

[서식 제1호] 최종보고서

UST Young Scientist+ 양성 사업 최종보고서
UST Young Scientist+ Research Program Final Report

과제번호 Grant Number								
과제명 Project Title	국문 Korean	북그린란드 캄브리아기 미화석 분석을 통한 초기 연체동물의 외골격 형성 및 화석화 메커니즘 연구						
	영문 English	Cambrian molluscan fauna from North Greenland: morphology of shell structure and taphonomic process						
스쿨/캠퍼스 School · Campus		극지연구소		전공 Major		극지과학		
UST 학생 UST Student	성명 Name	오영주	학위과정 Course	박사(수료)	연락처 Contact	(E-mail) yjoh@kopri.re.kr (Mobile) 010-3537-5585		
지도교수 Advisor	성명 Name	박태운	직급/직위 Position	책임연구원	연락처 Contact	(E-mail) tpark@kopri.re.kr (Mobile) 010-9775-0678		
연구기간 Period	2022.12.01.~2023.11.30.			총연구비 Grants		21백만	원 KRW	

2022년도 UST Young Scientist+ 양성 사업 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다. 보고서에는 사실과 다른 내용이 포함되지 아니하였으며, 만약 허위사실이나 중대한 오류가 발견 될 경우에는 그에 상응하는 불이익을 감수할 것임을 서약합니다.

I hereby submit the Final Report of 2022 UST Young Scientist+ Research Program as attached. To the best of my knowledge, all of the information included in my report is true and I will take any penalty if false information or serious error is found in my report.

첨부 : 최종보고서 1부.
Attachment: Final Report

2023. 12. 28.

UST 학생 : 오영주 (서명)
UST Student : 오영주 Signature

지도교수 : 박태운 (서명)
Advisor : 박태운 Signature

과학기술연합대학원대학교 총장 귀하
To the President of University of Science and Technology

요약문

I. 연구개요

- 캄브리아기와 현생 연체동물간의 진화적 유연관계를 규명하기 위해 화석에 보존된 생광물(biomineral) 구조를 파악하는 것이 중요
- 북그린란드에는 변형되지 않은 캄브리아기 퇴적층이 분포하므로 보존이 좋은 연체동물 화석의 산출이 가능

II. 연구 수행내용 및 과정

- 북그린란드 Midsommer sø 지역의 캄브리아기 지층을 대상으로 지질조사 수행
- 기확보한 시료 및 새롭게 획득한 시료를 토대로 캄브리아기 연체동물 화석에 보존된 생광물 구조 연구 진행

III. 연구 수행결과 및 목표달성 수준

- 북그린란드 현장연구를 통해 캄브리아기 탄산염 암석 채취
- Acid etching technique을 활용하여 캄브리아기 미화석 시료 획득
- 캄브리아기 연체동물 미화석 일부 종에서 확인되는 특이구조를 기반으로, 외골격 형성 및 화석화 과정의 메커니즘에 대한 새로운 가설 도출

IV. 연구 성과 및 관련 분야 기여도

- 캄브리아기 당시 북그린란드의 고환경 해석에 도움이 될 수 있는 자료 제공
- 연체동물 초기 진화 역사를 규명하는데 도움이 될 수 있는 단서 제공

V. 연구결과의 활용방안

- SCI급 국제 학술지에 게재 승인완료
- 박사 학위논문 작성시 반영 예정

1. 연구개요

[학술적 배경]

- 연체동물은 지구상에서 두 번째로 많은 종이 기재된 매우 번성한 동물군으로, 진화 역사는 캄브리아기(약 5억 4천만 년 전)까지 거슬러 올라감.
- 캄브리아기의 연체동물은 원시적 형태의 이매패류(조개) 및 복족류(달팽이)와 더불어, 1991년 John Peel 박사에 의해 명명된 '헬시오넬로이드(Helcionelloid)'라는 동물 그룹으로 대표됨. 이들은 현재의 연체동물과는 크기나 형태적으로 큰 차이를 보임.
- 캄브리아기와 현재의 연체동물군 사이의 진화적 관계에 대해서는 여러 이견이 있으며, 합의된 가설이 존재하지 않음. 따라서 추가적인 고생물학적 연구를 통한 심층적 형태 비교분석이 필요함(그림 1).

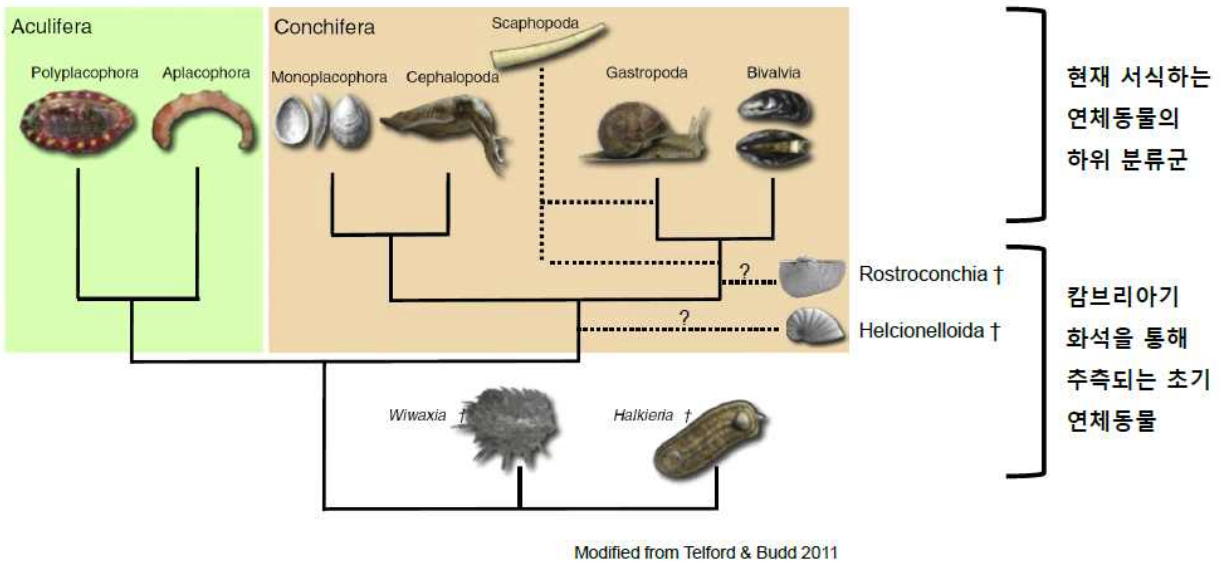


그림 1 현재 서식하고 있는 연체동물 7개 그룹과 캄브리아기의 연체동물 (Latouchella, *Wiwaxia*, *Halkieria*) 간의 진화적 유연관계를 나타낸 분기도 (Telford and Budd, 2011). 캄브리아기 연체동물들과 현생 연체동물의 형태적 차이가 뚜렷하게 나타남.

- 연체동물의 외골격은 성장하면서 생물 스스로 형성해내는 광물이라는 의미에서 '생광물(biomineral)'이라고 불리며, 여러 층으로 구성된 복합적인 구조를 가짐. (그림2)

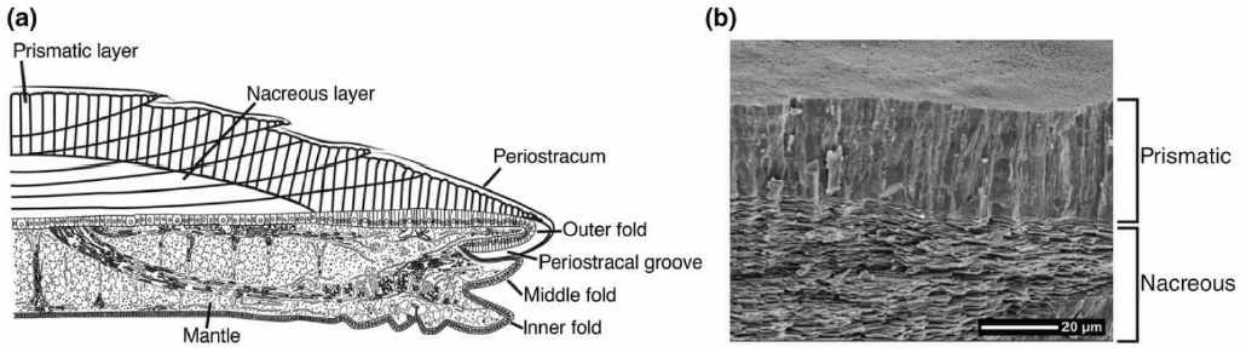


그림 2 연체동물의 외골격 단면을 나타내는 모식도. Soft part에 해당되는 Mantle를 제외하고 Periostracum, Prismatic layer, Nacreous layer로 구성된 생광물 구조를 보여줌 (McDougall and Degan, 2018).

□ 캄브리아기 헬시오넬로이드(Helcionelloid) 연체동물 화석에서 비교 가능한 생광물 구조가 최근 보고된 바 있음 (Vendrasco et al., 2011). 이는 캄브리아기와 현생 연체동물 간의 진화적 유연관계를 해석하는데 생광물 구조가 중요한 역할을 할 수 있음을 시사함.

□ 그러나 이러한 생광물 구조는 변형 받지 않은 퇴적층에서 보존상태가 양호한 화석의 경우에만 발견될 가능성이 있기 때문에 관련 보고사례가 미흡한 상태임.

[현장연구의 필요성]

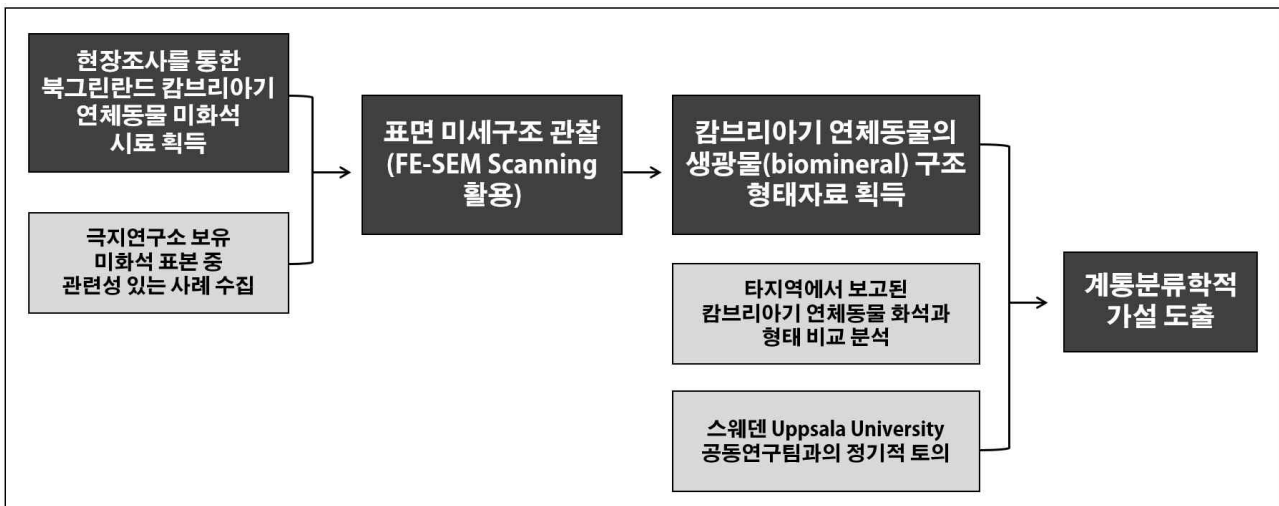
□ 북그린란드는 상대적으로 안정된 지질학적 역사를 가진 지역임. 층서퇴적학적 선행 연구에 따르면, 북그린란드에는 변형되지 않은 캄브리아기 퇴적층이 동서 방향으로 2000 km 가량 연장되어 잘 보존되어 있음. (그림3)



그림 3 (왼쪽) 그린란드의 위성지도. 극지연구소에서 고생물학 연구를 수행중인 북그린란드의 Sirius Passet 지역의 위치가 표시되어 있음. (오른쪽) 2023년에 극지연구소에서 현장연구를 수행한 지역인 Midsommer sø 지역의 지질도. 캄브리아기 지층인 Buen 층과 Brønlund Fjord 층군의 분포가 확인된다.

- 북그린란드는 현재는 위도 80°이상의 북극권에 위치해 있지만, 약 5억 년 전 캄브리아기 당시에는 적도 지역에 위치해 있던 로렌시아 대륙의 일부를 구성했음. 따라서 주변의 얕고 따뜻한 바다에서 다양한 해양 연체동물이 서식했기 때문에 캄브리아기 해양 무척추 동물 화석이 풍부하게 산출됨 (Brock et al. 2000).
- 극지연구소는 2016년도부터 북그린란드 지역의 현장조사를 실시하여 체계적인 고생물학 연구를 수행해왔으나, 캄브리아기 연체동물에 관한 연구는 부족한 상태임.

II. 연구 수행내용 및 과정



극지연구소

1) 북그린란드 Midsommer sø 지역 현장조사

- 극지연구소의 북그린란드 현장조사는 여름시즌인 2023년 7-8월 경에 진행되었으며, 캄브리아기 퇴적층을 대상으로 하는 지질조사 현장연구가 함께 수행되었음.
- 2023년도 현장조사 후보지인 Midsommer sø는 덴마크 지질조사소 연구진이 지질도 작성을 위해 방문한 이력이 있으나, 캄브리아기 퇴적층에 대해서는 대략적 지층 분포 기록 외에는 주상도 작성조차 수행된 바 없었음.
- 2021년 11월 이미리내 극지연구소 선임연구원과 오영주 UST 박사과정생의 국외출장 당시 Uppsala University를 방문하여 공동연구를 수행중인 John Peel 박사로부터 Midsommer sø 지역의 1970년대 지질 조사 자료를 확보하였으며, 올해 진행된 현장조사의 계획수립 시 활용하였음 (그림 4).

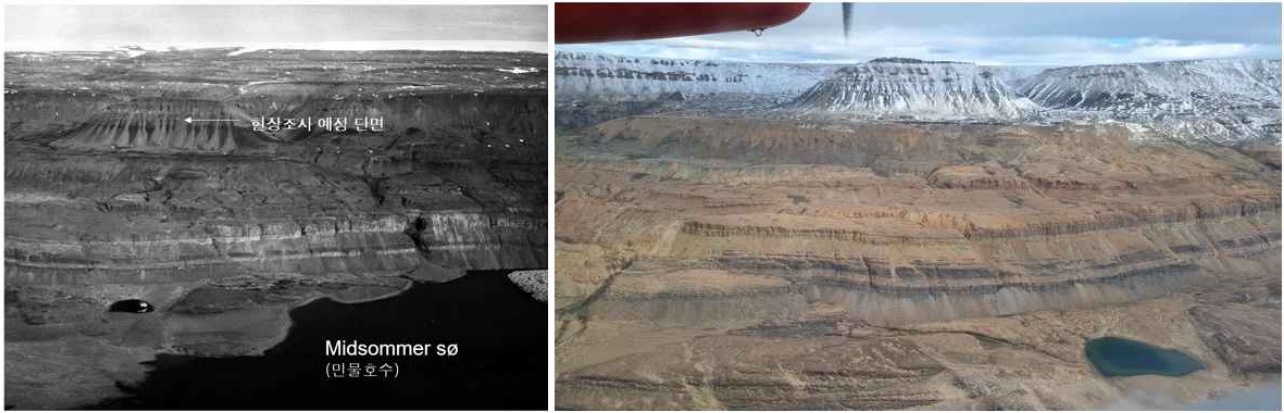


그림 4 1978년 7월 촬영된 Midsommer sø 지역의 현장연구 사진(왼쪽; John Peel 교수 제공)과, 2023년 8월 촬영한 동일지역 사진 (오른쪽).

2) Acid etching 기술을 이용한 미화석 시료 획득

- 현장조사에서 채취한 캄브리아기 암석은 탄산염암석(carbonate rock)의 형태임.
- 탄산염암석은 산(acid)에 녹는 성질을 가짐. 따라서 암석을 산(acid)에 며칠간 담가 녹여서 잔여물을 걸러내면 암석 내에 포함되어 있던 미화석을 획득할 수 있음. ('Acid etching technique')
- 탄산염암석 중에서도 석회암의 경우는 15% 농도의 초산(acetic acid), 백운암의 경우에는 10% 농도의 포름산(formic acid)을 이용하며, 각 경우마다 실험 매뉴얼 및 필요장비가 다름 (Willman *et al.*, 2020).
- 극지연구소 고생물학연구팀은 두 가지의 경우 모두 미화석을 추출할 수 있는 기술을 확보하고 있으며, 적극적으로 활용하였음.

3) 기존 보유 시료 활용

- Uppsala University 연구진과의 공동연구 및 박사학위 연구를 목적으로 대여받아 극지연구소에서 보유하고 있는 북그린란드 미화석 시료 중 본 연구과제와 관련성이 존재할 만한 연체동물 시료들을 함께 활용하였음 (그림 5).

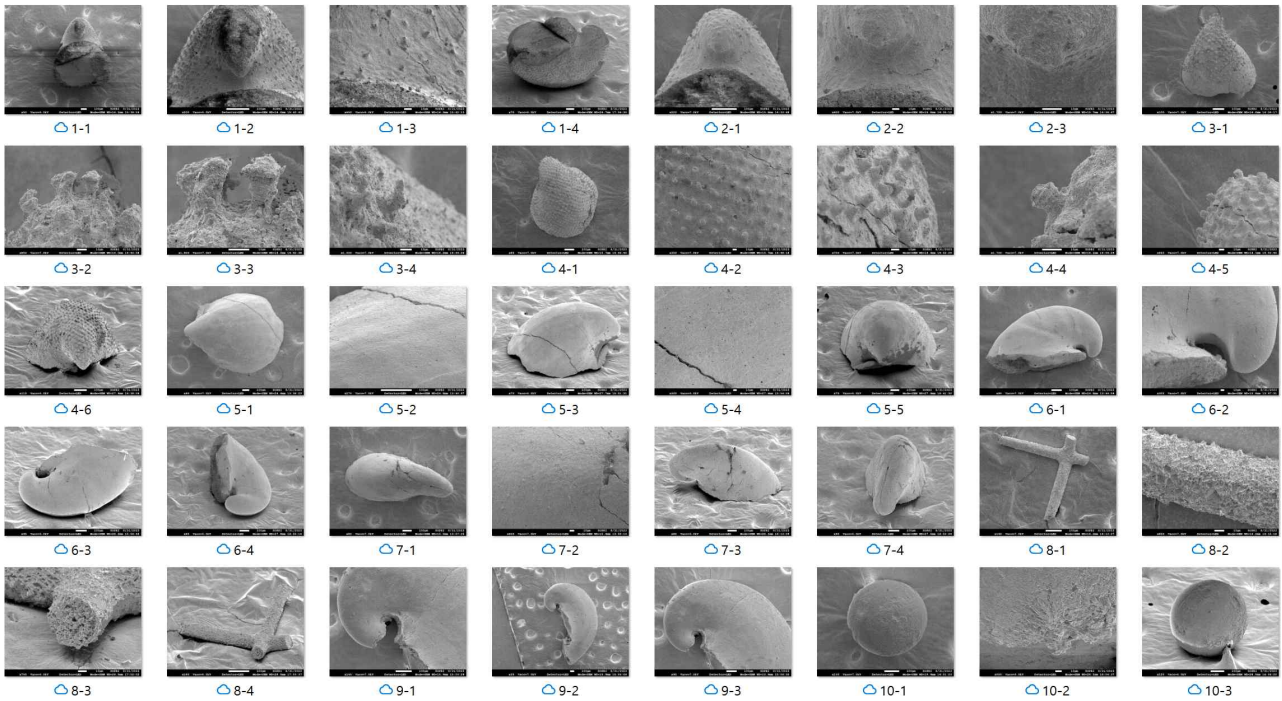


그림 5 극지연구소에서 보유하고 있던 북그린란드 캄브리아기 미화석 시료 중 연체동물 화석사진 일부

4) FE-SEM을 활용한 표면 미세구조 관찰

- 캄브리아기 연체동물 미화석의 최대 길이는 약 5 mm 정도로, 크기가 매우 작기 때문에 일반 화석촬영용 DSLR 카메라나 실체 현미경으로는 표면 미세구조의 확인이 불가능.
- 극지연구소에서 보유하고 있는 FE-SEM(전계방출형 주사전자현미경)을 활용하면 미세구조로 이루어진 생광물(biomineral) 형태를 마이크로미터(μm) 및 나노(nm) 단위에서 자세히 관찰할 수 있음 (그림 6).
- 또한, FE-SEM에 장착되어있는 EDS 정성분석을 활용하면 해당 구조를 구성하는 원소의 종류 및 함량을 확인할 수 있음.

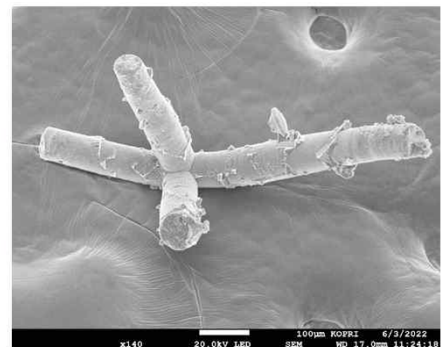


그림 6 (왼쪽) 극지연구소에서 보유중인 전자현미경인 FE-SEM 기기의 모습. (중간) 일반 실체현미경에서 관찰한 해면동물의 골편 화석의 모습. 최대길이 3 mm 정도로 크기가 작아 전반적 형태 외에는 세부적인 구조를 확인하기 어려움. (오른쪽) FE-SEM Scanning을 통해 촬영한 해면동물 골편 화석의 모습. 표면 및 단면 구조를 선명하게 관찰 가능.

5) 국외 전문가와의 공동연구

- 세계적인 북그린란드 고생물학 전문가 John Peel 교수(Uppsala University)와 현장 연구 계획 및 연구내용 논의를 위해 해당 기관을 방문하여 방문연구를 수행하였음. (그림 7)



그림 7 방문연구기관인 스웨덴 Uppsala University의 모습. (왼쪽 및 가운데) 고생물학부가 위치한 Geocentrum 건물. 함께 실험을 진행중인 오영주 UST협동연구생과 고생물학 전문가 John Peel 교수.

III. 연구 수행결과 및 목표달성 수준

- 연구계획서에서 기술한 추진전략을 모두 이수하였으며 대부분의 연구목표 또한 달성하였음. (연구목표별 달성 세부사항은 아래 ‘[연구목표 1, 2]’를 참조)
- 연구 제안서 제출시에는 북그린란드 현장지질조사 및 스웨덴 방문연구에 필요한 비용을 본 과제에서 지출할 계획이었으나, 국외출장비 상한액 제한 규정으로 인해 해당 출장은 소속기관에서의 기존 참여과제로부터 지원을 받아 수행하였음.

[연구목표 1] 북그린란드 현장 지질조사를 수행하여 캄브리아기 연체동물 화석시료를 획득

- 극지연구소 주도로 2023년 7월 17일부터 8월 4일까지 19일간 그린란드의 Midsommer Sø 일대 (82°13' N, 34°52' W)의 지질조사를 수행하였으며, 캄브리아기 미화석 연구를 위한 탄산염 암석 시료를 채취하는데 성공함. (그림 8)



그림 8 (좌) 쇠설성 암석으로 구성된 Buen 층과 탄산염 암석으로 구성된 Brønlund Fjord Group의 지질조사 수행 노두. Brønlund Fjord Group의 최하부 Aftenstjernesø 층에서 캄브리아기 미화석 연체동물이 다수 산출된다. (우) 해당 노두에서 지질조사를 수행 중인 오영주 UST협동연구생.

□ 캄브리아기 미화석이 주로 산출되는 Aftenstjernesø 층의 최하부 ‘Member A’ 층준 뿐만 아니라, 에디아카라기의 미화석이 산출된다고 알려진 Portfjeld 층에 대한 지질조사 및 암석시료 채취 작업도 함께 수행하였음. (그림 9)

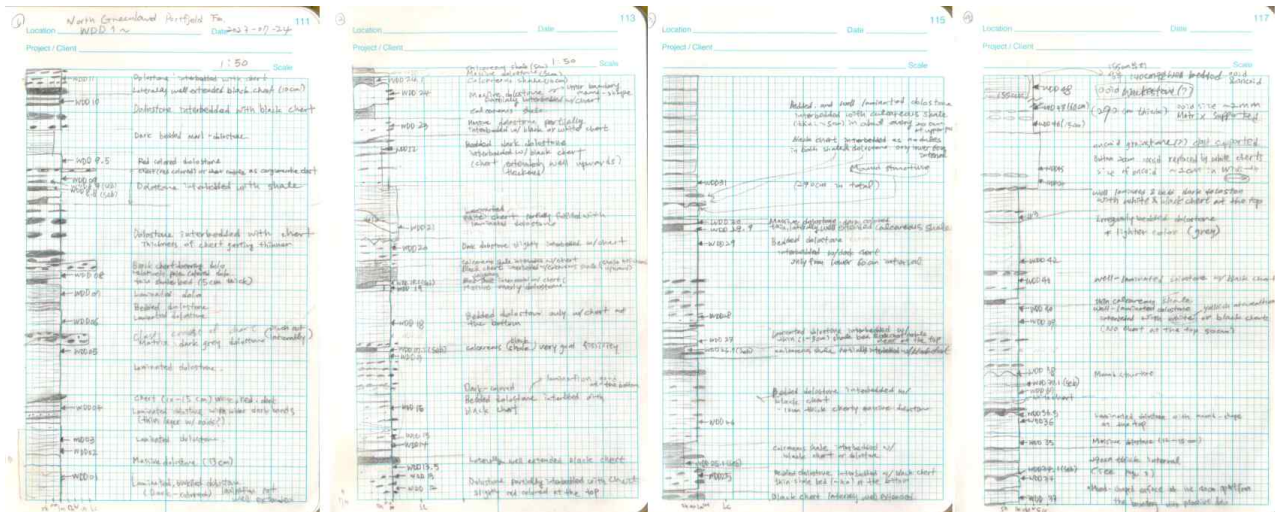


그림 9 Portfjeld 층에 대한 지질조사를 수행하며 작성한 주상도의 일부. 퇴적층을 구성하는 암석의 종류, 두께 및 퇴적구조를 기술하였음.

□ 북그린란드에서 채취한 백운암 시료를 분석한 결과 다수의 미화석 시료를 추출하였으며, 미화석 연체동물 시료를 획득하는 데에도 성공함. (그림 10)

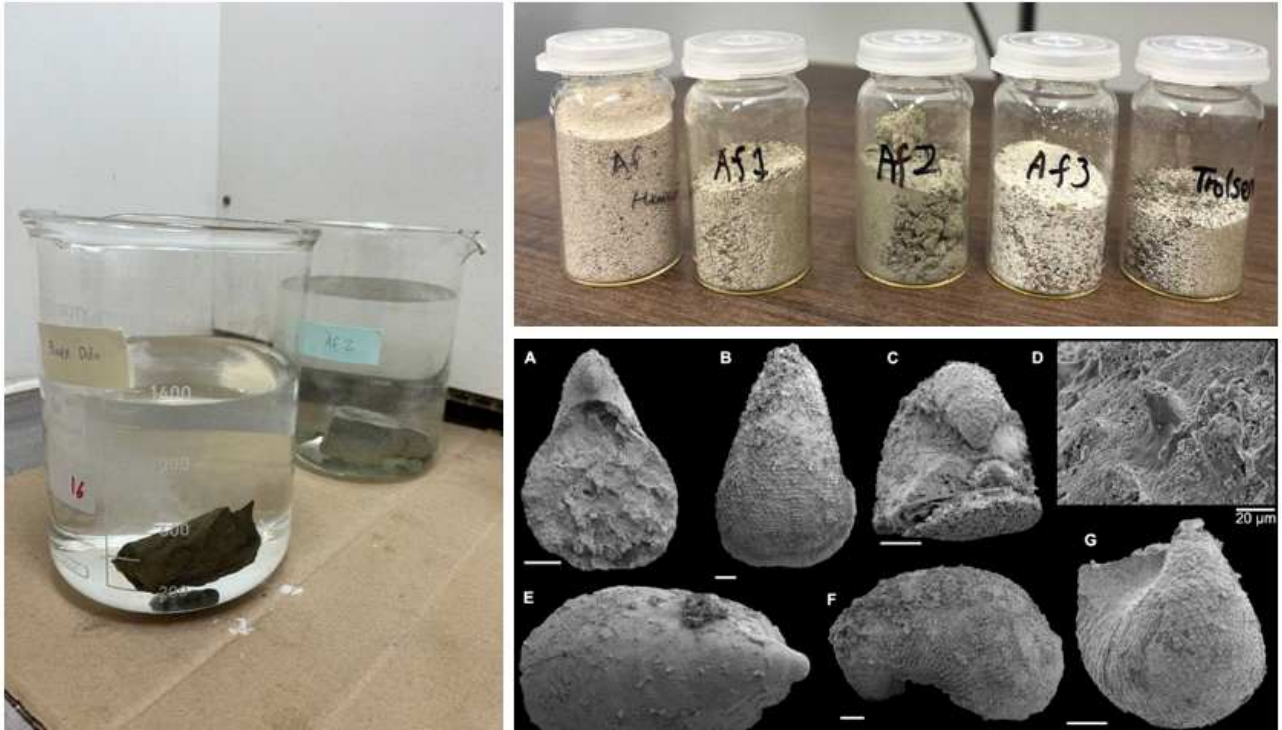


그림 10 Midsommer Sø 주변 캄브리아기 Aftenstjernesø 층 연구 과정 및 결과물. 포름산으로 acid etching 중인 백운암 시료들 (왼쪽). 산처리 실험 후 내산성 잔여물들 (오른쪽 위). 내산성 잔여물에서 발견된 캄브리아기 미화석 연체동물 중 일부 (오른쪽 아래).

[연구목표 2] 캄브리아기 초기 연체동물의 외골격 형성 및 화석화 과정의 메커니즘에 대한 계통분류학적 가설 도출

- 스웨덴 방문연구 기간 중 해당 기관에서 보유하고 있던 표본을 관찰하던 과정에서 표면이 방사형의 선구조로 덮여있는 북그린란드 캄브리아기 연체동물 화석을 발견함. (그림 11)
- 극지연구소에서 기존에 보유하고 있던 호주 및 그린란드 표본 및 올해 북그린란드 탐사 시 채취한 표본들을 면밀히 살펴본 결과, 동일한 구조를 갖는 캄브리아기 연체동물 미화석들을 추가로 확인할 수 있었음.

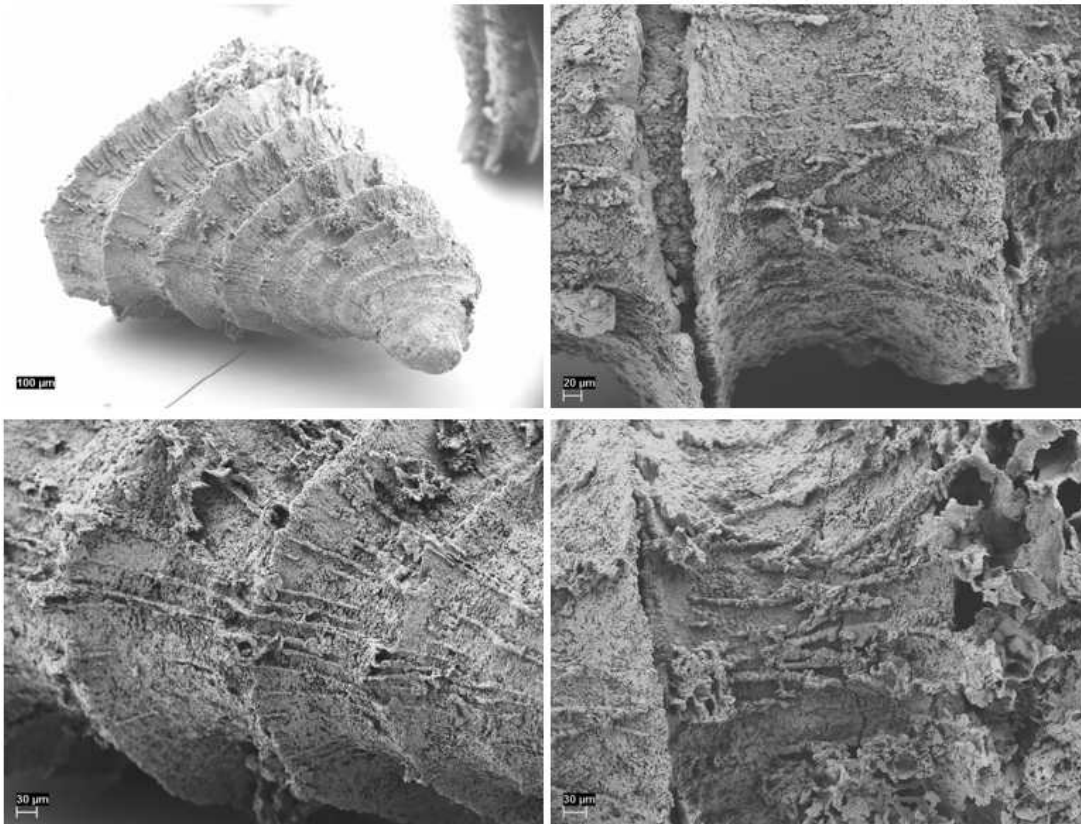


그림 11 캄브리아기 연체동물 미화석에서 발견된 방사형 실구조

□ 해당 방사형 선구조의 형태를 자세히 관찰하기 위해 FE-SEM 분석을 실시함과 더불어, 현생 및 젊은 연대의 연체동물 시료와의 비교연구를 수행하였음. 이를 통해 이 구조가 이매패류 및 복족류의 껍질에 있는 각피(periostracum)과 유사한 형태임을 밝혀냄. (그림 12)

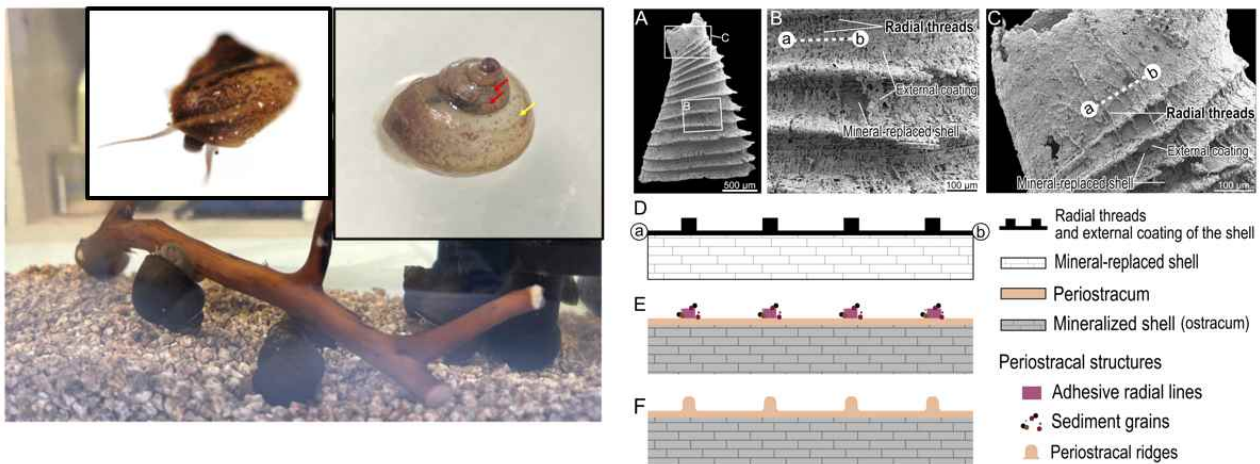


그림 12 현생 연체동물과의 비교 연구를 위해 실험실에서 사육한 논우렁이과 복족류(*Cipangopaludina chinensis malleata*)(왼쪽)와 캄브리아기 미화석에서 나타나는 방사형 실구조의 형태 분석 및 비교결과(오른쪽)

IV. 연구 성과 및 관련 분야 기여도

- 북그린랜드는 캄브리아기 당시 저위도에 위치한 고대륙 '로렌시아'의 일부로서 다양한 무척추동물의 서식지였음. 그중에서도 연체동물은 캄브리아기 무척추동물군을 이루는 중요한 구성요소였음. 따라서, 북그린랜드의 캄브리아기 연체동물 연구는 해당 시기 로렌시아 대륙의 고환경을 해석하는 데 단서를 제공할 수 있음.
- 연체동물 초기 진화 역사를 규명하는데 도움이 될 수 있는 단서 제공할 수 있음.
- 북그린랜드 캄브리아기 연체동물 미화석에 보존된 방사형 실구조를 보고하고 현생 연체동물의 각피(periostracum) 구조와 비교하여 형성과정 및 화석화 과정을 해석하였음. 이 결과는 국제 고생물학 학술대회 PDU3에서 구두 발표 및 SCI급 국제학술지 *Lethaia*에 2023년 12월 13일부로 게재 승인되었음.

V. 연구결과의 활용방안

- 현재 진행하고 있는 박사 학위 연구인 북그린랜드 무척추동물 미화석의 분류 및 형태기술에 관하여 학위논문 작성 시 한 챕터로 반영 예정

VI. 참고문헌

- Brock, G. A., Engelbretsen, M. J., Jago, J. B., Kruse, P. D., Laurie, J. R., Shergold, J. H., Shi, G. R., & Sorauf, J. E. (2000). Palaeobiogeographic affinities of Australian Cambrian faunas. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, 1-61.
- McDougall, C., & Degnan, B. M. (2018). The evolution of mollusc shells. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 7(3), e313.
- Telford, M. J., & Budd, G. E. (2011). Invertebrate evolution: bringing order to the molluscan chaos. *Current Biology*, 21(23), R964-R966.
- Vendrasco, M. J., Checa, A. G., & Kouchinsky, A. V. (2011). Shell microstructure of the early bivalve *Pojetaia* and the independent origin of nacre within the Mollusca. *Palaeontology*, 54(4), 825-850.
- Willman, S., Peel, J. S., Ineson, J. R., Schovsbo, N. H., Rugen, E. J., & Frei, R. (2020). Ediacaran Doushantuo-type biota discovered in Laurentia. *Communications Biology*, 3(1), 1-10.

VII. 주요 연구실적

1. 연구실적 요약

학술지 논문	학회논문	특허 출원	특허 등록	대내외 수상
1 건	1 건	건	건	건

2. 학술지 논문

No.	논문제목	학술지명	저자순	게재연월	국내/국외	SCI 여부
1	Periostracum in Cambrian helcionelloid and rostroconch molluscs: comparison to modern taxa	Lethaia	1	2023-12-13 (게재승인일)	국외	0

3. 학회 논문

No.	논문제목	학회명	저자순	게재연월	국내/국외	발표 유형
1	Periostracum in Cambrian helcionelloid and rostroconch molluscs: comparison to modern examples	Palaeo Down Under 3	1	2023-07-13	국외	Oral

4. 특허출원 · 등록

No.	특허명	출원일	등록일	국가명	등록번호	비고

5. 대내 · 외 수상

No.	수상명	수상등급	수여기관	수여일자

VIII. 국외출장 현황

No.	출장기간	출장자	국가	지역	출장목적	학회/행사명	발표제목	연구비 사용여부	
								참가비	여비
1	2023-07-07~ 2023-07-16	오영주	호주	퍼스	국제학회 발표 및 참석	Palaeo Down Under 3	Periostracum in Cambrian helcionelloid and rostroconch molluscs: comparison to modern examples	0	0
2	2023-07-17~ 2023-08-04	오영주	그린란드	Midso mmer Sø 일대	현장지질조사	-	-	X	X
3	2023-09-18~ 2023-10-21	오영주	스웨덴	웁살라	방문연구	-	-	X	X

IX. 전문가 교류내역

No.	전문가 정보			교류내용	교류일자	비고
	성명	소속	직위			
1	John S. Peel	Uppsala University	명예교수	북그린란드 미화석 연체동물 연구 논의	2023-09-18~ 2023-10-21	
2	Sebastian Willman	Uppsala University	교수	북그린란드 미화석 연구 논의	2023-09-18~ 2023-10-21	

X. 연구비 집행 현황

세 목	책정금액(A)	집행금액(B)	집행률(B/A)
학생인건비	2,000,000	2,000,000	100%
연구시설·장비비	0	0	-
연구재료비	7,000,000	6,859,826	98.0%
연구활동비	11,000,000	9,851,954	89.6%
합 계	20,000,000	18,711,780	93.6%

XI. 지도교수 의견

오영주 박사과정생은 사업을 수행하는 동안 주도적으로 계획을 수립하고, 적극적으로 연구를 수행하는 자세를 보였음. 한정된 자원을 효율적으로 활용하는 노력을 통해, 1년간의 비교적 짧은 사업이었음에도 북그린란드의 고생물학 연구 분야에 있어서 유의미한 연구 성과를 얻어냄. 이번 2022 UST Young Scientist+ 사업을 통해 실질적인 연구책임자로서 과제를 주도하며 미래 신진연구자로 성장하는데 도움이 되는 밑거름을 쌓았으리라 생각됨.