가능하다.

현재 극지연구소에서는 Antarctic Peninsular의 Oscar II Coast와 Northern Victoria Land지역에 대한 Remote sensing을 이용한 지질도 작성이 수행되고 있다(그림 13). 따라서 본 과제에서는 Remote sensing을 이용한 최신 지질도 작성 기법을 이용하여 80년대에 먼 거리에서 육안으로 작성된 GEUS의 북그린란드 지질도와 비교를 해보고, Sirius Passet 화석산지와 비슷한 지질을 보이는 지역을 대상으로 삼아서 새로운 화석산지 탐사를 수행할 계획이다

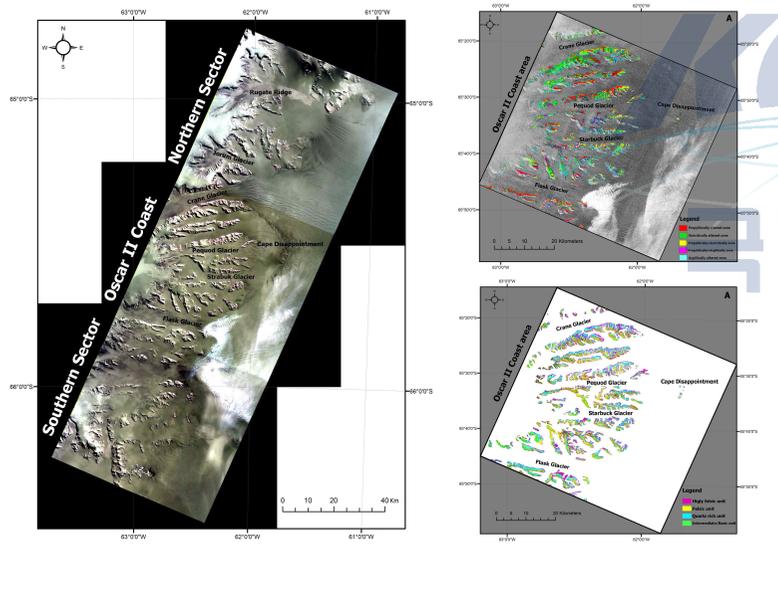


그림 13 현재 극지연구소에서 수행되고 있는 Remote sensing을 이용한 Antarctic Peninsular의 Oscar II Land 지역에 대한 지질도 작성 현황

3-2-2. 캄브리아기 동물 초기진화 양상 규명 연구 기획

○ 극지연구소에 소장되어있는 Sirius Passet 화석 샘플들 중에서 우선 연구대상 모색

최상의 연구 성과를 내기 위해, 2016년 현장조사를 통해 채취되어서 극지연구소에 소장되어있는 Sirius Passet 화석군 중 우선 연구대상을 정하여 논문 작성을 할 계획이다. 현재까지 10여개의 문에 해당하는 동물들이 발견되었다(그림 14).

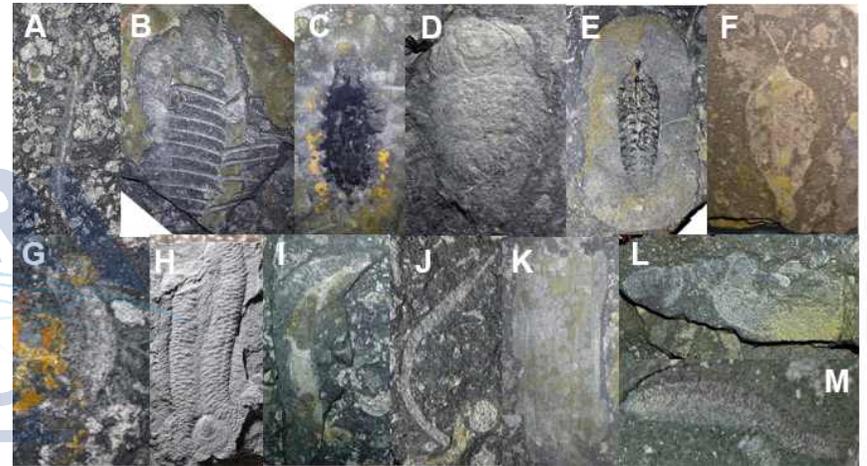


그림 14 현재 극지연구소에 소장되어있는 Sirius Passet 화석들. A: 유조동물문에 가까운 동물. B: 원시절지동물. C: 원시절지동물. D: 절지동물문. E: 절지동물문. F: 연체동물문 또는 Chaetognatha. G: 환형동물문. H: 연체동물문. I: 새예동물문. J: 선형동물문. K: 동갑동물문. L: 원시후구동물. M: 척삭동물문.

현재까지의 데이터를 바탕으로 했을 때, 가장 주목할 만한 연구 성과를 낼 수 있을 것으로 예상되는 동물군은 절지동물이다. 절지동물은 지구 역사상 가장 성공을 거둔 동물군으로, 현존하는 130여만 종의 동물들 중 100만종 이상이 절지동물이다. 따라서 이 절지동물이 캄브리아기에 처음 등장했을 당시 어떠한 초기 형태진화를 거쳐서 우리가 알고 있는 절지동물의 형태로 진화하게 되었는지는 과학 계 뿐만 아니라 일반 대중들에게도 흥미를 불러일으키는 연구주제이다. Sirius Passet에는 절지동물의 초기 형태진화를 보여주는 *Kerygmachela*, *Pambdelurion*, *Tamisiocarica*와 같은 동물들의 화석이 산출

되어 절지동물의 초기 진화를 규명할 수 있는 데이터를 제공한다(그림 15).

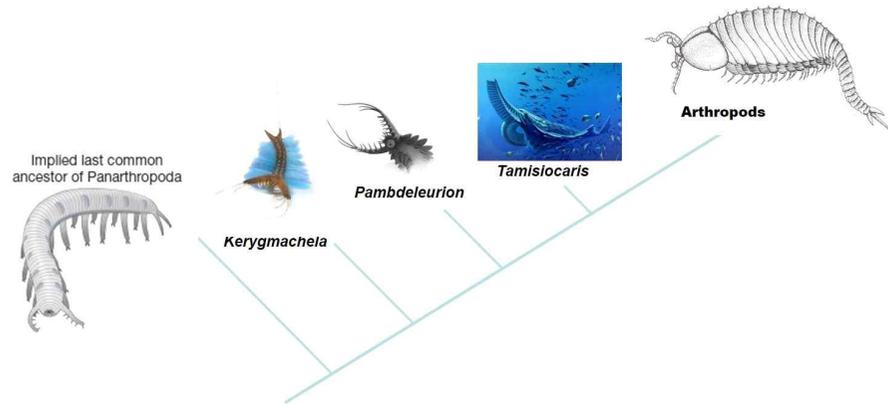


그림 15 절지동물의 초기 진화 계통도. Sirius Passet에서 산출되는 *Kerygmachela*, *Pamdeleurion*, *Tamisocarid*의 계통적 위치.

또한 2016년 현장조사를 통해 절지동물과 유조동물, 완보동물을 포함하는 그룹인 Panarthropods의 공통 조상 형태를 가지는 화석이 발견되었는데(그림 16), 이 동물의 자세한 형태연구 역시 주목할만한 연구 성과로 이어질 것으로 보인다.



그림 16 2016년 북그린란드 Sirius Passet 현장조사를 통해서 채취한 panarthropod의 조상형태를 띠는 동물 화석의 머리부분(좌)와 모식도(우).

○ 초기 절지동물의 형태진화를 규명할 수 있는 머리쪽 신경이 보존된 원시절지동물 선정

2016년 북그린란드의 Sirius Passet 현장조사를 통해 채취한 원시절지동물인 *Kerygmachela*의 샘플들 중 머리 쪽 신경계가 화석으로 보존된 샘플 10여개가 발견되었다(그림 17, 18). 신경이 화석으로 남는 것은 세계적으로 극히 드문 경우로, 특히 머리 쪽에서 뻗어 나아가는 frontal appendage의 신경이 이처럼 길게 잘 보존된 경우는 캐나다의 Burgess Shale이나 중국의 Chengjiang biota에서도 없었다.



그림 17 머리쪽 신경계가 보존된 원시절지동물 *Kerygmachela*의 화석. 조명을 저각으로 비추는 모습(좌)과 에탄올에 담가서 고각으로 조명을 비추는 모습(우).

그동안, 중국의 Chengjiang biota에서는 2012년 이후, 머리 쪽 신경이 보존된 절지동물 화석이 보고되어 절지동물의 형태진화를 규명하는 데 큰 역할을 하였다 (Ma et al. 2012 Nature; Tanaka et al. 2013 Nature; Cong et al. 2014 Nature). 그러나 Chengjiang

에서 산출된 화석들의 경우, 신경이 보존된 샘플이 종마다 1개씩 밖에 없고, 선모양의 neuropil 형태도 뚜렷하지 않기에, 과연 신경이 보존된 것이 맞는가에 관한 논쟁이 끊이지 않아왔다.

이에 반해 Sirius Passet에서 산출된 *Kerygmachela* 화석의 경우 10개에 가까운 샘플이 있으며, frontal appendage로 뻗어가는 neuropil이 확연하게 보존되어있다. 게다가 이 neuropil이 branching 되는 것도 보존이 된 샘플도 있기에(그림 18) 머리쪽 신경이 화석으로 보존되었다는 것에는 이견이 있을 수가 없을 것으로 보인다.

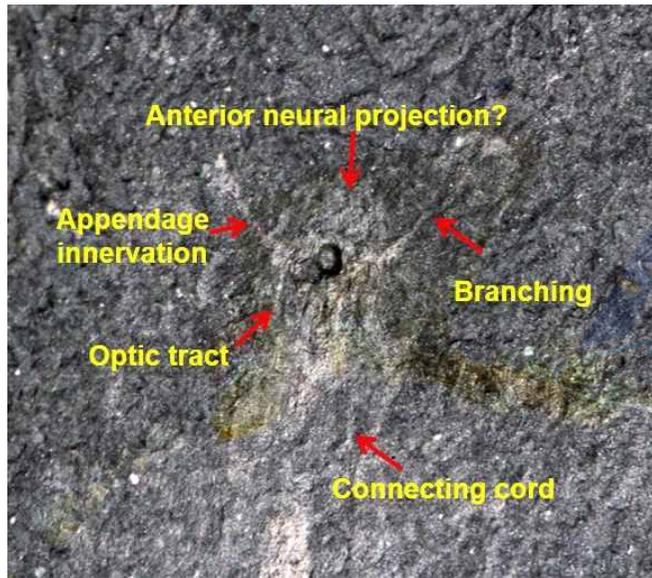


그림 18 북그린란드의 Sirius Passet에서 산출된 머리쪽 신경계가 보존된 원시절지동물 *Kerygmachela*의 화석. 오른쪽 frontal appendage로 뻗어나가는 신경이 branching되는 것이 보인다.

더욱 중요한 사실은 *Kerygmachela*가 원시절지동물 중에서도 상당히 초기의 진화 형태를 가지고 있다는 사실이다(그림 15). 이와 같은 원시절지동물의 머리 쪽 신경계는 진화생물학계에서 100년 이상 풀리지 않는 논쟁거리인 절지동물 머리 문제(arthropod head problem; Park and Kihm 2017 참조)을 해결하는 데 결정적인 역할을 할 수 있다. 절지동물의 몸은 기본적으로 한 쌍의 다리가 있는 마디가 반복되어있는 구조로 되어있는데, 이 마디들이 융합을 하고, 다리들이 특화되면서 수많은 형태로 진화해나가서 지구 상에서 가장 큰 성공을 이룬 동물군이 되었다. 특히 현생 절지동물의 머리 부분은 4개

이상의 마디가 모여서 융합 및 높은 수준의 특화를 이룬 상태이기에, 절지동물의 머리가 몇 개의 마디로 이루어져있으며, 첫 번째 마디의 다리가 어떠한 형태로 특화되었는지를 증명하는 것은 불가능에 가깝게 여겨졌다. 그 결과 절지동물의 머리 쪽 마디, 특히 첫 번째 마디의 다리에 관한 여러 가설이 대립하는 양상을 보여 왔다(그림 19).

그러나 최근 중국 Chengjiang에서 발견된 머리 쪽 신경이 보존된 초기 절지동물 화석을 통하여 이 arthropod head problem의 일부가 풀리는 듯 했으나, 불완전한 신경의 보존 상태로 인하여 신뢰를 받지 못하는 상황이었다.

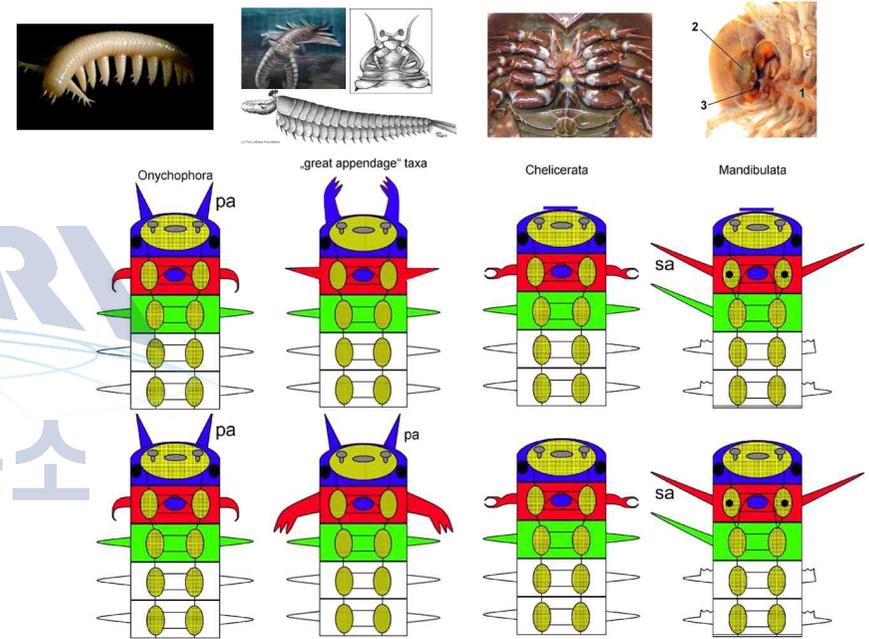


그림 19 절지동물 머리 문제(arthropod head problem)를 모식적으로 나타낸 그림.

따라서, 북그린란드의 Sirius Passet에서 산출된 머리 쪽 신경계가 보존된 원시절지동물 *Kerygmachela*의 화석은 그 동안 풀리지 않은 채로 남아있었던 절지동물 머리 문제(arthropod head problem)를 해결하는 데 결정적인 역할을 할 것으로 예상된다.

○ 극지연구소의 EPMA를 이용한 내부구조의 원소 분석을 통한 고생대 규명 방법 기획

북그린란드 Sirius Passet의 화석들은 특이하게도 내장, 근육 등의 내부구조가 3차원적으로 광물화되어 보존된 경우가 있다. 이 광물화 작용은 동물의 사체가 화석화될 때의 성분이 암석화 작용의 영향으로 형성된 것으로, 이 부분을 연구하여 5억 년전 동물의 형태복원과 고생대 연구에 활용될 수 있다.

예비 연구의 일환으로 극지연구소의 EPMA를 이용하여, 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 캄브리아기의 절지동물인 *Campanamuta*의 광물화된 부분을 원소 분석을 수행 하였다(그림 20).

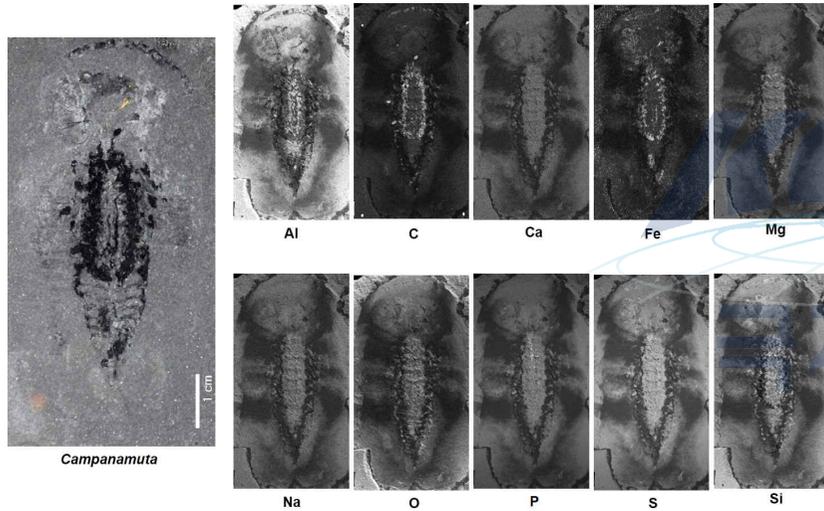


그림 20 북그린란드의 Sirius Passet에서 산출된 절지동물 *Campanamuta* (좌)와 EPMA를 이용한 원소맵핑 결과(우)

*Campanamuta*는 북그린란드의 Sirius Passet에서 비교적 흔하게 산출되는 절지동물이다. 2011년 이 동물이 처음 보고될 당시에 화석의 중심부에 광물화된 부분은 모두 내장의 일부인 gut diverticulae로 해석이 되었다(Budd, 2011). 하지만 원소분석 결과 광물화된 부분의 내부와 외부는 서로 다른 원소로 되어있는 것이 밝혀졌다(그림 21). 특히 식도 부근은 P가 분포하며(그림 21A의 녹색 부분), 내장에 해당하는 부분들은 Fe, C, S가 많이 분포한다 (그림 21A의 붉은색 부분과 21B의 보라색 부분). 주목할만한 점은 광

물화된 부분의 양 옆을 따라서 Si가 많이 분포한다는 것인데(그림 21A의 파란색 부분), 이는 근육이 화석화될 경우 많이 보이는 원소로 알려져 있다. 따라서 Si가 많이 분포하는 부분은 내장이 아닌 다리를 움직이는 근육일 가능성이 높다.

이처럼 광물화된 부위의 원소분석을 통해 기존에 제대로 이해되지 못했던 형태를 이해할 수 있는 정보를 얻을 수 있을 것으로 보이며, 이와 같은 분석 기법은 Sirius Passet의 화석들에는 적용된 적이 없기에 흥미로운 연구결과로 이어질 것으로 예상된다.

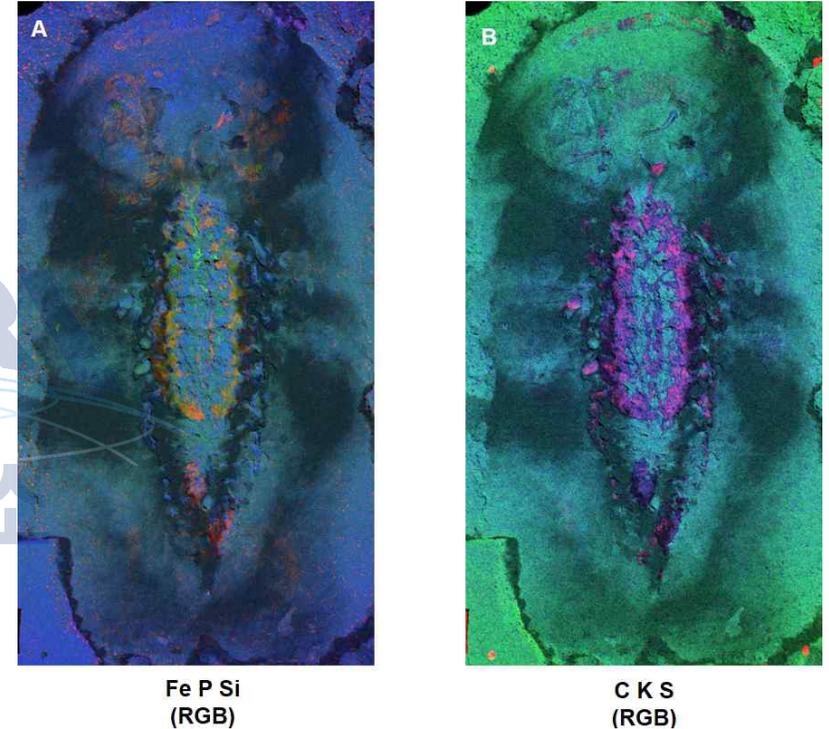


그림 21 북그린란드의 Sirius Passet에서 산출된 *Campanamuta*의 원소분석결과를 RGB 색으로 표현한 이미지.

○ 지질자원연구원의 암석 코어용 Micro CT를 이용한 내부구조의 3차원적 복원 방법 모색

화석의 Micro CT분석은 박편을 만드는 식으로 화석을 파괴하지 않고 내부구조를

밝히는 데 결정적인 역할을 할 수 있기에 다방면으로 사용될 수 있다. 또한 3차원적인 복원을 통해서 복원된 이미지를 여러 각도에서 재구성하여 형태 데이터를 극대화할 수 있다 (그림 22). 그러나 일반적인 Micro CT는 분석할 수 있는 크기에 제한이 있어서, 4cm 보다 큰 샘플들은 분석이 불가능 하며, 기질과 화석의 밀도차이가 큰 경우에만 제대로 된 분석결과를 얻을 수 있는 단점이 있다.

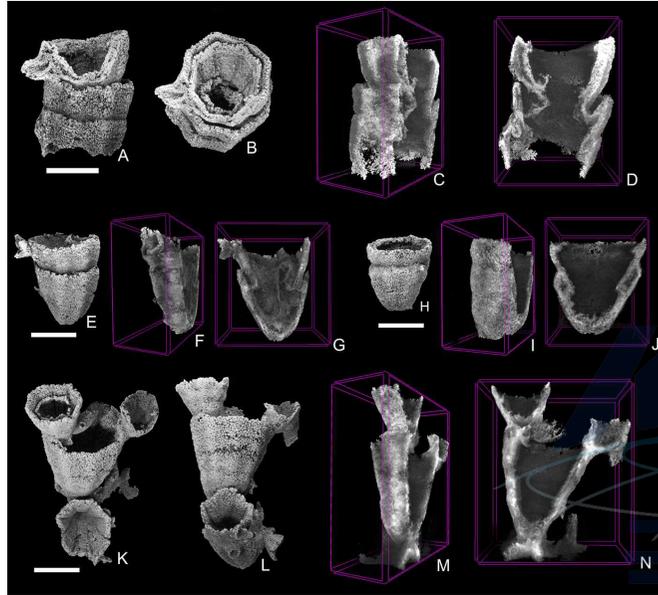


그림 22 일반적인 Micro CT를 이용한 화석의 내부구조 3차원 분석의 예시. 중국에서 산출된 중기 캄브리아기의 원시 자포동물 *Cambroctoconus orientalis* Park et al. (2011)의 내부구조를 보여주는 3차원 복원 이미지들.

최근 지질자원연구원에서는 암석코어용 Micro CT를 개발해서 한국, 중국, 일본에서 특허를 획득한 상태이다. 새롭게 개발된 Micro CT는 분석할 대상의 크기에 큰 구애를 받지 않으며, 분해능도 우리나라에 있는 Micro CT들 중 가장 뛰어나다(그림 23).

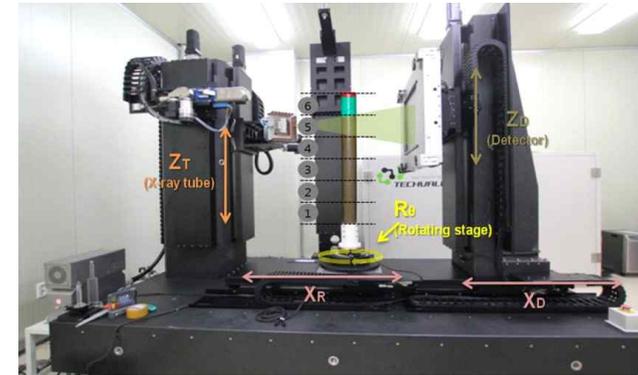


그림 23 한국지질자원연구원에서 새롭게 개발한 암석코어용 Micro CT.

따라서 최고의 분해능을 가지는 지질자원연구원의 Micro CT를 3차원적으로 광물화되어 보존된 북그린란드 Sirius Passet 동물들의 내부구조를 분석하는 데 사용한다면, 기존 고생물학 연구에서 밝혀내지 못했던 새로운 데이터들을 얻을 것으로 기대된다(그림 24, 25).

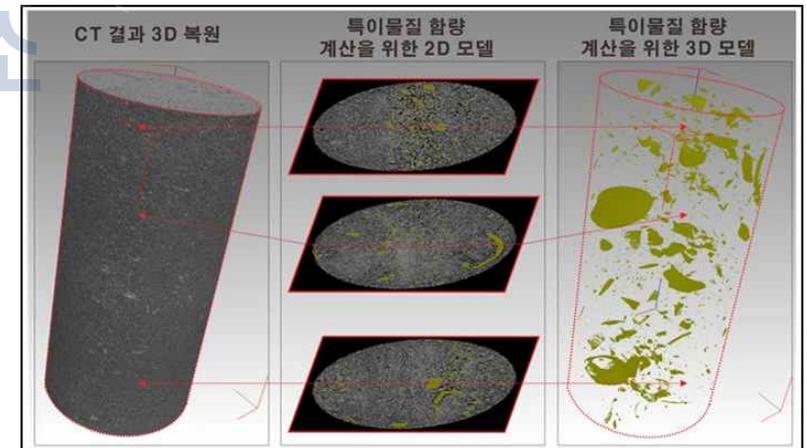


그림 24 암석코어의 Micro CT분석을 통한 내부 구조의 3차원적 복원 과정.

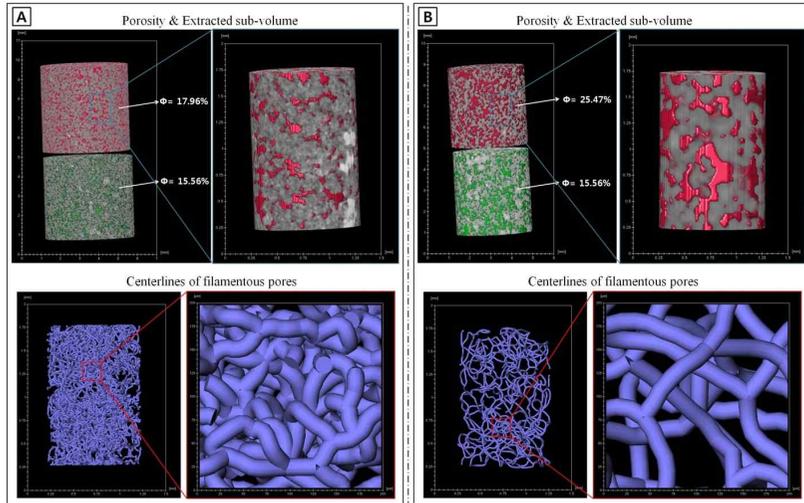


그림 25 이미지 처리를 통해 3차원적으로 재구성되어진 사암코어내의 pore space (Jin et al. 2016).

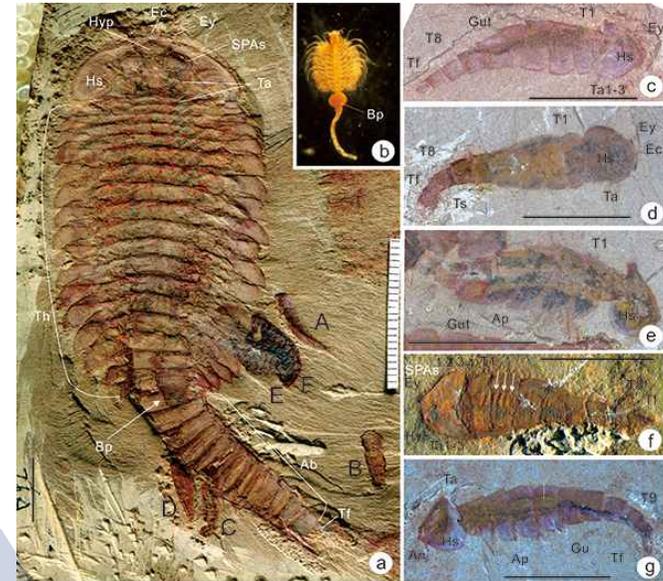


그림 26 현재 극지연구소와 국제공동연구 중인 Chengjiang biota에서 산출되는 캄브리아기의 원시적인 절지동물인 *Fuxianhuia*의 어미(a)와 어린 개체들(c-g).

○ 다른 지역 캄브리아기 Conservation Lagerstätte의 초기 동물화석들과 비교연구 방법 모색

지구상 최초 동물들의 폭발적인 진화양상(Cambrian Explosion)의 정확한 규명을 위해선 다른 시대, 다른 지역의 캄브리아기의 동물들과의 비교연구가 필수적이다. 북그린란드의 Sirius Passet의 화석군은 약 520Ma의 연대를 가지며, 중국의 Chengjiang은 약 518Ma로 추정되는 연대의 화석산지이고, 캐나다의 Burgess Shale은 약 505Ma의 연대를 가진다. 따라서 이 세 화석산지의 동물 생태계를 종합하여 비교하는 연구는 캄브리아기 당시의 초기 동물 형태진화 양상이 시간이 지나면서, 또 지역적으로 어떠한 변화를 보이는 가를 밝히는 데 결정적인 정보를 제공할 것이다.

현재 극지연구소는 Chengjiang biota연구의 선도그룹인 중국 Xi'an의 Northwest University 팀과 Chengjiang biota에서 산출되는 절지동물의 개체발생과정에 관한 국제공동연구를 진행 중이며(그림 26), Northwest University측에서도 Sirius Passet 연구를 주도적으로 수행하고 있는 극지연구소와의 국제공동연구를 원하고 있다. 앞으로 지속적이고 활발한 교류를 통하여 Sirius Passet의 동물군과 Chengjiang biota의 동물군과의 비교연구를 수행할 계획이다.

또한, 캐나다 Burgess Shale 연구를 주도적으로 진행하고 있는 토론토의 Royal Ontario Museum과도 학술적 교류를 통해, 전기 캄브리아기의 동물군이 중기 캄브리아기에 이르기까지 어떠한 변화를 거치며 진화했는가에 관한 연구를 수행할 계획이다.

○ 형태 진화 이해를 위한 현생 무척추동물과의 형태 비교 연구 방안 기획

지구 역사상 최초로 등장했던 캄브리아기 동물들의 폭발적 진화 양상을 연구하는 이유는 궁극적으로 현재 우리와 함께 존재하고 있는 동물들의 다양한 형태의 기원을 알

아볼 수 있기 때문이다. 따라서 북그린란드의 캄브리아기 무척추동물 화석들과 형태 비교를 할 수 있는 현생 무척추동물들에 대한 연구가 필수적이다(그림 27).

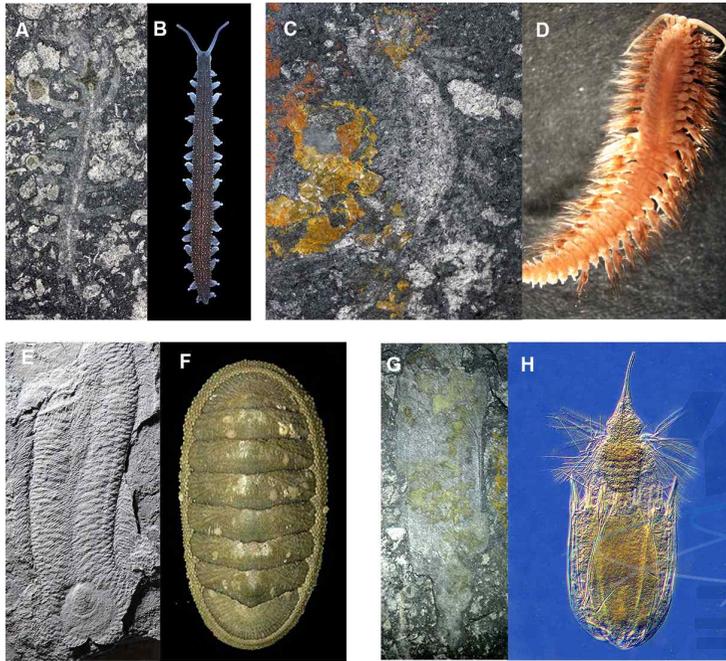


그림 27 북그린란드 Sirius Passet에서 산출되는 캄브리아기의 무척추동물과 현생 무척추동물과의 비교. A, B: 유조동물문. C, D: 다모류(환형동물문). E, F: 연체동물문. G, H: 동갑동물문

이 과정을 통하여 가장 먼저 중점을 두고 형태비교 연구를 시도하려고 하는 현생동물은 완보동물이다. 완보동물은 계통적으로 절지동물문, 유조동물문과 가까운 근연관계에 있다고 여겨지는 동물문이지만, 분자데이터를 이용한 결과로는 정확한 계통적 관계가 불분명하다. 최근 캄브리아기의 panarthropod 화석들을 포함하는 형태 데이터를 이용한 결과에서는 완보동물문이 절지동물문과 sister-group 가까운 것으로 나타났는데(그림 28), 이는 완보동물의 자세한 형태 데이터가 들어가 있지 않은 분석이었다.

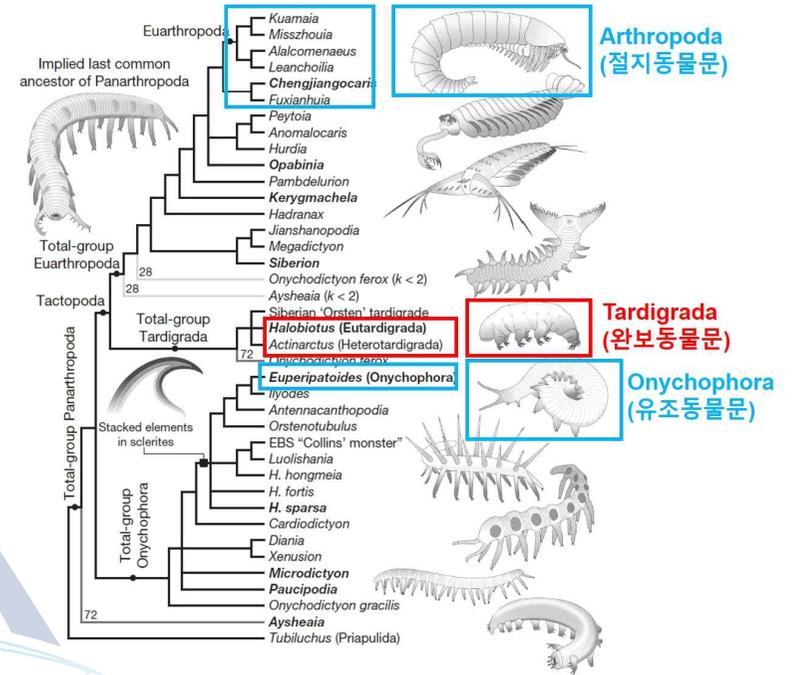


그림 28 절지동물문, 완보동물문, 유조동물문을 포함하는 panarthropods의 계통도(modified from Smith & Ortega-Hernandez, 2014). 색으로 강조되지 않은 동물들은 모두 캄브리아기의 화석으로만 남아있는 동물들임.

완보동물의 형태 데이터가 완전히 이용되지 않은 채로 분석에 이용되는 이유는 완보동물 자체가 일반적으로 0.5 mm 이하의 아주 작은 크기를 갖기 때문에, 형태 연구가 쉽지 않기 때문이다.

극지연구소는 2016년 북그린란드 Sirius Passet의 현장조사를 통해, 이 지역의 담수 생태계에서 4종 이상의 완보동물의 존재를 확인하고 채취하고 극지연구소로 가져와 보관중이다(그림 29). 북그린란드 지역은 생태학적으로도 거의 연구가 안 된 곳이므로, 여기서 채집한 완보동물들은 절지동물 진화 연구뿐만이 아니라, 분류학적으로도 좋은 연구주체가 될 것으로 여겨진다.

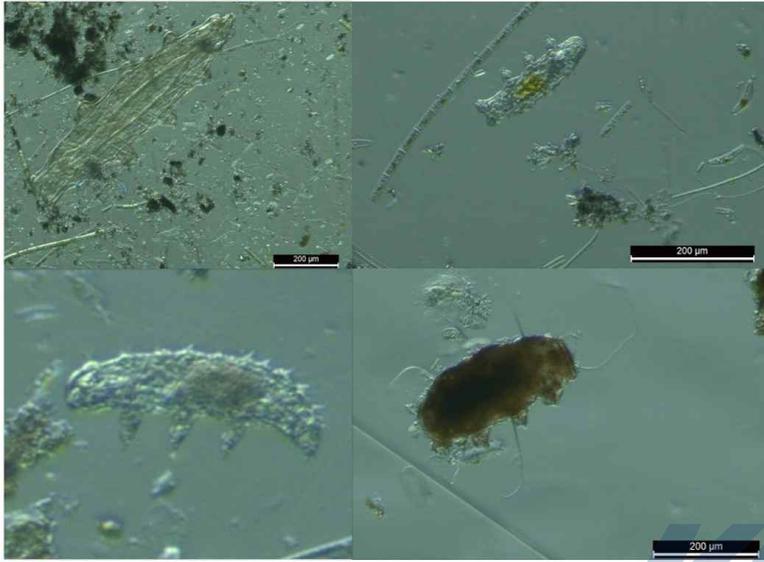


그림 29 북그린란드 Sirius Passet 지역의 담수에서 채집한 완보동물들. 윗줄의 두 종은 Eutardigrada강에 속하며, 아랫줄은 두 종은 Heterotardigrada강에 속한다.

또한 극지연구소는 최근, 부드러운 몸체로 이루어진 완보동물의 형태를 고정하여 SEM 이미지를 얻는 방법을 발견하여 완보동물의 정확한 형태를 이해하고, 이 형태 데이터를 캄브리아기의 원시절지동물들과 비교연구에 사용할 수 있게 되었다(그림 30). 특히 완보동물의 발톱 형태는(그림 30C, D) 그 동안 제대로 이해되고 연구되지 않은 데이터이기에, 캄브리아기의 원시절지동물들의 발톱 형태와 비교연구를 한다면, 의미 있는 연구 성과로 이어질 것으로 전망된다.

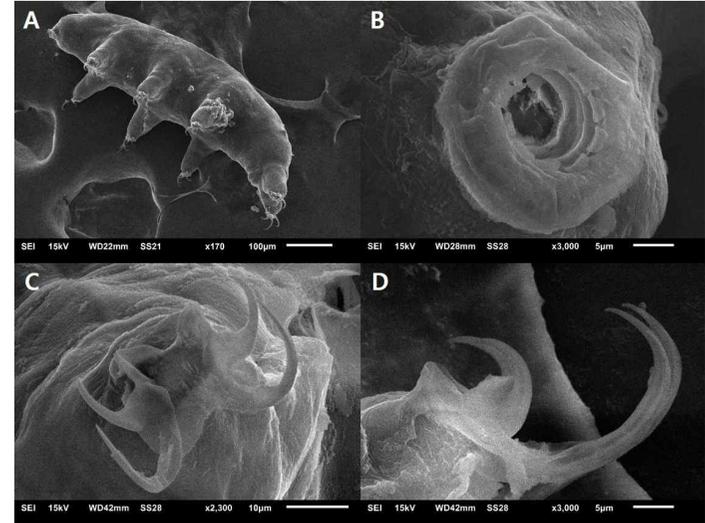


그림 30 남극 세종기지에서 채집한 완보동물 *Dactylobiotus*의 SEM 이미지. A: 몸전체 이미지. B: 입부분의 확대 이미지. C, D: 발톱 확대 이미지.

3-2-3. 남서그린란드의 연구 범위 설정 및 원시지구환경 진화 연구 방안 모색
(공동연구: 기초과학지원연구원)

○ 이수아복합체 지역의 현장조사 후보지 선정

남서부 그린란드의 시생대 암석 중에서도 가장 오래된 37~38억년의 초기시생대 암석이 분포하는 곳은 그린란드 대륙빙하와 접하고 있는 이수아 편마암 복합체와 누크 남서쪽 해안의 도서지역이다. 2011년 한국기초과학지원연구원의 주도의 국제공동연구팀이 이미 조사를 하여 정밀 연대측정 등의 선행연구결과가 다수 보고된 곳이다. 초기시생대 지구환경을 보다 체계적으로 해석할 수 있도록 2017-2018년의 현장야외조사를 통해 암석시료의 확보하는 것이 필수적이다. 또한, 암석을 덮고 있던 빙하가 용융되면서 접근가능한 지역이 늘어나고 있어서 적합한 후보지이다.

또한, 최근 37억년의 스트로마톨라이트의 발견으로 이수아 지역의 탄산염 기원암 내에 존재하는 화석증거 및 생명의 기원에 대한 연구가 중요한 관심대상이 되고 있다. 현장조사를 통해 주변 호상철광층, 처이트 등의 암석과의 상관관계 및 스트로마톨라이트의 형태학적 연구를 수행하고, 정밀 안정동위원소의 다각적 분석이 필요하다.

○ 초기시생대 편마암 복합체 생성환경 연구

이수아 편마암 복합체에서 2011년 처음 발견된 고압백립암은 현생 판구조활동의 섭입대에서 주로 산출하는 암석과 일치하는 석류석+탄사회석+사장석+석영의 광물조합을 포함하고 있으며, 고분해능 이차이온질량분석기 (SHRIMP-IIe/MC)의 저어콘 U-Pb 정밀연대측정 결과 36.5억년의 생성시기를 보여주었다. 이는 세계에서 가장 오래된 판구조 활동을 시사하며, 그 예비결과가 보고되었다 (Nutman et al., 2013)(그림 31, 32). 이 암석의 생성환경은 지온지압계, 다중원소평형법(pseudosection) 등을 이용하여 계산될 수 있으며, 보다 정확한 해석을 위해 추가 시료 확보 및 주변암석과의 상관관계 등의 보완 연구가 계획되어야 한다.

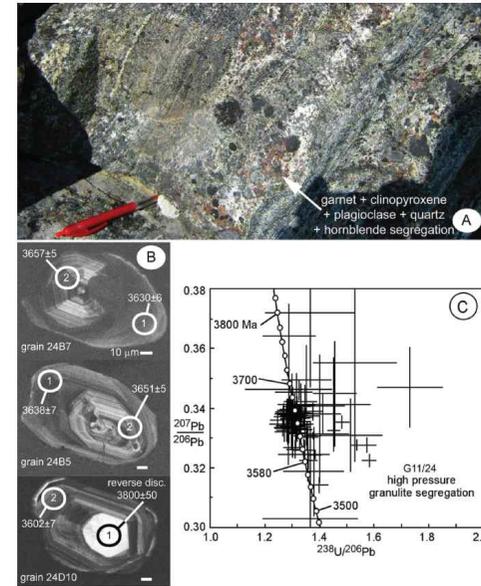


그림 31 고온 백립암의 현장조사 암석(A) 및 저어콘 현미경 사진(B). 고분해능 이차이온질량분석기를 이용한 U-Pb 저어콘 연대측정 결과는 36.5억을 나타냄 (Nutman et al., 2013)

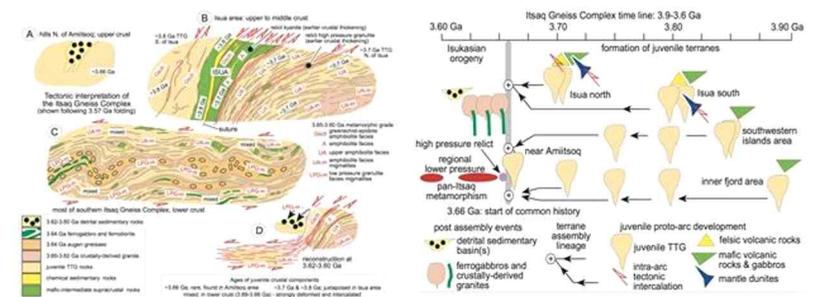


그림 32 39억-36억년의 이수아 편마암 복합체 지역의 지각진화환경 (왼쪽) 및 연대 측정결과 요약(오른쪽). Nutman et al., 2013 인용.

기존의 연구결과를 종합해 볼 때 고온백립암은 37억년 이전에 생성된 이수아지역의

여러 화성암체(대부분 토날라이트 성분)가 36.5억 년 전 하나의 조산작용을 공통적으로 경험하게 된 최초의 시점을 지시한다. 이들 암석의 구성광물 중 저어콘의 U-Pb, Hf, REE, 동위원소는 광물의 중심부와 주변부에 따라 초기 생성 및 조산작용의 환경을 각각 지시하고 있을 가능성이 많으며, 표면 동위원소 분석장비(고분해능 이차이온질량분석기 혹은 레이저작박 유도결합플라즈마 질량분석기)를 이용하여 이를 구분해 내는 정밀분석법의 개발이 필수적이다.

○ 빙하퇴적 쇄설성 저어콘 광물 동위원소 분석

그린란드 만년빙하 하부의 암석은 접근이 불가능하지만, 여름계절에만 한시적으로 생성되는 빙하하천 퇴적물에 포함된 저어콘 광물의 연대측정 및 동위원소 분석을 통하여 간접적 유추가 가능하다. Yi et al. (2014)은 이수아 편마암 복합체 빙하 인근의 하천 4곳에서 퇴적물을 채취하고 분석하여 이수아복합체 동쪽에 위치한 암석은 남서방향 150km에 위치한 Tasiarsuaq 지괴에 대비된다는 것을 성공적으로 증명하였다(그림 33). 이수아 외 여러 지역의 빙하하천 퇴적물에 대해서도 같은 방법이 적용하여 그린란드 내륙지각에 대한 정보를 광역적으로 확장할 수 있다.

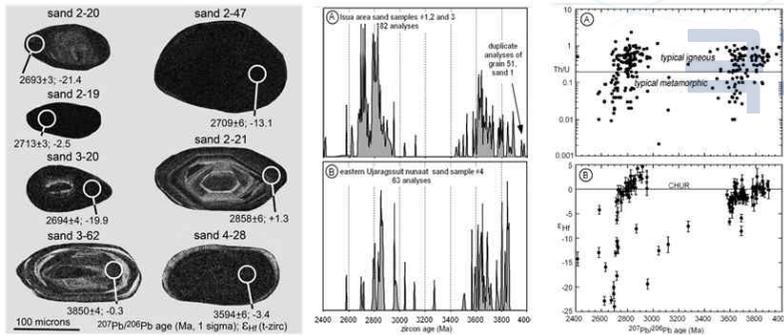


그림 33 이수아 지역 빙하퇴적물에 포함된 쇄설성 저어콘 (왼쪽) 및 연대측정결과 요약(오른쪽). Yi et al., 2014 인용.

○ 초기시생대 최초의 스트로마톨라이트 관련 연구

이수아 편마암 복합체를 둘러싸고 있는 소위 이수아벨트 (ISB, Isua supracrustal belt)에는 초기지구환경의 퇴적환경을 지시하는 다양한 구조가 보고되어 왔으며

(Komiya et al., 1999), 탄소동위원소에 의한 초기생명 기원에 관한 유명한 보고 (Mojzsis et al., 1996)가 퇴적기원의 암석이 아닌 것으로 재보고되는 등 (Lepland et al., 2005, Nutman and Friend, 2006) 논란과 연구가 끊이지 않고 있다. 더욱이 최근 37억년 된 스트로마톨라이트 화석 증거가 이수아벨트 내의 탄산염암에서 보고되었으며 (Nutman et al., 2016)(그림 34), 이 지역에 대한 다양한 학문 융합적 연구가 시도되고 있다.

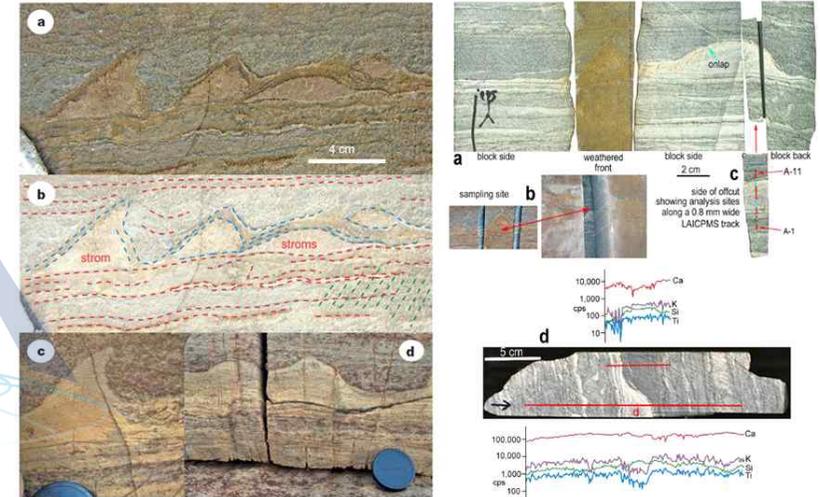


그림 34 이수아벨트에서 최근 보고된 37억년 스트로마톨라이트 화석 야외조사 사진 (왼쪽) 및 화학분석 결과 (오른쪽) Nutman et al., 2016 인용.

3-2-4. 국내 공동연구 협력 전략 구축

○ 연구 방향 및 연구 주제 설정을 위한 워크샵

- 그린란드 고생물 및 원시지구환경 규명 과제 기획을 위한 워크샵

·일시: 2017년 1월 10일

·다산과학기지 기반 향후 연구 방향 및 연구 내용 논의 (그림 35)



그림 35 그린란드 고생물 및 원시지구환경 규명 과제 기획을 위한 워크샵

1. 북극권 그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명 과제 소개 (극지연구소 박태윤)
2. 극지연구소의 북그린란드 기반 고생물학 연구 현황 (극지연구소 박태윤)
3. 지질자원연구원의 암석코어용 Micro CT를 이용한 화석 내부구조 분석 (지질자원연구원 진재화)
4. 북그린란드 지역의 층서와 퇴적학 연구 현황 (극지연구소 우주선)
5. 남서 그린란드의 이수아복합체 연구 현황과 연구 계획 (기초과학지원연구원 이기욱)

○ 그린란드 지질 기반 원시지구환경 규명을 위한 공동연구 기획

- 남서부 전기시생대 이수아 복합체 연구 (기초과학지원연구원 이기욱)

·연구목적

캄브리아기 최초 동물 등장 배경이 되었던 원시지구환경이 지구탄생이후로 어떻게 진화하였는가를 밝히기 위한 연구의 일환으로 지구상에서 가장 오래된 암석인 그린란드 남서부의 이수아복합체(Isua Complex) 연구를 통해 초기 시생대의 원시지구환경을 규명하고자 한다.

· 연구의 필요성

- 초기 지구의 모습을 보여주는 전기시생대(4.0~3.6Ga) 암석이 표출된 곳은 전 지구표면의 0.0001%에 불과할 정도로 희귀하다. 그린란드 남서부의 이수아복합체는 38억 년 전의 변성 기록을 담고 있기에 지구상에서 가장 오래된 원시지구환경을 연구하는 데 적합하다.
- 특히, 최근 이수아복합체에서 37억년으로 지구상에서 가장 오래된 생명체의 흔적이 발견된 곳이기도 하여, 지질학적으로 더욱 주목을 받고 있다(그림 34).
- 그린란드 남서부는 기초과학지원연구원만이 2011년에 현장조사를 수행한 곳이며, 그 동안 극지연구소가 연구를 수행하지 못한 곳이다. 그린란드의 수도인 Nuuk를 비롯해 대부분의 인구가 해안가를 따라 살고 있는 곳이기에, 상업용 비행기로 접근이 가능한 곳이다. 따라서 북그린란드 현장조사에 비해, 저비용으로 연구 결과를 이끌어 낼 수 있는 곳이다.

3-2-5. 국제 공동연구 협력 전략 구축

- 덴마크 Univeristy of Copenhagen의 Arne Nielsen 교수: 절지동물 전문가로 2016년 극지연구소 주도의 북그린란드 Sirius Passet 현장조사에 참여. 현장조사 준비과정에서 그린란드 정부로부터의 현장조사 허가를 담당. 1차년도 현장조사에도 참가할 예정이며, Sirius Passet에서 산출된 절지동물 일부를 극지연구소와 함께 국제공동연구로 수행할 예정.
- 영국 University of Bristol의 Jakob Vinther 교수: 연체동물 및 무척추동물 전문가로 2016년 극지연구소 주도의 북그린란드 Sirius Passet 현장조사에 참여. 1차년도 현장조사에도 참가할 예정. 북그린란드의 다양한 초기 동물 화석들에 대한 국제공동연구를 수행할 예정.
- 호주 University of Woolongong의 Allan Nutman교수와의 그린란드 남서부 초기시생대 편마암복합체 현장야외조사 수행 예정 (2017년, 2018년 여름). 여기에서 확보된 시료는 한국기초과학지원연구원의 연구장비 공동활용 프로그램을 이용하여 정밀동위원소 분석을 계획중임.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

현 기획화제의 최종 목표인 '북부 그린란드를 바탕으로 하는 동물 초기 형태 진화 규명 및 서남부 그린란드를 바탕으로 하는 원시지구환경 연구 기획안을 도출하고, 연구 가치 극대화를 위해 연구 전략을 체계적으로 수립'을 성공적으로 달성하였음



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

□ 지구상 최초로 등장한 동물의 초기 진화 양상을 규명

- 지구상 최초로 등장한 캄브리아기 동물들의 형태진화 양상을 규명하여 현생 동물들의 진화적, 형태적 기원을 이해하는데 기여
- 북그린란드 Sirius Passet의 광물화된 내부구조의 EPMA를 통한 원소분석을 통한 형태 및 고생대 연구를 통하여 북그린란드 화석들을 비롯한 Conservation Lagerstätte 화석들의 새로운 분석 기법 개발
- 암석코어용 Micro CT를 북그린란드 Sirius Passet의 광물화된 내부구조의 3차원 복원에 활용하는 새로운 분석 기법 개발

□ 최신 Remote sensing 기법을 이용한 북그린란드의 지질도 작성

- Landsat-8과 ASTER등 최신 Remote sensing 기법을 활용하여 북그린란드의 지질도를 작성하여 GEUS에서 제공하는 기존의 지질도를 보완
- Remote sensing을 통해 얻어진 새로운 지질도 정보를 북그린란드의 새로운 캄브리아기 화석산지를 찾는 데 활용

□ 그린란드 남서부 이수아복합체 지역의 원시지구환경 규명

- 접근이 쉽지 않은 그린란드 남서부 지역의 초기시생대 암석 연구용 시료확보를 통해 국내외 연구자들에게 기여
- 초기시생대 화성암 및 변성암에 기록된 각종 동위원소 자료 분석을 통해 생명의 기원, 지구조활동의 시작 등 지구조기의 환경을 유추

5-1. 향후 연구방향

가. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	원시절지동물 화석을 통한 절지동물진화 규명	·북그린란드에서 산출된 원시절지동물화석의 형태분석을 통하여 절지동물의 초기 형태진화 양상을 규명하는 논문을 작성
		북그린란드 현장조사	·북그린란드 Sirius Passet으로의 현장조사를 수행하여 캄브리아기 화석 샘플을 채취
		Remote sensing을 이용한 북그린란드 지질도 작성	·빙하 소멸지역 시계열 위성영상 확보 ·빙하 소멸지역 식생 탐지를 위한 원격탐사 영상 획득, 전처리 및 분석 프로토콜 개발
		현생 무척추동물 형태 비교 기반 마련	·캄브리아기의 초기 동물 형태와 비교연구를 위한 극지의 무척추동물 채집
2차년도	2018	남서부 그린란드 이수아복합체 현장조사	·초기시생대 편마암복합체 현장야외조사 및 시료 획득 · U-Pb 저어온 정밀 연대측정
		초기 절지동물 및 무척추동물 진화 규명	·북그린란드에서 산출되는 캄브리아기의 절지동물 및 무척추동물 진화 연구
		북그린란드의 새로운 캄브리아기 화석지 발견	·1차년도에 Remote sensing을 통해 작성된 지질도를 기반으로 기존에 알려진 Sirius Passet이 아닌 새로운 연구 지역 개척
		현생 완보동물과 원시절지동물 비교연구	·극지에서 채집한 현생 완보동물 형태 분석 ·캄브리아기의 원시절지동물과의 형태 비교 연구
3차년도	2019	남서부 그린란드 이수아복합체 현장조사 및 분석 프로토콜 개발	·초기시생대 편마암복합체 현장야외조사 및 시료 획득 ·시생대 시료 Hf/REE 동위원소 분석 프로토콜 개발
		초기 무척추동물 중 후기동물의 진화 규명	·채취된 샘플들을 바탕으로 캄브리아기의 초기 후기동물 진화를 밝힐 수 있는 원시후기동물 화석을 연구
		북그린란드의 새로운 캄브리아기 화석지 현장조사	·2차년도에 찾아낸 새로운 캄브리아기 화석산지로 현장조사 수행
		다른 지역의 캄브리아기 초기 동물화석들과 비교연구	·축적된 북그린란드의 Sirius Passet 동물화석군 데이터를 다른 지역의 캄브리아기 초기 동물화석군 데이터와 비교 분석 ·Cambrian Explosion의 시간, 지역에 따른 변화 양상을 규명
원시지구환경 진화 규명	·시생대 이후 캄브리아기에 이르기까지의 지각진화 양상 규명 ·초기시생대 지구조환경 해석 ·동위원소 분석자료 데이터베이스 구축		

나. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (1저자/공동)	기타	SCI (1저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	1 (1 / 0)	-					
2차년도 (2018)	5 (2 / 3)	-					
3차년도 (2019)	7 (4 / 3)	-					
합 계	13 (7 / 6)	-					

* 제1저자 및 공동저자(제2저자까지) 기재

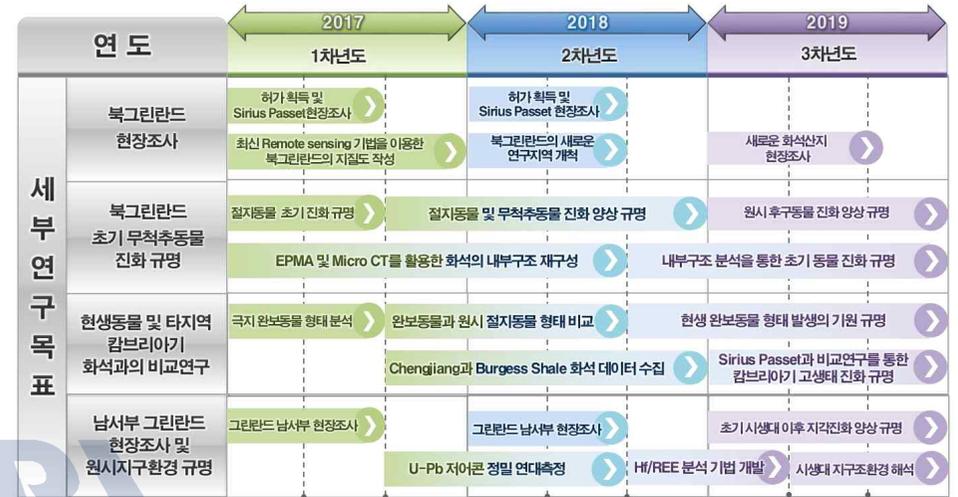
5-2. 국·내외 공동연구 추진 계획

- 한국지질자원연구원의 진재화박사팀이 가지고 있는 암석용 Micro CT를 활용하여, 북그린란드 Sirius Passet에서 산출된 화석들의 광물화된 내부구조를 3차원적으로 복원할 예정으로, 세계 최초로 시도되는 기법으로 고생물학 연구의 새로운 방법론을 제시할 것으로 기대
- 기초과학지원연구원의 이기욱, 이유영 박사팀과 남서부 그린란드의 이수아복합체 연구를 통한 원시지구환경 규명을 위한 공동연구를 수행할 예정으로, 이를 위해 극지연구소의 LA-ICP-MS 및 기초과학지원연구원의 SHRIMP등 다양한 기기들이 활용될 예정
- 덴마크 University of Copenhagen의 Arne Nielsen 교수와 Sirius Passet에서 산출되는 캄브리아기 절지동물의 공동 연구를 비롯, 북그린란드로의 1차년도 현장조사를 함께 수행할 예정이며, Arne Nielsen교수는 이를 위한 그린란드 정부로부터의 허가를 담당할 예정.
- 영국 University of Bristol의 Jakob Vinther 교수와 Sirius Passet에서 산출되는 캄브리아기의 무척추동물 공동연구를 계획하고 있으며, 북그린란드로의 1차년도 현장 조사를 함께 수행할 예정.
- 호주 University of Wollongong의 Allen Nutman 교수와 2017년 여름 그린란드 남서부 시생대 암석 현장야외조사 수행을 위해 국제공동연구팀 구성을 협의 중에 있음. 시료의 정밀연대측정, 하프늄동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원 지구환경 연구부의 연구 장비를 공동 활용하여 수행할 예정임.

5-3. 연구개발 사업 규모

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)	500	600	700

5-4. 총 연구기간 로드맵



5-5. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
		남극 세종과학기지	2017										
남극 장보고과학기지	2017												
	2018												
	2019												
북극 다산과학기지	2017												
	2018												
	2019												
쇄빙연구선 아라온	2017												
	2018												
	2019												

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

북그린란드 연구의 Logistics 활용을 위한 Villum Research Station

사람이 살지 않는 지역적 특성상 북그린란드 연구를 위해서는 Cargo를 보내고 트윈오테를 임차하는 것이 필수적이며, 이에 드는 비용이 많이 소요될 수밖에 없다. 2016년 극지연구소의 북그린란드 현장조사를 위한 Logistics는 주로 덴마크의 현지 대행업체인 POLOG를 활용하였다.

현 과제수행 중 북그린란드 연구의 또 다른 Logistics를 제공할 수 있는 기관인 Villum Research Station(VRS)에 대한 자세한 정보를 얻을 수 있었다. VRS는 덴마크의 Aarhus University의 연구진들이 주도로 St. Nord에 설립한 연구소이며(그림 36), Biology Lab, Wet Lab, Dry Lab을 비롯한 큰 warehouse등을 구비하고 있다. 숙박시설 또한 St. Nord에 비해 최신식으로 구비되어 있다. 또한 북그린란드 연구를 위한 허가에 필수적인 PLB 및 총기류를 대여하고 있어서, 북그린란드 지역의 연구를 하는데 있어서 좋은 Logistics를 제공한다.



그림 36 북그린란드의 St. Nord에 2015년 개설한 Villum Research Station
(원본출처 <http://villumresearchstation.dk/>)

홈페이지를 통해 얻어진 정보를 통해 VRS를 Logistics 파트너로 이용했을 때의 가격표를 얻을 수 있으며, 대체로 POLOG를 통했을 때보다 약 70% 정도의 가격으로 이용할 수 있다(그림 35). 다만 트윈오테 및 헬리콥터 임차비용은 나와 있지 않은데, 트윈오테를 St. Nord로 임차해 오는 비용을 트윈오테를 이용하려고 하는 연구자들이 분담해야하기 때문인데, 아직 2017년 시즌은 얼마나 많은 연구자들이 트윈오테를 사용할지 정해지지 않았기 때문이다.

2017년 시즌에는 St. Nord에 헬리콥터도 상주할 예정이어서, 이를 북그린란드의 새로운 캠프로 야기 화석산지 탐사에 이용하기 위한 방법을 VRS측에 알아볼 계획이다.

VRS pricelist 2016

	DKK	
TICKETS		
EUROPE to VRS	20,000.00	
VRS to EUROPE	20,000.00	
DK to VRS	17,500.00	
VRS to DK	17,500.00	
SVALBARD (LYR) to VRS	12,500.00	
VRS to SVALBARD (LYR)	12,500.00	
Forsvaret (adm)	2,000.00	
Admittance to the Nationalpark	2,000.00	
Change of ticket	500.00	
DAYS AT VRS		
Days at VRS	1,950.00	kr. pr. day
CARGO		
Air cargo DK - VRS	200.00	kr. pr. kilo
Air cargo VRS - DK	200.00	kr. pr. kilo
Air cargo Svalbard (LYR) to VRS	100.00	kr. pr. kilo
Air cargo VRS - Svalbard (LYR)	100.00	kr. pr. kilo
Ship- and air cargo to VRS	125.00	kr. pr. kilo
Air- and ship cargo to VRS	125.00	kr. pr. kilo
Handling	2,000.00	
Customs clearance	2,000.00	
Dangerous cargo	2,000.00	
PROJECT CONSUMPTION		
Fuel	35.00	kr. pr. liter
Rubber boat	650.00	kr. pr. dag
ATV	650.00	kr. pr. dag
Snow mobile	650.00	kr. pr. dag
Bicycle	10.00	kr. pr. dag
Sledge	100.00	kr. pr. dag
Ski	50.00	kr. pr. dag
Laboratory facilities	250.00	kr. pr.dag
USER PAYMENT		
Telephone minutes	10.00	pr. minute
Mail Kb	0.15	kr. pr. Kb
Souvenirs DKK		Actual price
OTHER EXPENSES		
Overweight (luggage)	100.00	kr. pr. kilo

그림 38 Villum Research Station의 홈페이지에서 제공되는 Logistics관련 가격표.

제 7 장 참고문헌

- Budd, G.E. 1993. A Cambrian gilled lobopod from Greenland. *Nature* 364, 709-711.
- Budd, G.E. 2011. *Campanamuta mantoniae* gen. et. sp. nov., an exceptionally preserved arthropod from the Sirius Passet Fauna (Buen Formation, lower Cambrian, North Greenland). *Journal of Systematic Palaeontology* 19, 217-260.
- Caron, J.-B., Gaines, R.R., Aria, C. Mangano, M.G. & Streng, M. 2014. A new phyllopod bed-like assemblage from the Burgess Shale of the Canadian Rockies. *Nature Communications* 5, 3210.
- Cong, P., Ma, X., Hou, X., Edgecombe, G.D. & Strausfeld, N.J. 2014. Brain structure resolves the segmental affinity of anomalocaridid appendages. *Nature* 513, 538-542.
- Conway Morris, S. 1998. *The Crucible of Creation*. Oxford University Press, pp. 242.
- Conway Morris, S., Peel, J.S., Higgins, A.K., Soper, N.J. & Davis, N.C. 1987. A Burgess shale-like fauna from the Lower Cambrian of North Greenland. *Nature* 326, 181-183.
- Conway Morris, S. & Peel, J.S. 1990. Articulated halkieriids from the Lower Cambrian of North Greenland. *Nature* 345, 802-805.
- Daley, A.C., Budd, G.E., Caron, J.-B., Edgecombe, G.D. & Collins, D. 2009. The Burgess shale anomalocaridid *Hurdia* and its significance for early euarthropod evolution. *Science* 323, 1597-1600.
- Friend, C.L., Nutman, A.P., 2010. Eoarchean ophiolite? new evidence for the debate on the Isua supracrustal belt, southern west Greenland. *American Journal of Science*, 310, 826-861.
- Furnes, H., de Wit, M., Staudigel, H., Rosing, M. & Muehlenbach, K. 2007. A vestige of Earth's oldest ophiolite. *Science* 1704-1707.
- Ineson, J. R. & Peel, J. S. 1980. Cambrian stratigraphy in Greenland. *Rapport Grønlands Geologiske Undersøgelse* 99, 33 - 42.
- Ineson, J. R. & Peel, J. S. 1987. Cambrian platform - outer shelf relationships in the Nordenskiöld Fjord region, central North Greenland. *Rapport Grønlands Geologiske Undersøgelse* 133, 13 - 26.
- Higgins, A. K., Ineson, J. R., Peel, J. S., Surlyk, F. & Sønderholm, M. 1991a. Lower Palaeozoic Franklinian Basin of North Greenland. In Peel, J. S. & Sønderholm, M. (ed.) *Sedimentary basins of North Greenland. Bulletin Grønlands Geologiske Undersøgelse* 160, 71 - 139.
- Ineson, J.R. & Peel, J.S. 2011. Geological and depositional setting of the Sirius Passet Lagerstätte (Early Cambrian), North Greenland. *Canadian Journal of Earth Science* 48, 1259-1281.
- Higgins, A. K., Ineson, J. R., Peel, J. S., Surlyk, F. & Sønderholm, M. 1991b. Cambrian to Silurian basin development and sedimentation, North Greenland. In Trettin, H. P. (ed.) *Geology of the Inuitian orogen and arctic platform of Canada and Greenland. Geology of Canada* 3, 111 - 161. Ottawa, Geological Survey of Canada.
- Horie, K., Nutmann, A.P., Friend, C.R.L. & Hidaka, H. 2010. The complex age of orthogneiss protoliths exemplified by the Eoarchean Itsaq Gneiss Complex (Greenland): SHRIMP and old rocks. *Precambrian Research* 183, 25-43.
- Jin, J.H., Kim, J., Lee, J.-Y. & Oh, Y.M. 2016. Correlative multiple porosimetry for reservoir sandstones with adoption of a new reference-sample-guided computed-tomographic method. *Scientific Reports* 6, 30250.
- Kaczmarek, M.-A., Reddy, S.M., Nutman, A.P., Friend, C.R.L., Bennet, V.C., 2016. Earth's oldest mantle fabrics indicate Eoarchean subduction. *Nature Communications*, 10665.
- Komiya, T., Maruyama, S., Masuda, T., Nohda, S., Hayashi, M., Okamoto, K., 1999. Plate Tectonics at 3.8 - 3.7 Ga: Field Evidence from the Isua Accretionary Complex, Southern West Greenland. *Journal of Geology*, 107, 515-554.

- Le Boudec, A., J. Ineson, M. Rosing, L. Dassing, F. Martineau, C. Lecuyer, & F. Albarede 2014. Geochemistry of the Cambrian Sirius Passet Lagerstätte, Northern Greenland, *Geochemistry Geophysics Geosystems* 15, 886 - 904.
- Lepland, A., van Zuilen, M.A., Arrhenius, G., Whitehouse, M.J., Fedo, C.M., 2005. Questioning the evidence for Earth's earliest life-Akilia revisited. *Geology*, 33, 77-79.
- Ma, X., Hou, X., Edgecombe, G.D. & Strausfeld, N.J. 2012. Complex brain and optic lobes in an early Cambrian arthropod. *Nature* 490, 258-261.
- Mojzsis, S.J., Arrhenius, G., McKeegan, K.D., Harrison, T.M., Nutman, A.P., Friend, C.R.L., 1996, Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature*, 384, 55-59.
- Moysiuk, J., Smith, M.R., & Caron, J.-B. 2017. Hyoliths are Palaeozoic lophophorates. *Nature* in press.
- Nagel, T.J., Hoffmann, E., Muker, C., 2012. Generation of Eoarchean tonalite-trochilite-granodiorite series from thickened mafic arc crust. *Geology*, 40, 375-378.
- Nutman, A.P., Bennett, V.C., Friend, C.R., Hidaka, H., Yi, K., Lee, S.R., Kamiichi, T., 2013. The Itsaq gneiss complex of Greenland: Episodic 3900 to 3660 Ma juvenile crust formation and recycling in the 3660 to 3600Ma Isukasian orogeny. *American Journal of Science*, 313, 877-911.
- Nutman, A.P., Bennett, V.C., Friend, C.R.L., Kranendonk, M.J.V. & Chivas, A.R. 2016. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. *Nature* 537, 535-538.
- Ohtomo, Y., Kakegawa, T., Ishida, A., Toshiro, N., Rosing, M., 2014. Evidence for biogenic graphite in early Archean Isua metasedimentary rocks. *Nature*

Geosciences, 7, 25-28.

- Park, T.-Y. & Kihm, J.-H. 2017. Head Segmentation of Trilobites. *Lethaia* 50, 1-6.
- Park, T.-Y., Woo, J., Lee, D.-J., Lee, D.-C., Lee, S.-B., Han, Z. Chough, S.K. & Choi, D.K. 2011. A stem-group cnidarian described from the mid-Cambrian of China and its significance for cindarian evolution. *Nature Communications* 2, 442.
- Peel, J. S. & Ineson, J. R. 2011. The extent of the Sirius Passet Lagerstätte (early Cambrian) of North Greenland. *Bulletin of Geosciences*, 86, 535-543.
- Pour, B.A. & Hashim, M. 2014. ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore mineral exploration. *Springerplus* 3, 1-19.
- Pour, B. A. & Hashim, M. 2015. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science* 9, 155-166.
- Smith, M.R. & Ortega-Hernandez, J. 2014 *Hallucigenia's* onychophoran-like claws and the case for Tactopoda. *Nature* 514, 363-366.
- Strang KM, Armstrong HA, Harper DAT. 2016 Minerals in the gut: scoping a Cambrian digestive system. *Royal Society Open Science* 3, 160420.
- Strang, K.M., Armstrong, H.A., Harper, D.A.T. & Trabucho-Alexandre, J.P. 2016: The Sirius Passet Lagerstätte: silica death masking opens the window on the earliest matground community of the Cambrian explosion. *Lethaia* 49, 631 - 643.
- Tanaka, G., Hou, X., Ma, X., Edgecombe, G.D. & Strausfeld, N.J. 2013. Chelicerate neural ground pattern in a Cambrian great appendage arthropod. *Nature* 502, 364-367.
- Vinther, J., Stein, M., Longrich, N.R. & Harper, D.A.T. 2014. A suspension-feeding anomalocarid from the Early Cambrian. *Nature* 507, 496-499.
- Yi, K., Bennett, V. C., Nutman, A. P. & Lee, S.-R., 2014. Tracing Archaean terranes under Greenland's Icecap: U-Th-Pb-Hf isotopic study of zircons from melt-water rivers in the Isua area. *Precambrian Research*, 255, 900-921.

뒷 면

(국내 과제용)



주 의

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