

완보동물의 진화 계통 규명을 위한 고생물학적  
비교연구

Phylogenetic elucidation of tardigrades through paleontological  
comparative research



한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “완보동물의 진화 계통 규명을 위한 고생물학적 비교연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 01. 24.

연구 책임자 : 박 태 윤

참여 연구원 : 김 지 훈

안 인 혜

The logo for KOPRI (Korea Polar Research Institute) features the acronym 'KOPRI' in a large, bold, blue font. Below it, the Korean name '극지연구소' is written in a similar blue font. The text is set against a background of a stylized globe with latitude and longitude lines, rendered in a light blue color.

보고서 초록

과제관리번호	PN17140	해당단계 연구기간	17.12.26~18.12.25	단계 구분	1 단계 / 1 단계
연구사업명	중 사업명	UST Young Scientist 양성사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	완보동물의 진화 계통 규명을 위한 고생물학적 비교연구			
	세부(단위)과제명				
연구책임자	1	해당단계 참여연구원수	총 : 3 명 내부 : 1 명 외부 : 2 명	해당단계 연구비	정부: 50,000 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지지구시스템 연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<p>○현생 완보동물의 형태 연구 수행</p> <p>○형태 연구를 위해 최적의 표본 제작 방법 연구</p> <p>○DIC (Differential Interference Contrast microscope, 미분간섭대비현미경), FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope, 전계방출형 주사전자현미경), 형광현미경, CLSM (Confocal Laser Scanning Microscope, 공초점 레이저 주사현미경), micro CT (micro Computed Tomography, 미세단층촬영기)의 사용법 체득 및 형태 데이터 획득</p> <p>○현생 완보동물과 형태 비교를 위하여 캄브리아기 엽족동물 형태 데이터 획득</p> <p>○중국 Xi'an Northwest University의 Liu Jianni 교수를 방문하여 Chengjiang Fauna의 엽족동물 10종 이미지 촬영 (<i>Cardiodictyon catenulum</i>, <i>Hallucigenia fortis</i>, <i>Jianshanopodia decora</i>, <i>Megadictyon haikouensis</i>, <i>Microdictyon sinicum</i>, <i>Miraluoshania haikouensis</i>, <i>Onychodictyon ferox</i>, <i>Onychodictyon gracilis</i>, <i>Paucipodia</i> sp., <i>Undet. lobopodia</i>) 및 엽족동물의 원시 형태 형질에 대한 토의 수행</p> <p>○극지연구소가 야외조사로 획득한 북그린란드 Sirius Passet 화석산지의 엽족동물화석 3종 (<i>Aysheaia</i> sp., <i>Pambdelurion whittingtoni</i>, <i>Kerygmachela kierkegaardii</i>)의 형태 데이터 획득</p> <p>○획득한 형태 데이터를 바탕으로 비교연구를 수행한 결과 중요 차이 형태 형질은 다음과 같았음: 입의 위치, 입 옆 돌기, 입 주변 환형 구조, 인두치, 인두, 문침구조, 다리, 몸통의 경화구조</p> <p>○비교 결과, 진완보강의 Milnesium속의 완보동물이 현생 완보동물 중 캄브리아기 엽족동물과 형태형질을 가장 많이 공유하였음. 따라서, Milnesium속이 가장 공통조상형질을 많이 보유했음</p> <p>○이는 이완보강의 Parastysgarctus속이 가장 원시적인 완보동물이라는 기존의 가설을 부정하는 것이며, 최근의 완보동물 내 분자계통진화 연구와도 맥락을 같이 하는 결과</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	완보동물, 엽족동물, 캄브리아기, 고생물학, 비교형태학, 계통진화, 진화			
	영 어	Tardigrade, Lobopodia, Cambrian, Palaeontology, Comparative morphology, Phylogeny, Evolution			

# 요 약 문

## I. 제 목

○ 완보동물 진화 계통 규명을 위한 고생물학적 비교연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 범절지동물군 (절지동물문, 유조동물문, 완보동물문 그리고 멸종한 엽족동물문)은 지구상에서 가장 번성한 주요 동물군으로 진화와 관련하여 여러 분야의 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 그 중 완보동물문의 경우 연구가 제대로 이루어지지 않아 범절지동물군 내부의 관계나 진화사를 이해하는데 한계가 존재

○ 완보동물과 그 조상인 캄브리아기 엽족동물과의 형태 비교를 통해 완보동물 내 원시 형태 형질이 어떤 것인지를 밝혀낼 수 있고, 이를 바탕으로 완보동물 내 계통진화에 대한 연구가 가능

○ 완보동물 내 계통진화연구로부터 범절지동물 내에서 완보동물의 위치, 다른 동물군과의 관계를 밝혀내어, 범절지동물군의 진화사를 밝혀낼 수 있음

## III. 연구개발의 내용 및 범위

○ 완보동물의 형태 데이터 수집을 위한 시료 채집 및 표본 제작 방법 연구

○ 다양한 장비를 이용한 완보동물의 형태 데이터 획득

○ 캄브리아기 엽족동물의 형태 데이터 획득

○ 완보동물과 캄브리아기 엽족동물의 형태 비교를 통한 완보동물 내 계통진화사 연구

## IV. 연구개발결과

○육상 및 해양환경에 서식하는 다양한 완보동물을 채집, 시료 제작

○DIC (Differential Interference Contrast microscope, 미분간섭대비현미경), FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope, 전계방출형 주사전자현미경), CLSM (Confocal Laser Scanning Microscope, 공초점 레이저 주사현미경), micro CT (micro Computed Tomography, 미세단층촬영기)의 사용법을 익히고 형태 데이터 획득

○중국 Chengjiang Fauna의 캄브리아기 엽족동물 10종 (*Cardiodictyon catenulum*, *Hallucigenia fortis*, *Jianshanopodia decora*, *Megadictyon haikouensis*, *Microdictyon sinicum*, *Miraluoshania haikouensis*, *Onychodictyon ferox*, *Onychodictyon gracilis*, *Paucipodia* sp., Undet. lobopodia)과 북그린란드 Sirius Passet 캄브리아기 엽족동물 3종 (*Aysheaia* sp., *Pambdelurion whittingtoni*, *Kerygmachela kierkegaardii*)의 형태 데이터 획득

○현생 완보동물과 캄브리아기 엽족동물의 형태 비교 연구 결과, 완보동물군 내 중요 차이 형태 형질에는 입의 위치, 입 옆 돌기, 입 주변 환형 구조, 인두치, 인두, 문침구조, 다리형태, 몸통의 경화구조 등이 있었음

○이를 통해 진완보강의 육상완보동물 *Milnesium*속이 캄브리아기 엽족동물과 형태형질을 가장 많이 공유하고 있는 것을 알 수 있었음

○따라서, 이완보강의 해양완보동물 *Parastygarcus*속이 가장 원시적인 형태를 보인다는 기존의 가설과는 달리, *Milnesium* 속이 공통조상형질을 가장 많이 보유하고 있음

## V. 연구개발결과의 활용계획

○형태 데이터 획득을 위해 사용한 여러 기법들을 적용하여 북그린란드와 동그린란드의 완보동물 연구

○완보동물 내 계통진화사 연구결과를 바탕으로 범절지동물군 내의 계통진화사 연구

# S U M M A R Y

## (영 문 요 약 문)

### I. Title

Phylogenetic elucidation of tardigrades through paleontological comparative research

### II. Purpose and Necessity of R&D

○Although Panarthropoda (Arthropoda, Onychophora, Tardigrada and extinct Lobopodia) is the most dominant group on the Earth and has been studied intensively, the origin of tardigrades remains unclear, which makes it difficult to understand the phylogenetic relationships among Panarthropod members.

○Comparative morphological study between tardigrades and Cambrian lobopodians elucidates the phylogenetic relationship within tardigrades through understanding plesiomorphic morphological characters shared with Cambrian lobopodians.

○Elucidating the phylogenetic relationship of tardigrades with other panarthropod groups, which will enable us to track the evolutionary history of panarthropods.

### III. Contents and Extent of R&D

○Collecting tardigrades and devising how to make specimens.

○Acquiring morphological data of tardigrades using various tools.

○Acquiring morphological data of Cambrian lobopodian fossils.

○Phylogenetic study within tardigrades based on the comparative morphological study between tardigrades and Cambrian lobopodians.

### IV. R&D Results

○Collecting tardigrades from various limno-terrestrial & marine environments, and making specimens.

○Learning how to use DIC (Differential Interference Contrast microscope), FE-SEM (Field-Emission Scanning Electron Microscope), CLSM (Confocal Laser Scanning Microscope), micro CT (Computed Tomography) and acquiring morphological data of tardigrades.

○Acquiring morphological data of Cambrian lobopodians from Chengjiang Fauna, China (*Cardiodictyon catenulum*, *Hallucigenia fortis*, *Jianshanopodia decora*, *Megadictyon haikouensis*, *Microdictyon sinicum*, *Miraluoshania haikouensis*, *Onychodictyon ferox*, *Onychodictyon gracilis*, *Paucipodia* sp., Undet. lobopodia) and from Sirius Passet, north Greenland (*Aysheaia* sp., *Pambdelurion whittingtoni*, *Kerygmachela kierkegaardii*).

○Revealing important different morphological characters within tardigrades, such as mouth position, peribuccal papillae, circum-oral structures, pharyngeal teeth, pharynx, stylet system, morphology of limbs, and sclerotized element of the trunk

○Discovery of the fact that genus *Milnesium* (Class Eutardigrada) is appeared to have the most shared morphological characters to Cambrian lobopodians

○Unlike the previous hypothesis that marine Arthrotardigrade genus *Parastygarctus* is the most primitive species among living tardigrades, the result suggests that *Milnesium* retains the most plesiomorphic characters.

## V. Application Plans of R&D Results

○Taxonomic and Systematic study of tardigrades from north and east Greenland using various tools

○Elucidating phylogenetic relationships within Panarthropods

# C O N T E N T S

## (영 문 목 차)

### Chapter 1 Introduction and Current R&D Status in Korea and Other Nations

1-1. Necessity of R&D .....	10
1-2. Purpose of R&D .....	10
1-3. Current R&D status in Korea and other countries .....	10

### Chapter 2 R&D Implementation Contents and Results

2-1. Results of morphological research on living tardigrades .....	15
2-2. Results of morphological research on Cambrian lobopodians .....	19
2-3. Results of phylogenetic research within tardigrades .....	20
2-4. Presentation achievement .....	21
2-5. Academic achievement .....	21

### Chapter 3 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute, Application Plans of R&D Results

3-1. Degree of R&D goal achievement .....	22
3-2. Degree of contribution to KOPRI .....	22
3-3. Application plans of R&D results .....	23

### Chapter 4 UST Student Empowerment Achievement

4-1. Research planning empowerment .....	24
4-2. Research management empowerment .....	24
4-3. Problem Resolving empowerment .....	25
4-4. Major knowledge empowerment .....	26
4-5. Expert network empowerment .....	26

### Chapter 5 Future Plans

5-1. Future application and development .....	29
5-2. Thesis progress .....	29
5-3. Follow-up research and career planning .....	29

# 목 차

제 1 장 연구개요	
1-1. 연구의 필요성 .....	10
1-2. 개요 .....	10
1-3. 국내외 연구동향 .....	10
제 2 장 연구수행내용 및 성과	
2-1. 현생 완보동물의 해부학적 형태에 대한 연구 .....	15
2-2. 캄브리아기 Chengjiang Fauna 엽족동물과의 형태 비교 연구 .....	19
2-3. 완보동물의 계통발생에 대한 연구 .....	20
2-4. 발표 성과 .....	21
2-5. 학문적 성과 .....	21
제 3 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	
3-1. 연구개발 목표 달성도 .....	22
3-2. 출연연 미션 기여도 .....	22
3-3. 예상 활용 분야 및 활용 방안 .....	23
제 4장 UST 학생 역량 강화 성과	
4-1. 연구기획 역량 .....	24
4-2. 연구수행·관리 역량 .....	24
4-3. 문제해결 역량 .....	25
4-4. 전공 기본지식 역량 .....	26
4-5. 전문가 네트워크 역량 .....	26
제 5 장 향후 계획	
5-1. 향후 활용, 발전 방향 .....	29
5-2. 학위 논문 진행 상황 .....	29
5-3. 후속연구 및 진로계획 .....	29

# UST Young Scientist 양성 사업 최종보고서

사업명	UST Young Scientist 양성 사업			과제번호	2017YS14
과제명	국문	완보동물 진화 계통 규명을 위한 고생물학적 비교연구			
	영문	Phylogenetic elucidation of tardigrades through paleontological comparative research			
주관기관	기관명	극지연구소			
UST 학생	성명	김지훈	학위과정	박사과정	연락처 (휴대폰) 010-5473-6266 (이메일) <a href="mailto:jhkihm@kopri.re.kr">jhkihm@kopri.re.kr</a>
지도교수 (연구책임자)	성명	박태운	직급	선임연구원	연락처 (휴대폰) 010-9775-0678 (이메일) <a href="mailto:typark@kopri.re.kr">typark@kopri.re.kr</a>
연구기간	2017. 12. 26. ~ 2018. 12. 25. (12개월)				
총연구비	50,000천원				

2017년 UST Young Scientist 양성 사업 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다. 보고서에는 사실과 다른 내용이 포함되지 아니하였으며, 만약 허위사실이나 중대한 오류가 발견될 경우에는 그에 상응하는 불이익을 감수할 것임을 서약합니다.

붙임: 최종보고서 1부.

2019년 1월 24일

UST 학생 : 김 지 훈  
 지도교수 : 박 태 운  
 주관연구기관장 : 윤 호 일



**과학기술연합대학원대학교 총장 귀하**

# 1. 연구개요

## 1.1. 연구의 필요성

- 범절지동물군은 현재 존재하는 130만여 종의 동물 중 중, 100만종 이상을 차지하고 있는, 지구상에서 가장 번성한 주요 동물군으로, 현재까지 이들의 진화와 관련하여 여러 분야의 연구가 활발히 이루어지고 있는 그룹임
- 현생 범절지동물군은 크게 절지동물문, 유조동물문, 그리고 완보동물문으로 이루어져 있는데, 이 중 절지동물문은 형태학적, 고생물학적, 분자생물학적 연구가 가장 많이 이루어진 동물군이며 최근에는 유조동물의 연구도 많이 수행되고 있음
- 하지만 완보동물의 경우, 우주생물학적으로 크게 주목을 받는 동물임에도 불구하고, 현재까지 형태학이나 고생물학적 연구 모두 제대로 이루어지고 있지 않고 있으며, 완보동물의 매우 작은 크기로 인하여 분자생물학적 연구도 미비한 실정하기에 완보동물의 진화적 기원 뿐만 아니라, 범절지동물군 소속 동물군 간의 관계나 진화사를 이해하는데 한계가 존재
- 따라서 완보동물의 진화적, 형태적 기원을 알아보기 위해서는 캄브리아기의 다양한 범절지동물 화석들과의 형태비교가 필요

## 1.2. 개요

- 현생 완보동물을 이루는 두 강(Class)인 진완보강(Class Eutardigrada)와 이완보강(Class Heterotardigrada)중, 어느 그룹이 더 원시적인 형태를 가지고 있는지는 제대로 규명되지 않음
- 최근 새로운 기술의 발달로 완보동물의 새로운 형태 데이터들이 보고되기 시작하였음
- 캄브리아기는 지구상에 최초로 동물이 등장한 시기이며 당시 초기 동물들은 짧은 기간 동안 폭발적으로 형태 진화를 이루었기에, 이 시기 범절지동물들에서 완보동물의 초기 형태가 등장했을 것이라고 기대할 수 있음
- 새로운 형태 데이터 및 최근 캄브리아기의 새로운 화석들의 발견으로 인하여, 캄브리아기의 범절지동물들과 완보동물의 형태적 비교 연구가 가능
- 중국 Chengjiang Biota는 캄브리아기 주요 3대 화석 산지 중 하나로, 부드러운 부분까지 남아 범절지동물의 일종인 캄브리아기 엽족동물의 형태 연구에 적합
- 따라서 SEM, DIC 현미경 등을 이용하여 현생 완보동물의 새로운 형태 데이터 획득하고 이를 Chengjiang Biota의 캄브리아기 엽족동물과 형태비교가 가능
- 이를 통해 현생 완보동물의 형태 기원을 추적할 수 있으며, 또한 완보동물의 초기 계통 진화를 밝힐 수 있음
- 또한 완보동물의 초기 계통 진화를 밝힐 수 있음

## 1.3. 국내외 연구동향

### 1.3.가 현생 완보동물의 해부학적 형태에 대한 연구

- 전통적으로 완보동물의 해부학적 형태에 대한 연구는 주로 광학현미경에 의존한 연구가 대부분이었고(Renaud-Mornant 1982 ; Kristensen & Higgins, 1984, 1989), 기초적인 TEM이나 SEM을 이용한 연구들도 있었음(Schuster et al. 1980 ; Eibye-Jacobsen 1997)
- 최근 들어 TEM이나 형광 항체를 이용한 in situ hybridization 기법을 이용한 신경 구조에 대한 연구가 활발히 진행 중임(Persson et al. 2012, 2014 ; Mayer et al. 2013 a,b ; Schulz & Schmidt-Rhaesa 2013 ; Schulz et al. 2014 ; Smith & Goldstein 2016)

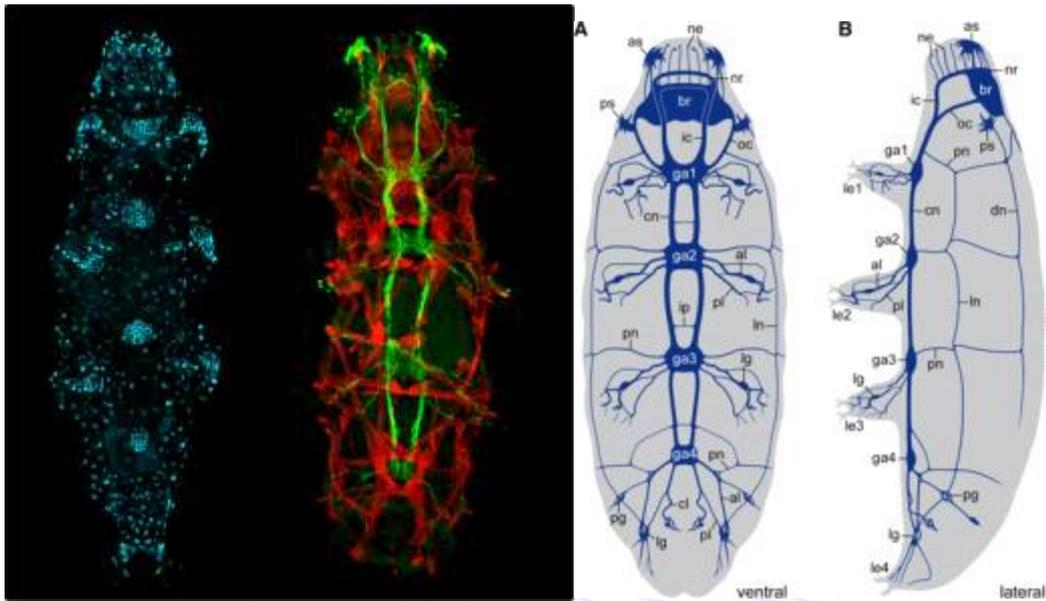


그림 1 완보동물의 신경구조에 대한 논문 (Mayer et al. 2013, *BMC Evol Biol*).

- 그 외에도 최근 몇 년간 SEM, CSLM(Confocal Scanning Laser Microscope) 등을 이용하여 근육 구조(Smith & Jockusch 2014 ; Marchioro et al. 2013), 구강-인두 구조(Dewel & Eibye-Jacobsen 2006 ; Guidetti et al. 2012, 2013 ; Hohberg & Lang, 2016), 발생단계의 배아 형태(Gross et al. 2015, 2017) 등이 보고되고 있음

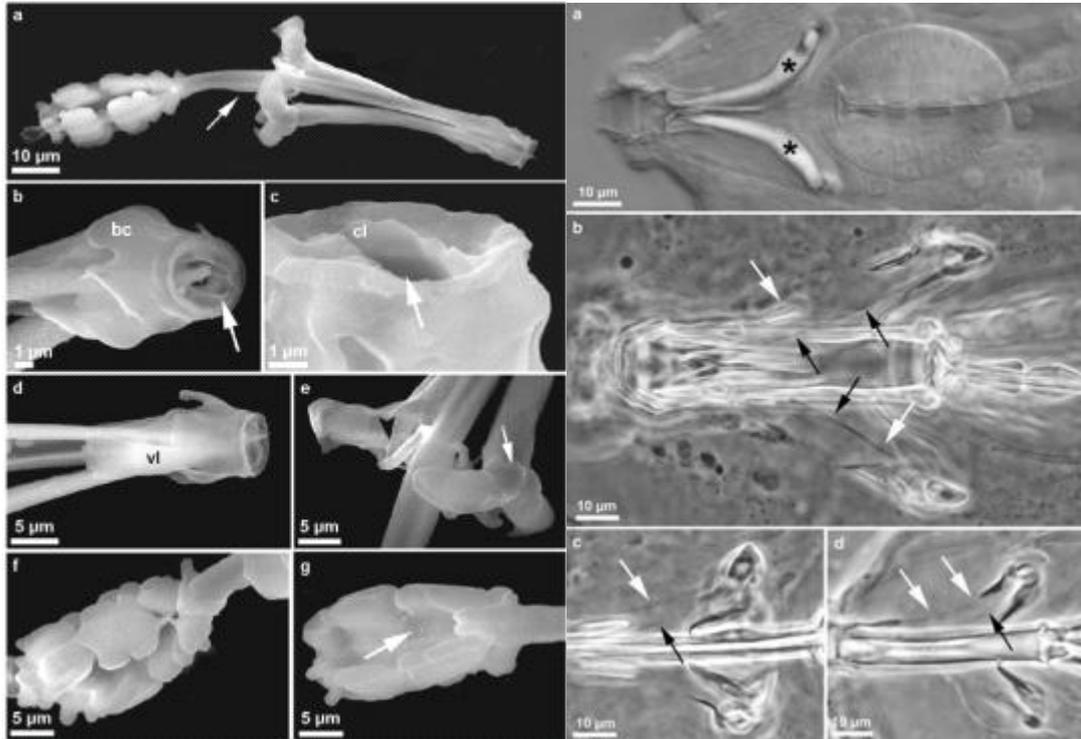


그림 2 완보동물의 구강-인두 구조의 SEM, DIC 현미경 이미지 (Guidetti et al. 2012, *Zoomorphol.*)

- 국내에서는 2010년 이후 논문으로는 Lee et al. 2017이 거의 유일할 정도로 완보동물에 대한 연구가 미진함

### 1.3.나 캄브리아기 Chengjiang Biota 엽족동물의 형태에 대한 연구

- 1984년 Chengjiang Biota 화석산지 발견 이후 현재까지 *Diania cactiformis* (Liu et al. 2011 Nature)를 비롯하여 13종의 엽족동물이 유수의 저널에 보고되었음

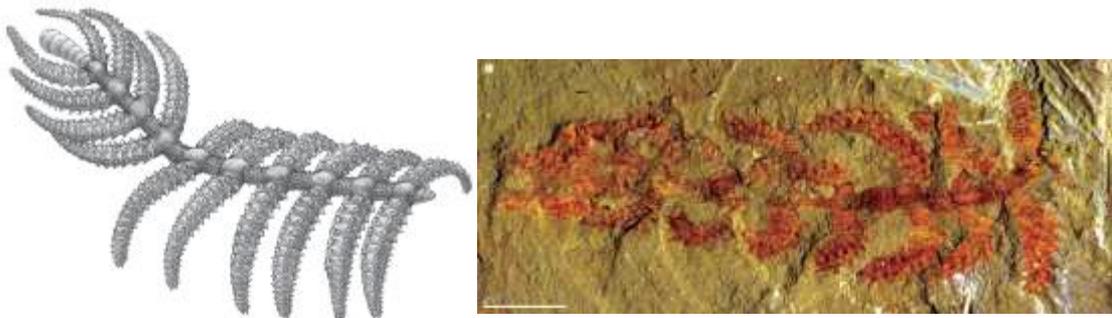


그림 3 Chengjiang Fauna에서 발견된 *Diania cactiformis* (Liu et al. 2011, *Nature*).

- 캄브리아기의 또 다른 Lagerstätte인 캐나다 Burgess Shale에서는 최근 엽족동물 *Hallucigenia sparsa*과, 완보동물의 가까운 친척인 현생 유조동물의 형태 비교에 대한 논문이 연속으로 Nature에 실림(Smith & Ortega-Hernandez 2014 ; Smith & Caron 2015)

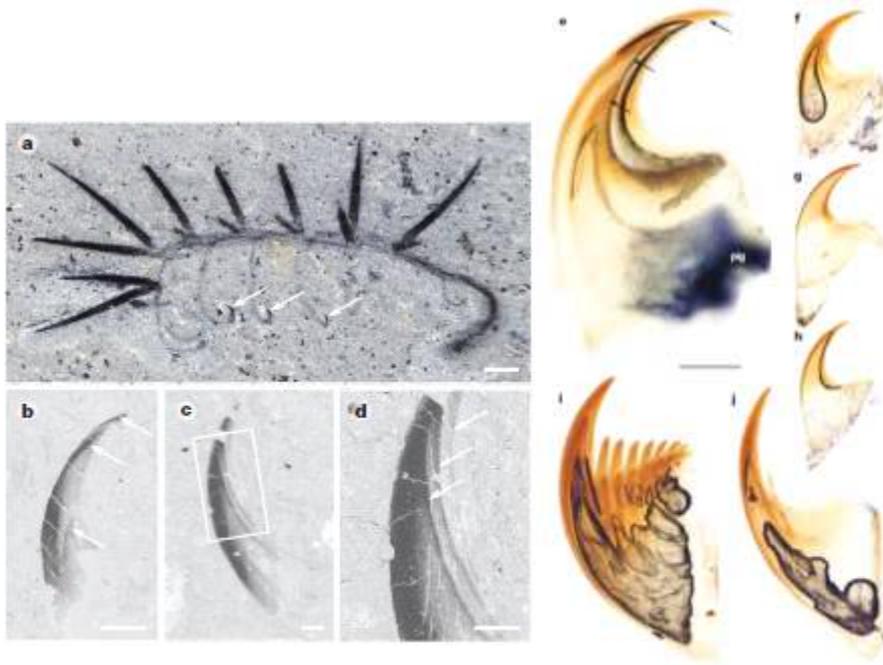


그림 4 캄브리아기 엽족동물 *Hallucigenia sparsa*와 현생 유조동물 *Euperipatoides kanangrensis*의 발톱 형태 비교 연구 (Smith & Ortega-Hernandez 2014, *Nature*).

- Chengjiang Biota에서 산출된 엽족동물인 *Onychodictyon ferox*도 발생단계의 현생 유조동물과의 형태비교 연구가 *Nature Communications* 보고됨 (Ou et al. 2012)
- 하지만, 현재까지 캄브리아기 엽족동물과 현생 완보동물과의 형태비교 연구는 없었음
- 국내에서는 최근 극지연구소에서 본 연구의 연구책임자 주도 하에 그린란드 Sirius Passet 화석산지에서 산출된 캄브리아기 화석을 바탕으로 범절지동물 진화에 대한 연구가 진행 중



그림 5 극지연구소의 2017년도 북그린란드 Sirius Passet 현장 캠프 전경 (좌)과 극지연구소에서 수장 중인 Sirius Passet 화석 사진 (우).

### 1.3.다 완보동물의 계통발생에 대한 연구

- 전통적인 완보동물 계통발생 연구는 해부학적 형태를 이용하여 추론(Pilato 1983 ; Grimaldi de Zio et al. 1987 ; Guidetti & Bertolani 2001)

- 최근 분자생물학적 기법의 발달로, 염기서열 데이터를 이용한 계통 발생 연구가 시도되고 있음 (Jorgensen et al. 2010, 2011 ; Guil & Gribet 2012, Bertolani et al. 2014, Fujimoto et al. 2016)

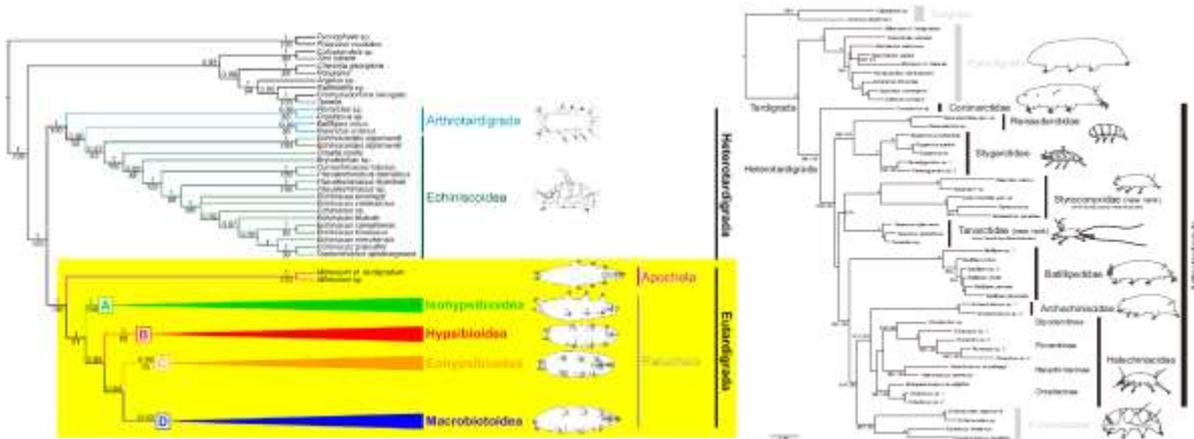


그림 6 18S + 28S rRNA 데이터를 이용한 완보동물의 계통 발생 연구. 좌: Bertolani et al. 2014, *Mol Phylogenet Evol.* 우: Fujimoto et al. 2016, *Zool Scr.*

- 하지만 현재까지 유전체 수준으로는 현생 완보동물 중 Parachela목만이 밝혀져 있으며(Boothby et al. 2015 ; Koutsovoulos et al. 2016 ; Arakawa et al. 2016) 다른 세목은 개체 숫자와 배양의 문제로 몇몇 유전자(주로 18S, 28S, col)만이 보고되었으며, 어떤 유전자를 사용하였느냐에 따라 완보동물의 계통발생에 대한 결론이 달라짐

### 1.3.라 연구 목표

- 현생 완보동물 내 두 강(Class)과 캄브리아기 엽족동물의 형태 비교 연구를 통해 완보동물의 형태 진화 양상과 완보동물 내 계통 진화를 규명

## 2. 연구수행내용 및 성과

### 2.1. 현생 완보동물의 해부학적 형태에 대한 연구

#### 2.1.가 SEM/fe-SEM을 이용한 형태 데이터 연구

- 남극 킹조지섬 세종기지 근처에서 채집한 완보동물 *Dactylobiotus* sp.의 몸체만 녹여내 입-인두기구 (Buccal-pharyngeal apparatus)를 확보하여 SEM/fe-SEM (Scanning Electron Microscope/Field Emission SEM)이미지 획득위한 표본 제작을 하였음
- 기존의 여러 논문들에서 제시된 표본 제작 방법 중 연구소 실험실 사정에 제일 잘 맞는 방법을 채택 (60°C 열충격으로 죽인 뒤 5% 포르말린에 고정, 에탄올 치환법을 이용하여 동결건조, 그 후 금코팅)

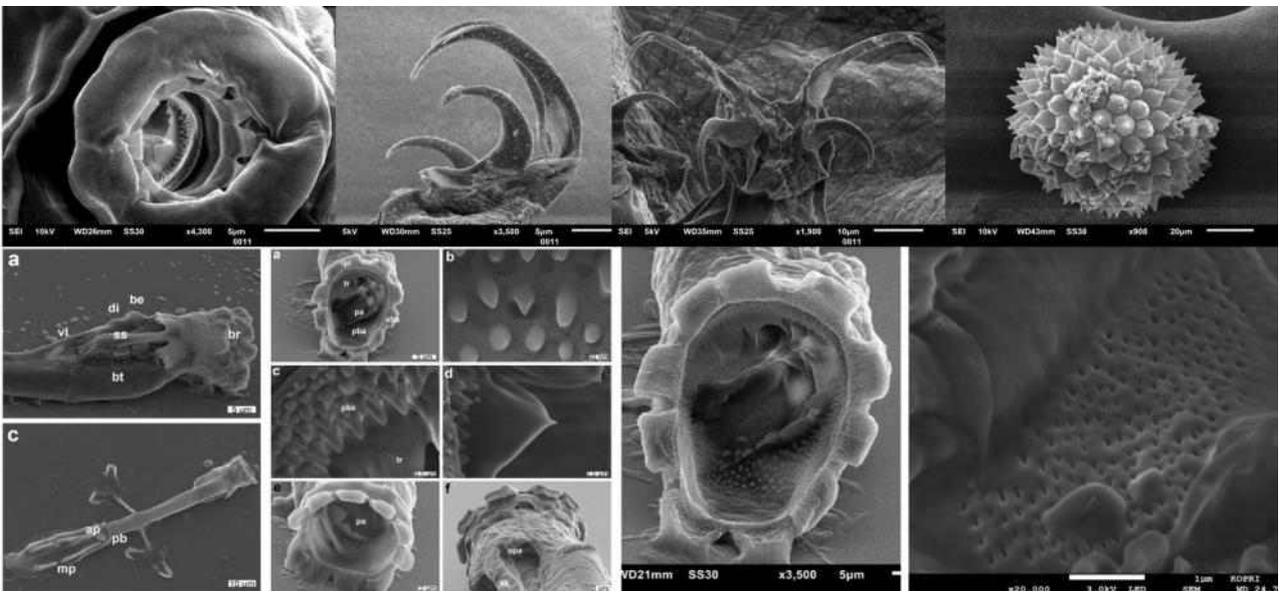


그림 7 SEM/fe-SEM을 이용한 완보동물의 입-인두기관, 발톱, 알의 이미지.

- 특히 입-인두기관의 뒤쪽에서 기존에는 알려지지 않았던 구멍이나 입 안쪽의 다공구조 등을 발견하였음
- *Dactylobiotus* 속에서는 처음으로 Anterior band of buccal armature (aba) 구조를 발견하였음
- fe-SEM을 통해 300 nm 정도 길이의 aba를 자세히 관찰하였으며, 갈고리 형태를 가지는 것으로 미루어보아 먹이를 입으로 잡고 고정하기에 적합한 구조라는 것을 유추할 수 있었음
- Transverse ridge 뒤 쪽의 다공 구조는 아마도 감각기관과 연관이 있을 것으로 생각됨

#### 2.1.나 DIC 현미경을 이용한 형태 데이터 연구

- 연구소의 현재 상황에 맞는 표본 제작 방법을 확립하였음 (60°C 열충격 후 5% 포르말린 처리 후 glycerol로 고정, 그 후 Hoyer's medium을 사용하여 HS slide 제작)

- 세종기지에서 채집한 *Dactylobiotus* sp. 와 그린란드에서 채집한 여러 종의 완보동물의 DIC 이미지 획득

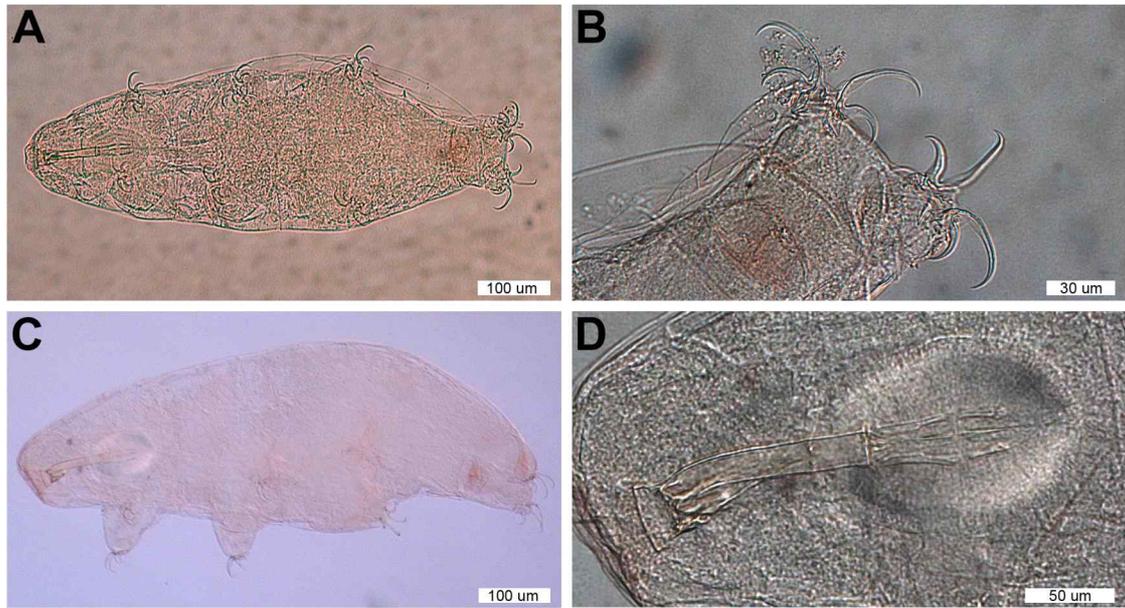


그림 8 DIC 현미경으로 얻은 완보동물 이미지.

- DIC 이미지를 이용하여 *Dactylobiotus* sp. 알의 여러 형태를 관찰할 수 있었음

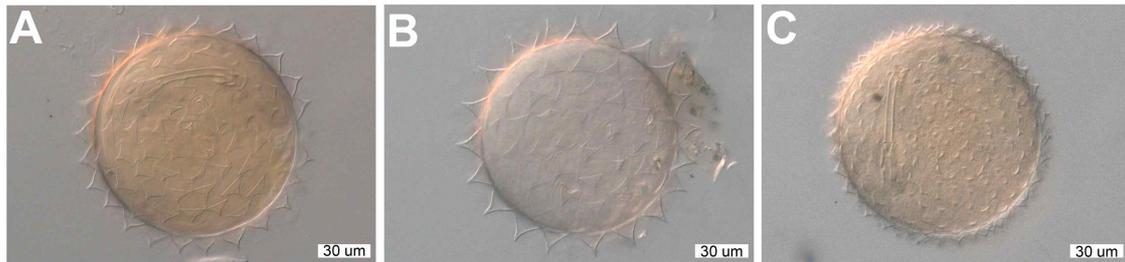


그림 9 DIC 현미경으로 얻은 완보동물 알 이미지.

### 2.1.다 형광현미경을 이용한 형태 데이터 연구

- 외형형광현미경기법 (Epifluorescence microscopy)를 이용하면 DIC 현미경에서는 관찰하기 힘든 완보동물 외피의 구조를 관찰할 수 있음
- 인천대학교 해양학과 이재성 교수님 실험실의 형광현미경을 이용하였음 (Nikon SMZ25)
- 현미경의 배율의 한계로 인해 자세한 구조 관찰이 불가능하였음

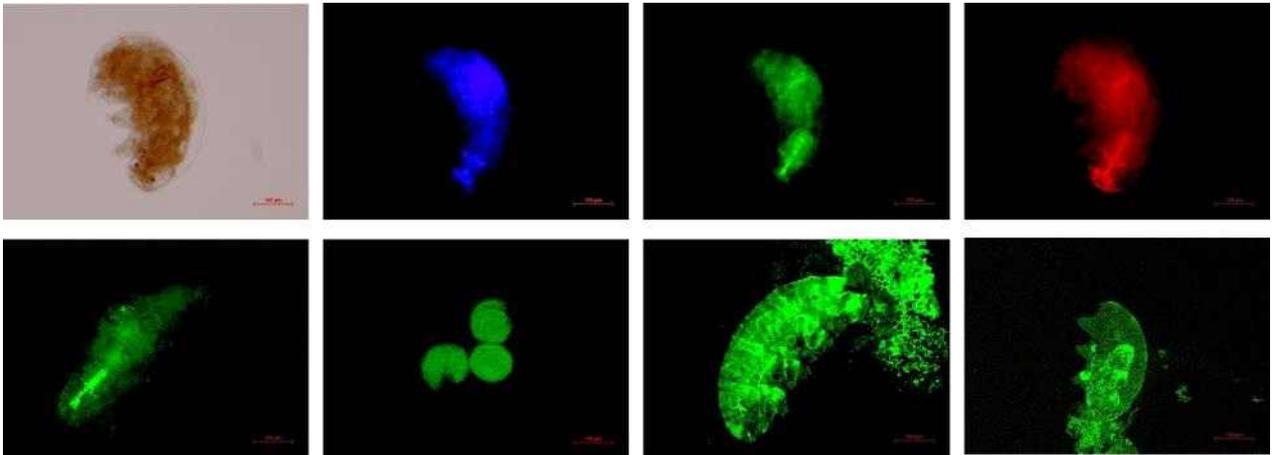


그림 10 외형광현미경법을 이용하여 촬영한 완보동물의 이미지.

### 2.1.라 해양 완보동물의 채집 및 형태 데이터 획득

- Tohoku University (일본)의 Fujimoto Shinta 교수를 방문하여 해양 완보동물의 채집 및 연구 방법 습득
- 시모키타 해변에서 Fujimoto 교수와 해양 완보동물 채집
- 이후 실험실에서 DIC 현미경용 시료 제작 및 관찰 수행
- 해양 이완보강의 입-인두기구 형태에 대한 공동 연구 수행하기로 함
- 완보동물 계통진화에서 중요한 위치에 있는 것으로 생각되어지는 *Coronarctus* 속의 완보동물을 채집하기 위해 Fujimoto 교수가 11월 심해 크루즈 야외 조사를 갔지만, *Coronarctus*를 채집하는데 실패함
- *Coronarctus* 속의 형태에 대해서는 기존 연구 참고하기로 함



그림 11 시모키타 해변에서 해양 완보동물 채집 장면 및 시료 제작하여 DIC 현미경으로 관찰한 해양 완보동물 이미지.

## 2.1.마 micro CT 촬영을 위한 시료 제작 최적 조건 조사

- 한국지질자원연구원에서 개발한 micro CT 이용
- 암석코어용으로 개발된 장비로 우리나라에서는 분해능이 제일 뛰어나
- 이 장비를 활용하기 위하여 안인혜 학생이 완보동물의 내부구조 이미지 획득을 위한 최적의 조건 탐색
- 여러 실험 결과 포르말린 고정 후 PTA를 (Phosphotungstic acid,  $H_3PW_{12}O_{40}$ ) 염색하는 방법 채택
- 이를 이용하여 시범적으로 환형동물 (갯지렁이)의 이미지를 획득
- 3차원 이미지 복원 시도 중

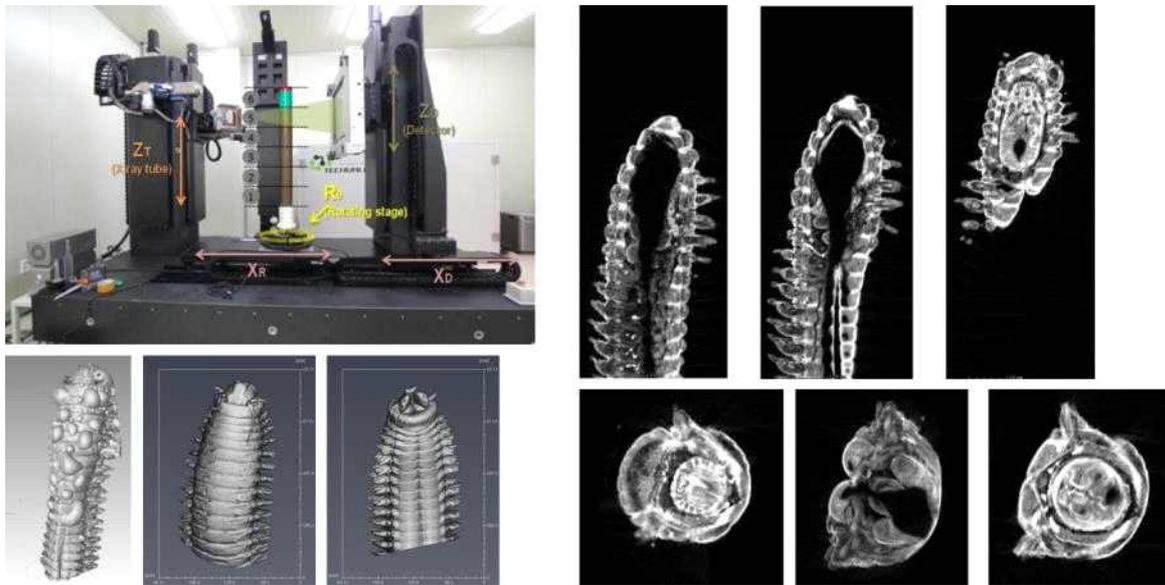


그림 12 KIGAM에 있는 micro CT 장비와 그 장비를 이용하여 촬영한 이미지 및 3D 복원 이미지.

## 2.1.바 아라온 북극 2항차 참여를 통한 해양 시료 획득

- Chukchi해와 동시베리아해 탐사 연구항차로 안인혜 학생이 참여
- 이 지역은 과거 얼어있던 바다로 최근 지구온난화 때문에 녹기 시작하여 배가 접근 가능해졌지만 아직 연구가 미진한 지역이어서 생물 연구에 적합
- 멀티코어와 드렛지를 이용하여 해저 무척추동물 채집
- 완보동물 채집에는 실패하였지만 안인혜 학생의 연구주제인 선형동물과 새예동물은 채집 성공하였음
- 현재 종 동정 및 형태 연구 중

그림 13 동시베리아해 해저에서 채집한 선형동물과 새예동물.



## 2.2. 캄브리아기 Chengjiang Fauna 엽족동물과의 형태 비교 연구

### 2.2.가 Chengjiang Fauna 엽족동물 이미지 획득

- 중국 Xi'an Northwest University의 Liu Jianni 교수와 엽족동물 공동 연구 수행
- 3월 26일 ~ 30일 극지연구소로 초청하여 공동 연구에 대해 논의 후 5월 8일부터 22일 까지 Northwest University에 방문하여 Chengjiang Fauna의 엽족동물 이미지 획득, 공동 연구 수행
- 총 10종의 이미지를 획득 하여 비교 연구를 수행
- *Cardiodictyon catenulum*, *Hallucigenia fortis*, *Jianshanopodia decora*, *Megadictyon haikouensis*, *Microdictyon sinicum*, *Miraluolishania haikouensis*, *Onychodictyon ferox*, *O. gracilis*, *Paucipodia*, *Unt. lobopodia*



그림 14 Northwest University에서 촬영한 Chengjiang Fauna의 엽족동물 이미지.

### 2.2.나 Sirius Passet 엽족동물 이미지 획득

- 극지연구소에 수장 중인 캄브리아기 엽족동물 화석 3 종의 이미지 획득
- *Aysheaia* sp. *Pambdelurion whittingtoni*, *Kerygmachela kierkegaardii*

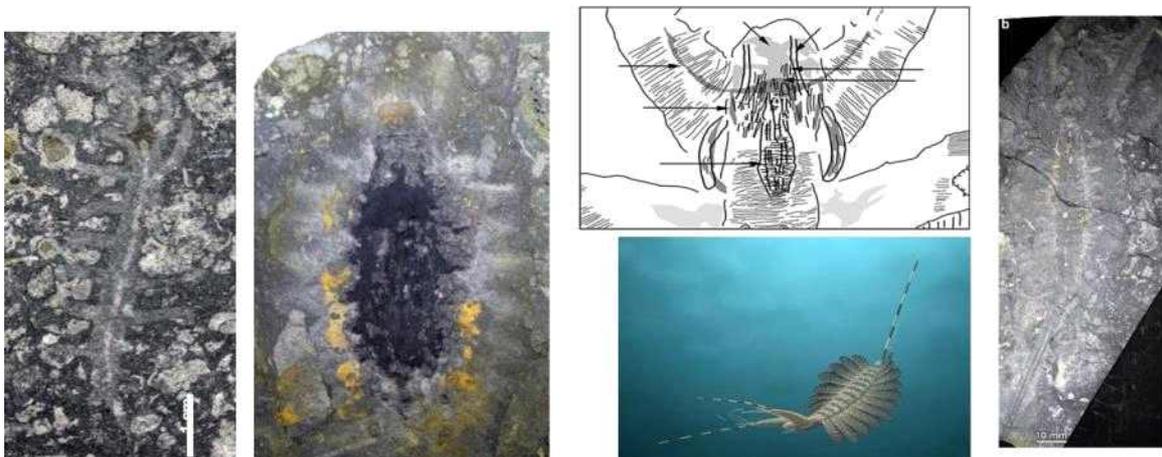


그림 15 그린란드 Sirius Passet에서 산출된 캄브리아기 엽족동물. 우측의 *Kerygmachela kierkegaardi* 사진은 Park et al. 2018, *Nat Comm*에서 가져옴.

## 2.2.다 완보동물과의 형태 비교

- mouth position, peribuccal papillae, circum-oral elements, pharyngeal teeth, granules on the buccal tube wall, elongated pharynx with the transverse striped muscle, stylet - rostral spine, limb morphology 등의 형태형질을 바탕으로 캄브리아기 엽족동물과 현생 완보동물의 형태를 비교함

## 2.2.라 화살벌레 채집 및 형태, 부패 연구

- 화석 형태 연구에서 중요한 것 중 하나가 어떻게 화석이 되는가에 대한 연구임. 생물은 죽자마자 화석이 되는 것이 아니라 부패가 진행되는 어느 시점에서 화석이 되는 것이기 때문에 화석 연구를 위해서는 대상 동물의 부패 과정에 대해 지식이 있어야 함
- 캄브리아기 엽족동물의 부패 과정에 대해서는 연구가 이루어진 바가 없어, 알아내기 위해서는 근연관계인 완보동물의 부패 과정 관찰이 필요. 하지만 완보동물의 부패 과정에 대한 연구도 전무함.
- 이를 위해 부패 양상에 대한 선행 연구를 조사하던 중 화살벌레의 부패 양상에 대한 연구를 보게 되어 그와 같은 반복실험을 수행해 보기로 함
- 화살벌레는 서해 영흥도 일대에서 2회, 남해 통영 일대에서 1회 야외 채집을 실시하였음
- 5% 포르말린에 고정하였으며 DIC 현미경, SEM 현미경, 광학현미경, micro CT를 이용하여 부패 단계마다 형태를 관찰하였음
- 부패가 이루어지며 내부는 불투명해져 내부 관찰은 불가능하여, 외부 관찰만 하였음



그림 16 시간에 따른 화살벌레의 부패 양상.

## 2.3. 완보동물의 계통발생에 대한 연구

- 형태를 이용한 완보동물 내 계통 발생 과정 연구
- 캄브리아기 엽족동물과의 공통형태형질을 바탕으로 진완보강의 *Milnesium*과 이완보강

의 *Parastygarctus*를 비교

- 그 결과 이전의 연구와는 다르게 *Parastygarctus*보다 *Milnesium*이 캄브리아기 엽족동물과 더 많은 형질을 공유하고 있었음
- 따라서, 현생 완보동물 중 *Parastygarctus*속이 가장 원시적이라는 주장을 틀렸다는 것을 밝혀내었음
- 최근 이완보강의 분자데이터를 이용한 계통발생 논문 중 기존의 이론과는 다르게 *Coronarctus* 속의 완보동물이 이완보강 내에서 가장 원시적이라고 주장하는 논문이 있었음. 이에 따라 *Coronarctus* 속과도 동일하게 형태비교를 진행하였지만, *Milnesium*이 *Coronarctus*에 비해 캄브리아기 엽족동물과의 공유 형질을 더 많이 보유하고 있었음

## 2.4. 발표 성과

- 이 결과를 코펜하겐에서 열린 14<sup>th</sup> International Symposium on Tardigrada 2018에서 구두발표하였음
- 무척추동물 계통진화의 최고 전문가인 Gregory Edgecombe (런던 자연사 박물관) 박사를 초청하여 발표를 하였음

## 2.5. 학문적 성과

- 캄브리아기 엽족동물의 형태 데이터 수집을 위해 1980년대부터 최근까지 Chengjiang Fauna와 Sirius Passet에서 산출된 엽족동물에 대한 논문을 조사
- 완보동물의 계통발생 연구를 위하여 진완보강과 이완보강의 형태, 분자 계통발생 논문들과 분류 논문들을 조사
- 논문들을 공부하면서 캄브리아기 엽족동물과 완보동물의 진화사와 범절지동물군 내 관계에 대한 개념을 잡을 수 있었음

### 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 3.1. 연구개발 목표 달성도

연구내용	성과 목표	가중치 (A)	달성률 (B)	달성도 (AxB)
현생 완보동물의 해부학적 형태에 대한 연구	SEM/fe-SEM을 이용한 형태 데이터 획득	0.1	100	10
	DIC 현미경을 이용한 형태 데이터 획득	0.1	100	10
	형광현미경을 이용한 형태 데이터 획득	0.1	75	7.5
	해양 완보동물의 채집 및 형태 데이터 획득	0.1	75	7.5
	micro CT 촬영을 위한 시료 제작 최적 조건 조사	0.1	100	10
캄브리아기 엽족동물과의 형태비교연구	Chengjiang Fauna 엽족동물 이미지 획득	0.1	100	10
	Sirius Passet 엽족동물 이미지 획득	0.1	75	7.5
	완보동물과의 형태 비교	0.1	75	7.5
완보동물 내 계통발생에 대한 연구	형태를 이용한 완보동물 내 계통 발생 과정 연구	0.2	80	16
합계				86%

- 대부분의 목표는 달성하였으나, 일부 목표에서 미진함을 보였음
- 형광현미경을 이용한 형태 데이터 획득 항목의 경우, 사용한 형광현미경의 최대 배율이 낮아 원하는 수준의 이미지 획득을 할 수 없었음
- 해양 완보동물의 채집 및 형태 데이터 획득 항목의 경우, Fujimoto 교수를 방문하여 채집하고 표본을 제작하는 법을 배워 관찰까지 하였지만, 실제 영흥도와 통영 해변에서 완보동물 채집에 실패하였음
- Sirius Passet 엽족동물 이미지 획득 항목의 경우, 시료 이미지 촬영을 다 하지 못하였음
- 완보동물과의 형태 비교 항목의 경우, Sirius Passet 시료 이미지를 다 확보하지 못하여 완수하지 못하였음
- 완보동물 내 계통발생과정 연구 항목의 경우, 해양 완보동물 채집 실패로 인해 분자 데이터 획득에 실패하여 분자 데이터는 제외하고 형태만을 이용한 완보동물 내 계통 발생 과정 연구로 변경하였음
- 형태를 이용한 완보동물 내 계통발생과정 연구 항목의 경우, Sirius Passet 엽족동물 형태 데이터를 다 얻지 못하여 완수하지는 못하였음

#### 3.2. 출연연 미션 기여도

- 극지연구소의 목표 중, 미답지 도전을 바탕으로 미래가치 창출, 극지연구 저변 확대가

있음. 이 과제는 연구가 미진한 북그린란드 Sirius Passet 지역의 화석과 현생 육상/해양 완보동물, 그리고 북극해 지역의 해양 완보동물 채집 및 연구를 통해 극지연구소 미션에 기여하였음

### 3.3. 예상 활용 분야 및 활용 방안

- 이 연구를 수행하면서, 우리나라에서는 거의 이루어지지 않고 있는 완보동물 연구에 대한 정보와 노하우를 습득할 수 있었음
  - 이 노하우를 바탕으로 완보동물의 발생학, 분자생물학적 연구 또는 동갑동물 등 다른 탈피동물군으로 연구를 확대해 나갈 수 있게 되었음
- 이번 연구를 통해 기존 논문에서는 다루지 않았던 Chengjiang Fauna 엽족동물들의 여러 구조들에 대한 정보를 얻을 수 있었음. 이는 후속 진화 연구에 도움이 될 것으로 사료됨
- 현생 완보동물과 캄브리아기 엽족동물의 형태 진화 비교 연구를 통해 고생물학과 형태학, 분자생물학의 시너지 효과 창출 가능



## 4. UST 학생 역량 강화 성과

### 4.1. 연구기획 역량

#### 4.1.가 기술동향 파악 및 연구 목표 설정

- 연구 목표를 설정하기 위해 지도교수님과의 토의를 거침
  - 토의를 통해 기존에 연구 중이던 남극 완보동물과 Sirius Passet 화석을 이용하여, 완보동물의 형태 진화 양상과 완보동물 내 계통진화에 대해 연구해 보기로 결정
- 연구에 대한 기술 동향 파악을 위해, 관련 논문을 검색하고 관련 연구자에게 메일을 보내 궁금한 점에 대해 조언을 구하거나 찾아가 해당 기술을 습득함
  - BAS (British Antarctic Survey, 영국)의 Sandra McInnes 박사에게 메일을 보내 남극 완보동물의 형태/분자 종 동정에 대한 조언 문의
  - Tohoku University (일본)의 Fujimoto Shinta 교수를 방문하여 해양 이완보강의 채집 및 시료 제작 습득
  - University of Modena and Reggio Emilia (이탈리아)의 Roberto Guidetti 박사에게 *Milnesium*의 granule structure on the buccal tube wall에 대해 문의, 사진을 구했으나 사진을 찾지 못하여 받지 못했음

#### 4.1.나 연구계획서 및 보고서 작성

- 지도교수님께 조언을 구하면서 연구계획서 및 보고서를 학생 스스로 작성하였음

### 4.2. 연구수행·관리 역량

#### 4.2.가 실험장비 관리, 운용 및 실험 수행

- 완보동물 배양 및 관찰에 관련된 장비는 극지연구소 김상희 박사님의 실험실에 구비된 배양기, 현미경, 시약 및 장비를 이용하였음
- 완보동물 배양에 관련, 극지생명부서의 김보미 박사와 상의하면서 조언을 구함. *Dactylobiotus* sp.의 먹이인 rotifer를 공급받았음
- 연구소 내에서 완보동물 시료 제작의 최적 조건을 찾기 위해 여러 논문들에서 제시한 조건들을 따라 제작함. 그 후 제작 시료들을 비교하며 최적의 조건 잡았음
  - 시료 제작용 동물을 죽일 때, 바로 고정액 사용과 열충격 후 사용 비교
  - 고정액으로 에탄올과 포르말린을 선정, 농도를 달리하며 시료를 제작하여 비교
  - DIC 현미경용 시료 제작 시 mounting media으로 polyvinly lactophenol, glycerine, Berlese's medium, Hoyer's medium, Fluorescence G를 사용한 후 비교
  - SEM용 시료 제작 시 에탄올 치환법, 에탄올/아세톤 치환법, 포르말린 사용 시료 비교
  - 입-인두기구 추출 시 NaClO 농도를 달리하며 몸을 녹이고 추출 후 입-인두기구에 충격이 없었는지 관찰하며 최적의 농도 탐색
  - 60°C에서 overnight으로 열충격, 5% 포르말린 고정, mounting medium으로 Hoyer's medium 선택, 에탄올 치환법 후 동결건조 선택
  - 3% NaClO 사용하여 30분간 녹인 후 입-인두구조 추출

- micro CT 촬영 위해 최적의 조건 탐색
  - 한국지질자원연구원의 진재화 박사님과 상의하며 시료 제작 및 촬영 조건을 잡음
  - 조건을 잡기 위한 연습 동물로 어느 정도 크기가 크면서 구하기 어렵지 않은 동물을 선정, 그 결과로 환형동물인 갯지렁이를 선택
  - 처음에는 바로 고정액에 넣었으나, 갯지렁이가 움직이면서 몸이 망가져 MS222 (Tricaine mesylate)으로 마취시킨 후 마취
  - 고정을 포르말린과 에탄올로 해 봄
  - 염색을 위해서 여러 염색약 중 PTA (Phosphotungstic acid), Iodine을 선택, 농도를 바꿔가며 최적의 염색 조건 택함
  - 이 중 Iodine은 농도를 변경하면서 염색을 해도 PTA만큼의 염색이 되질 않았음
  - 촬영을 위해 플라스틱 빨대에 넣고 움직이지 않게 빈 공간에 에폭시를 채워넣은 후 파라필름으로 밀봉. 하지만 시간이 지나면서 시약이 새어나왔음
  - 글루건을 이용시에는 빨대가 녹았음
  - 따라서 에폭시나 글루건을 이용하지 않고 scanning medium으로 에탄올을 가득채우고 좁은 빨대를 사용하여 꼭 끼어 움직이지 않게 만들었음
  - 노출 시간, 촬영 이미지 숫자를 변경해가면서 조건을 잡음
  - 현재 촬영 micro CT이미지로 3D 복원 시도 중

#### 4.2.나 일정 관리

- Chengjiang Fauna의 화석 이미지 촬영을 위해 중국 Xi'an Northwest University에 방문
  - 처음 10일을 계획하고 방문하였으나, 막상 촬영을 해보니 계획보다 진행속도가 더뎠음
  - 때문에 Liu Jianni 교수님께 양해를 구하고 5일 연장해서 더 머물며 Chengjiang Fauna의 화석 이미지 촬영을 수행함

#### 4.2.다 연구비 집행

- 처음 기획하였던 POLAR 2018학회 참가를 다른 사업에서 지원받게 되었으며, 일정 상 아라온 북극연구향해 참가 변경이 발생하였음. 때문에 연구비 집행 계획이 처음과 달라짐
- 때문에 연구 계획 변경 신청을 통해 연구활동비를 연구과제추진비 및 연구장비/재료비로 비목 변경을 하였으나, 예측을 잘못하여 연구활동비 예산이 많이 남게 되었음

### 4.3. 문제해결 역량

#### ○ 어려웠던 점과 시도한 해결 방법, 결과

- 해양 이완보강의 데이터 획득
  - 해양 이완보강은 육상 진완보강과 달리 서식지에서의 밀도가 낮고 채집하기가 상대적으로 까다로워, 논문만 찾아보고 채집 시도 하였지만 실패하였음
  - 때문에 해양 이완보강의 전문가인 Tohoku University의 Fujimoto Shinta교수님에게 연락하여 일정을 잡고 방문, 채집 및 시료 제작 방법을 배웠음
  - 하지만, 국내로 돌아와서 영흥도와 통영 일대 해변에서 3 회 채집 시도하였지만 모두 실패하였음
  - Fujimoto 교수님께 조언을 구했지만, 한 해변에서도 깊이와 위치를 바꿔가며 최대한 많이 시도를 해보는 수밖에 없다고 함

- 최근 원시적으로 생각되어지는 *Coronarctus* 속은 심해저나 해저동굴에서만 서식하는 완보동물로, 현실적으로 채집하기 힘들어 Fujimoto 교수님께 부탁을 하였음. Fujimoto 교수님이 11월에 크루즈 연구 항해를 갔는데, 해양 이완보강 완보동물 채집에 실패하였음
- 때문에 완보동물 내 계통 발생 진화 연구에서 분자 데이터 이용 항목을 제하게 되었음
- 아래온 2항차를 이용한 북극항해에서 망간 단괴 채집을 시도하였음. 해저 망간 단괴에서만 서식하는 완보동물도 있어 채집 망간 단괴에서 해양 이완보강 추출 시도. 하지만 북극해의 망간 단괴는 갈라파고스 - 페루 사이의 남태평양에서 채집된 망간단괴와는 달리 그 크기가 너무 작고 표면이 매끈매끈하여 크레바스가 존재하지 않음. 때문에 완보동물이 살아갈 수 있는 퇴적물이 쌓이지 못해 완보동물 서식이 불가능

## 4.4. 전공 기본지식 역량

### 4.4.가 분류에 대한 공부

- 완보동물 내 계통 발생에 대한 연구를 위해서는 완보동물 전체의 기본 형태 뿐만 아니라 각 완보동물군 별 형태에 대해서도 이해를 하고 있어야 함
  - 때문에 완보동물의 형태에 대한 지식을 습득하기 위해서 각 분류군 별로 논문을 검색, 각 과 (family), 속 (genus) 별로 논문을 읽어보며 형태를 정리하였음
- 또한 분자 데이터를 이용한 분류 연구에 대해서도 이해를 하고 있어야 하기 때문에, Cladistics: the theory & practice of parsimony analysis 책 (Oxford University Press)을 기본으로 하고 Phylogenetic trees made easy: A how-to manual (Oxford University Press) 책으로 염기 서열을 이용한 계통 발생 그리는 법에 대해 공부하였음

### 4.4.나 엽족동물 분류에 대한 공부

- 캄브리아기 엽족동물에 대한 진화 형태양상을 이해하기 위하여 각 화석산지 별, 화석생물군 별로 나누어 엽족동물보다 큰 범주인 탈피동물군 (Ecdysozoa) 수준에서 각 동물군 별로 형태를 조사, 정리하였음

## 4.5. 전문가 네트워크 역량

### 4.5.가 고생물학자들과의 교류

- Sirius Passet 연구 고생물학자들과의 교류
  - 극지연구소와 공동으로 Sirius Passet을 연구하는 Jakob Vinther (University of Bristol), Arne Nielsen / Morten Nielsen (University of Copenhagen)이 연구소에 방문하였을 때, 본 연구에 대해 세미나 발표 수행 및 토의
  - 상기의 전문가들과 함께 북그린란드 Sirius Passet에서 2주간 캠핑을 하면서 화석 탐사와 완보동물 채집 야외 조사 수행
- Gregory Edgecombe 박사님과의 토의
  - 무척추동물 진화 및 계통 발생 분야 최고 전문가이자 a fellow of the Royal Society이신 Natural History Museum, London의 Gregory Edgecombe 박사님을 이 과제로 초청하였으며, 본 연구에 대해 세미나 발표 수행 및 토의, 조언을 구함

- Liu Gianni 교수님과의 공동 연구
  - Xi' an의 Northwest University의 Liu Gianni 교수님과 완보동물과 Chengjiang Fauna의 엽족동물 간의 형태비교연구 수행.
  - 이를 위해 3월 Liu 박사님을 한국으로 초청하였으며, 5월엔 Northwest University를 방문하여 보름 간 엽족동물 화석 연구 수행 및 토론했음
  - 공동 연구를 수행하면서 메일을 통해 계속 의견을 주고 받음
- Fu dongjing 교수님과의 토의
  - Xi' an의 Northwest University의 Fu Dongjing 교수님이 방한하였을 때 본 연구에 대해 세미나 발표 수행 및 토의
- Northwest University에서 세미나 발표
  - Northwest University에 방문하였을 때, Liu Gianni 교수님의 대학원 세미나 강의에서 세미나 발표 수행, 학생들에게 완보동물 및 본 연구에 대해 소개

#### 4.5.나 완보동물 연구자들과의 교류

- Tohoku University의 Fujimoto Shinta 교수님과의 공동 연구
  - 6월 Tohoku University를 방문하여 Fujimoto 교수님께 해양 이완보강 완보동물의 채집 및 시료 제작 방법 습득
  - 본 연구와 관련하여, 해양 이완보강인 *Coronarctus* 속의 입-인두기관의 형태에 대한 공동 연구를 진행함
  - 엽족동물과 공유하는 완보동물의 형태형질에 대해 논의
  - 11월 Fujimoto 교수님이 *Coronarctus* 속의 채집을 위해 연구 항해에 참가하였으나, *Coronarctus* 속을 채집하는 데 실패함
  - 때문에, 기존 보고된 논문들을 토대로 입-인두기관에 대해 논의 중
- University of Modena & Reggio Emilia (이탈리아)의 Roberto Guidetti 교수님께 자료 요청
  - 캐나다 Burgess Shale에서 산출된 *Hallucigenia sparsa*의 foregut에 존재하는 acicular teeth가 현생 완보동물 *Milnesium* cf. *M. tardigradum*의 buccal tube에 탈피 시 나타나는 Granules on the buccal tube wall이 유사하다고 판단되어, 해당 구조를 보고한 논문의 저자인 Guidetti 교수님을 학회에서 만나 문의
  - 해당 논문에서 교수님은 그 구조에 대해 단순 언급만 하고 지나쳐 기억을 못함. 때문에 학회 후 해당 구조에 대한 다른 사진이 있는지 요청
  - 하지만, 교수님이 해당 구조에 대한 다른 사진을 찾지 못하여 후속 연구를 진행하지 못하였음
- NIPR Tsujimoto 박사님과의 교류
  - NIPR (National Institute of Polar Research, 일본 극지연구소)의 Tsujimoto 박사님과 스위스 POLAR 2018 학회와 덴마크 완보동물 학회에서 만나 남극 완보동물의 배양 시스템에 대하여 토의
  - Tsujimoto 박사님께 문의하여 NIPR에서 배양 중인 남극종 *Acutuncus antarcticus*를 분양받아 연구소 실험실에서 배양 중

#### 4.5.다 학회 참가

- Polar Symposium 참가

- 대한민국 극지연구소에서 열린 국제학회로 완보동물에 대한 포스터 발표
- POLAR 2018 참가
  - 스위스 다보스에서 열린 극지방 관련 연구 학회로 그 곳에서 완보동물에 대한 포스터 발표 및 완보동물 연구자들과 토의
- 14<sup>th</sup> International Symposium on Tardigrada 참가
  - 덴마크 코펜하겐에서 열린 완보동물 관련 학회로 본 연구에 대한 구두발표와 완보동물에 대한 포스터 발표, 완보동물 연구자들과 토의
- 한국우주생명과학연구회 참가
  - 대한민국 전주에서 열린 국내학회로 참가하여 우주생물학 관련 완보동물 연구 발표



## 5. 향후 계획

### 5.1 향후 활용, 발전 방향

#### 5.1.가 완보동물의 형태에 대한 연구

- 본 연구를 통해 입-인두구조 시료 제작에 대한 경험 축적. 향후 fe-SEM을 이용하여 기존의 연구들보다 더 자세한 관찰 계획. 이를 그린란드 완보동물의 분류 연구에 활용할 예정
- micro CT를 활용해 본 경험을 바탕으로 완보동물의 내/외부 구조 해석에 micro CT를 적용

#### 5.1.나 캄브리아기 엽족동물에 대한 연구

- Chengjiang Fauna와 Sirius Passet에서 얻은 형태 데이터와 전문가 네트워크를 활용하여 앞으로 계속 엽족동물 연구를 진행하려 함
- 특히 Chengjiang Fauna의 경우 복원 연구가 시간이 많이 흐른 경우가 많아 그동안 쌓인 데이터와 지식을 바탕으로 재해석이 필요한 화석종이 존재. 이런 화석종들의 재복원을 시도해 보려함

#### 5.1.다 완보동물의 계통 발생에 대한 연구

- 본 연구를 시도하면서 얻은 경험과 시행착오를 바탕으로 완보동물의 계통 발생을 시도해 보려함. 특히, 완보동물의 각 과 (family) 수준에서 모든 과를 적당한 캄브리아기 엽족동물 outgroup을 이용하여 계통발생도를 그려 보려함
- 완보동물 각 과 중 가장 원시적인 과를 알게 되면, 이를 이용하여 캄브리아기 엽족동물을 포함한 범절지동물군 계통발생도에서 완보동물이 어디에 위치하는지 연구를 해보려 함

### 5.2. 학위논문 진행 사항

- 학위 논문의 경우 현재 학위 논문을 위한 선행 연구를 수행 중임

### 5.3. 후속연구 및 진로계획

#### 5.3.가 완보동물의 진화에 대한 연구

- 완보동물 내 발톱 형태의 진화사에 대한 연구
- 완보동물의 부패 양상에 대한 연구
- 완보동물 발생 중 유전자 발현 양상에 대한 연구

#### 5.3.나 완보동물의 다양성에 대한 연구

- 북그린란드 Sirius Passet의 다양한 환경에서 서식하는 완보동물의 채집 및 분류 연구
- 우리나라의 각 환경에서 서식하는 완보동물의 분류 연구
- 남극 북빅토리아랜드 장보고 기지 및 킹조지섬 세종 기지 인근에서 서식하는 완보동물의 분류 연구

### 5.3.다 탈피동물에 대한 연구

- 탈피동물들의 입 구조에 대한 연구를 통해 탈피동물군 내에서 입 구조가 어떻게 진화해 왔는지, 그를 통해 동물군 간 어떤 관계를 가지고 있는지 연구
- 캄브리아기 엽족동물의 재복원 연구를 통해 캄브리아기 엽족동물군 내의 진화가 어떻게 이루어졌는지 계통발생도 그리고, 나아가 범절지동물군 내의 진화사 추적
- 연구가 미진한 Loricifera에 대해 형태 및 분자 데이터를 이용한 분류, 진화 연구

### ※ 학위논문 진행사항

Coursework 집중	논문방향 탐색	논문방향 설정	논문주제 탐색	논문주제 설정	선행연구 진행	학위논문 진행	학위논문 완료
					0		

※ 해당사항에 '0' 표시



# 연구계획 변경 이력



## 연구계획변경 신청서

발 의 부 서	신청자	연구자
	권현정 <i>kwon</i>	박태윤 <i>park</i>

관 리 부 서	담당	팀장
	장경국 <i>jang</i>	김원준 <i>kim</i>

발의번호	발의일자	부서	신청자
2018-T200-03220	2018-11-05	극지지구시스템연구부	권현정

계정번호	N17140	연구기간	2017. 12. 26 ~ 2018. 12. 25		
과제명	완보동물의 진화 계통 규명을 위한 고생물학적 비교연구				
연구비	50,000,000	계정책임자	박태윤	사업구분	극지연구소
발주처	과학기술연합대학원대학교				
변경사유	연구활동비 감액)당초계획된 국외출장(Polar2018) 취소로 인한 잔액분 감액, 연구과제추진비 증액)완보동물채집을 위한 국내출장비 증액, 연구장비및재료비 증액)완보동물 채집시 미끼등 관련 용품 구입을 위한 증액				

위 과제의 참여연구원 및 실행예산을 다음과 같이 변경하고자 하오니 조치하여 주시기 바랍니다.

비목	당초예산	실행예산	변경예산	원인행위	집행예산	변경 후 실행예산
내부인건비	0	0	0	0	0	0
외부인건비	12,000,000	12,000,000	0	0	0	12,000,000
연구수당	0	0	0	0	0	0
연구장비및재료비	8,000,000	8,000,000	50,000	0	0	8,050,000
연구활동비	23,500,000	23,500,000	-600,000	0	0	22,900,000
회의비	1,500,000	1,500,000	0	0	0	1,500,000
연구과제추진비	2,000,000	2,000,000	550,000	0	0	2,550,000
기관공동지원경비	0	0	0	0	0	0
연구개발준비금	0	0	0	0	0	0
연구실안전관리비	0	0	0	0	0	0
과학문화활동비(책임)	0	0	0	0	0	0
과학문화활동비(홍보)	0	0	0	0	0	0
인력지원비	3,000,000	3,000,000	0	0	0	3,000,000
지식재산권출원등록비	0	0	0	0	0	0
연구개발능력성과급	0	0	0	0	0	0

[별첨2]

## 주요 수행실적 현황

수행실적 현황(요약)

학술지 논문	학회 논문	특허 출원	특허 등록	대내외 수상
	3			

※ 본 사업 수행 관련 실적 건수를 각 항목에 기재(UST 학생 실적 기준)

※ 논문/특허는 사사표기하여 Accepted 또는 Published 된 실적만 기입

학술지 논문

No.	논문제목	학술지명	저자순	게재연월	국내 /국외	SCI 여부
1						
2						

※ 관련 증빙자료(Abstract) 첨부

학회 논문

No.	논문제목	학회명	저자순	게재연월	국내 /국외	발표 유형
1	Comparative morphological study between tardigrades and Cambrian lobopodians	14 <sup>th</sup> International Symposium on Tardigrada	1/4	2018.07	국외	Oral
2	A new species of <i>Dactylobiotus</i> (Parachela, Eutardigrada) from King George Island, Antarctica	14 <sup>th</sup> International Symposium on Tardigrada	1/3	2018.07	국외	Poster
3	Tardigrades from King George Island, Antarctica: Taxonomy of sp.	POLAR 2018	1/3	2018.06	국외	Poster

※ 발표유형 항목은 Oral 또는 Poster로 작성

※ 관련 증빙자료(Abstract) 첨부

특허 출원 · 등록

No.	특허명칭	출원일	등록일	국명	등록번호	비고
1						
2						

※ 관련 증빙자료(Abstract) 첨부

대내외 수상

No.	수상명	수상등급	수여기관	수여일자	비고
1					
2					

※ 관련 증빙자료(표창장 등) 첨부



[별첨3]

## 국외출장 현황

No.	출장기간	출장자	국가	지역	출장목적	학회/행사명	논문명/ 포스터 제목	사업비 활용 여부	
								등록비	여비
1	2018.05.08.~ 2018.05.22..	김지훈	중국	시안	데이터 획득 및 공동연구				○
2	2018.06.04.~ 2018.06.08.	김지훈	일본	아오모 리	기술 습득 및 공동 연구				○
3	2018.06.18.~ 2018.06.25.	김지훈	스위스	다보스	학회 참석	POLAR 2018	Tardigrades from King George Island, Antarctica: Taxonomy of <i>Dactylobiotus</i> sp.	○	일부
4	2018.08.25.~ 2018.09.23.	안인혜	미국	동시베 리아해/ 척치해	현장조사	아래온 북극 연구 2항차			○

[별첨4]

## 전문가 교류 내역

No.	전문가 정보			교류내용	교류일자	비고
	성명	소속	직위			
1	Arne T. Nielsen	University of Copenhagen	Associate Professor	캠브리아기 엽족동물과 완보동물의 형태 비교	2018.01.23	
2	Arne T. Nielsen	University of Copenhagen	Associate Professor	캠브리아기 엽족동물 화석 채취	2018.07.13.~ 2018.07.21	
3	Jakob Vinther	University of Bristol	Senior Lecturer	캠브리아기 엽족동물과 완보동물의 형태 비교	2018.01.23	
4	Jakob Vinther	University of Bristol	Senior Lecturer	캠브리아기 엽족동물 화석 채취	2018.07.13.~ 2018.07.21	
5	Gregory Edgecombe	Natural History Museum	Merit Researcher	캠브리아기 엽족동물과 완보동물의 형태 비교	2018.12.13.~ 2018.12.19	
6	Fu Dongjing	Northwest University	Associate Professor	캠브리아기 엽족동물과 완보동물의 형태 비교	2018.12.18.~ 2018.12.25	
7	Liu Jianni	Northwest University	Professor	본 연구의 공동연구에 대한 논의	2018.03.27~ 2018.03.29	
8	Liu Jianni	Northwest University	Professor	Chengjiang Fauna 엽족동물의 형태 연구	2018.05.08.~ 2018.05.22	
9	Liu Jianni	Northwest University	Professor	14 <sup>th</sup> International Symposium on Tardigrada oral presentaion 관련 논의	2018.05.28.~ 2018.08.20	
10	Fujimoto Shinta	Tohoku University	Assistant Professor	해양 이완보강의 형태 및 연구방법에 대한 조언	2018.06.04.~ 2018.06.08	
11	Roberto Guidetti	University of Modena & Reggio Emilia	Associate Professor	<i>Milnesium</i> 의 buccal tube에 존재하는 특이 구조에 대한 문의 / 남극 완보동물 연구에 대한 논의	2018.07.29.~ 2018.08.03	
12	Sandra McInnes	British Antarctic Survey	REDS Manager	남극 완보동물 형태 분류에 대한 논의	2018.07.29.~ 2018.08.03	
13	Tsujimoto Megumu	National Institute of Polar Research	Post Doc	남극 완보동물의 실험실 내 배양 및 분양에 대한 논의	2018.07.29.~ 2018.08.03	

[별첨5]

## 지도교수 의견서

<b>과제명</b>	완보동물 진화 계통 규명을 위한 고생물학적 비교연구	<b>학생 성명</b>	김지훈
------------	---------------------------------	--------------	-----

구 분	매우 우수	우수	보통	미흡	매우 미흡
연구수행의 충실도	V				
연구결과의 성취도			V		
학생의 주도적 역할 정도	V				
전공 기본지식 및 연구동향 이해도	V				
창의성 및 문제해결 역량 향상 정도		V			
학생 진로계획과 연계성	V				
연구윤리 준수	V				

\* 해당 란에 체크

### 종합의견

김지훈 학생은 우리나라에서 유일하게 현생동물과 화석동물을 비교하는 연구를 수행 중이다. 현생완보동물과 캄브리아기 엽족동물 화석 데이터를 비교하여 완보동물의 초기 진화를 밝히는 것은 세계적으로 큰 임팩트가 있을 것으로 기대되는 연구 주제인데, 1년간의 UST Young Scientist 양성사업을 통해서 해당 연구에 있어서 큰 성취를 이루었다. 특히, 캄브리아기 완보동물은 초기 절지동물 진화에 있어서 중요한 역할을 하는데, 김지훈 학생은 고생물학 최초로 본격적인 현생 완보동물과의 비교연구를 수행하기에, 세계적으로 주목을 받고 있다. YS양성사업을 통해 극지연구소를 방문했던 세계 최고의 절지동물 연구자인 Gregory Edgecombe 역시 현 연구 방법을 높이 평가한 바 있으며, 중국의 시안의 서북대학 교수인 Fu Dongjing은 새로운 캄브리아기 엽족동물 화석과 완보동물과의 형태비교 연구 조언을 구하기 위해 극지연구소 방문하기까지 하였다. 결과적으로 김지훈 학생은 해당 사업을 성공적으로 이끌었으며, 추후 높은 수준의 저널에 해당 연구주제 관련 논문이 게재될 것으로 예상된다.

2019. 1. 23.

지도교수 :

박태윤



(인)

(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.

KOPRI  
극지연구소