

TSPE16030-011-12

다산기지주변 후기 고생대 고착성 생물의 고생태

Paleoecology of Late Paleozoic sessile organisms around the
Dasan Station



고려대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “다산과학기지 기반 지질-대기-생태 환경변화 연구에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “다산기지주변 후기 고생대 고착성 생물의 고생태에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 이 유 경
위탁연구기관명 : 고려대 산학협력단
위탁연구책임자 : 조 석 주
위탁참여연구원 : 이 동 진
“ : 이 미 리 내
“ : 이 효 진
“ : 김 나 경
“ : 전 주 완

요 약 문

I. 제 목

다산기지주변 후기 고생대 고착성 생물의 고생태

II. 연구개발의 목적 및 필요성

각 지질시대마다 독특한 저서 고착성 생물들의 상호 작용으로 형성되는 생물초의 각 구성원의 종류와 이들의 퇴적학적 역할, 그리고 퇴적환경과 생물 사이의 상호작용에 대한 이해는 과거 지질시대 당시의 환경변화 및 고생태 이해를 위한 정보를 제공할 수 있다. 따라서 고착성 생물의 고생태와 이들이 생물초를 생성하는 과정을 연구하는 것은 탄산염 퇴적체의 형성 과정의 이해 및 고환경의 복원과 해석에 있어 매우 중요하다.

석탄기 후기 Scheteligfjellet층에서는 상판산호 auloporidae 목의 *Multithecopora*와 *Aulopora*가 발견되었다. 이들은 외골격 형태에 의거하여 분류되었는데 종 동정을 위해서는 생물 고유의 특성 혹은 외부 요인 등 어떤 과정을 거쳐 이들의 특징적인 외골격이 형성되었는지 알아야 하나 이에 대한 이해가 부족하다. 또한 Scheteligfjellet층의 상부에 놓이는 Wordiekammen층에서 아직까지 그 생물학적 분류가 불명확한 *Palaeoaplysina*라는 석회질 조류로 이루어진 생물초가 발견되었는데, 지금까지 이러한 석회질 조류가 형성한 생물초는 주로 석탄기 후기~페름기 중기에 걸쳐 판게아 초대륙의 서쪽 경계에 분포하였던 것으로 알려졌다. 그러나 *Palaeoaplysina*가 어떠한 과정을 통하여 생물초를 만들었는지에 대해서는 아직까지 분명하게 밝혀지지 않았다.

본 연구에서는 석탄기 상판산호의 고생물학적 성장 특성을 고생태학적인 요인과 연결하여 분석하고, 계통 미상의 *Palaeoaplysina*가 어떠한 과정을 거쳐 생물초를 형성하였는지 밝히 고자한다. 이러한 결과는 스피츠베르겐 섬의 후기 고생대 고환경 및 고생태를 종합적으로 해석하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 전망된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

Scheteligfjellet층의 상부에 놓이는 Wordiekammen층에서 아직까지 그 생물학적 분류가 불명확한 석회질 조류의 일종인 *Palaeoaplysina*로 주로 이루어진 생물초를 발견하였다. 지금까지 이러한 석회질 조류가 형성한 생물초는 주로 석탄기 후기~페름기 중기에 걸쳐 판게아 초대륙의 서쪽 경계에 분포하였던 것으로 알려졌다 (Kiessling et al., 1999). 이러한 *Palaeoaplysina*는 지금까지 주로 생물초 내부, flank부분, 그리고 생물초 주변부에서 그 과편이 흩어진 형태로 보고된 것이 대부분이며, 궁극적으로 *Palaeoaplysina*가 어떠한 퇴적학적 과정을 통하여 생물초를 만들었는지에 대해서는 아직까지 분명하게 밝혀지지 않았다 (Watkins and Wilson, 1989; Wahlman, 2002). 이러한 탄산염암의 구성원 중 다수는 그 크기가 매우 작아 야외에서 구별하기 어렵거나 또는 그 몸체의 내부 구조를 야외에서 관찰하기 어려운 점이 많아 이들을 야외에서 확대경으로 관찰하는 것만으로는 해석이 어려운 경우가 많다. 생물초 및 주변의 환경 변화를 해석하기 위하여 야외 정밀관찰과 생물초암의 슬랩 면 및 층리면에 수직하게 약 20-30센티미터 간격으로 생물초 주변 퇴적암을 박편으로 제작하여 이를 바탕으로 주변 퇴적상 및 미세퇴적상 분석을 수행하였다. 이러한 분석 자료를 종합하여 생물초의 형성과 주변 퇴적환경과의 상호관계를 해석하여 후기 고생대 탄산염 퇴적체의 퇴적학적 및 고생태학적 이해를 증진시키고자 한다.

석탄기 후기 Scheteligfjellet층에서 상판산호 *Multithecopora*와 *Aulopora*가 발견되었다. *Multithecopora*의 분포는 Scheteligfjellet층과 Wordiekammen층을 구분하는 하나의 지시자로 사용되어 왔으나 고생물학적 연구는 전무한 실정으로 이들의 고생물학적 특징과 개체 증식 방식의 분석한 결과 현저하게 다른 외골격 형태를 갖는 *M. syrinx*와 *M. tchernychevi*로 두 종이 확인되었다. *Aulopora*는 스발바드 섬에서 보고된 적이 없는 상판산호의 속으로 층리면에서 *M. syrinx*와 자주 혼동된다. 이들에 대해 연속 박편 분석 결과 및 주위 퇴적상과의 관계에 대한 분석을 통해 기존의 보고와 상이한 성장 패턴이 관찰되며 auloporid 산호의 종 동정 및 성장 패턴과 고생태학적 요인의 관련성에 대한 이해를 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 연구개발결과

Wordiekammen층의 *Palaeoaplysina* algal mound boundstone의 분석 결과는 석탄기 후기부터 페름기 초기의 초대륙 판게아의 북서부에만 분포했었던 분류미상의 판상 생물인 *Palaeoaplysina*가 (Wray, 1977) 기존의 통념보다 퇴적면을 피복하고 생물초의 골격구조 (framework)을 건설하는 성질이 있음을 강하게 지시하고 있다. *Palaeoaplysina*의 성장 형태에 대한 간접적인 증거만을 제시한 기존 연구에 비해 본 연구에서는 *Palaeoaplysina*의 성장 형태에 대한 직접적인 증거를 제시한다.

Scheteligfjellet층 *Multithecopora*는 상이한 외골격의 특징을 보이는 두 종이 분류되었

다. 이들에 대하여 어떻게 분열하고 어떻게 성장하는지에 대해서는 아직까지 연구가 전무한 상황으로 일반적인 상판산호와 달리, 발아체가 충분히 성장하기 전까지 모체와 분리되지 않고 함께 성장하는 기저 증식의 특성을 보인다. 이는 이들의 계통 소속이 auloporida류 산호임을 지시하는 직접적인 특징으로 생각된다. *Aulopora*는 기저 증식 방식으로 증식하는 것이 주로 보고되어 왔으나 Scheteligfjellet층에서는 *Multithecopora*와 유사하게 기저 증식을 하지만 발아체가 완전히 성장한 이후에 모체와의 연결이 끊어지는 특성을 보이는 무성 생식으로 생각되며(Lirman, 2000), *Aulopora*와 *Multithecopora*의 구분 및 이들의 생활사 전략을 해석하는데 단초를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

테본기 후기의 대량 멸종사건 이후 후기 고생대는 생물 다양성의 관점에서 보면 중생대부터 오늘날까지 이어져 온 현생 생물군으로 진화하기 직전의 시기로, 특히 중기 석탄기-후기 페름기 동안 번성한 석회질 조류 및 저서 고착성 후생동물들에 의한 생물초는 중생대 및 오늘날의 지구 시스템 형성을 이해하기 위해 매우 중요하다. 후기 고생대 *Paleoaplysina*와 auloporida 판상산호에 대한 연구는 다산기지가 위치한 스피츠베르겐 섬의 고환경 및 지질 특성을 이해를 돕고 우리나라 강원도 태백 지역 일대의 평안 누층군 밤치층과 비교하여 아직까지 국내 학계에서 이해가 부족한 후기 고생대의 고환경 변화를 이해하는데 도움이 될 것이다. 이러한 결과는 나아가 저서 고착형 생물의 성장 과정, 퇴적 환경, 그리고 이러한 생물들의 퇴적학적 역할에 대한 이해를 증진하는데 기여할 것으로 기대된다. 또한 *Paleoaplysina* 생물초는 속성작용을 거치면서 높은 공극률을 발달시킬 수 있어 석유의 저류암으로 작용할 수 있기 때문에 현재 북해, 바렌트해, 러시아 등지에서 상업적으로 석유를 생산하고 있다. 따라서 후기 고생대 탄산염암층에서 석유를 생산할 수 있는 잠재적 저류암의 이해를 통하여 향후 해외 자원개발의 현장에서 동시대 지층의 경제적 가치를 재평가할 수 있는 노하우를 국내 연구진이 보유할 수 있다는 점에서 이 연구는 경제적인 측면에서 잠재적으로 우리나라에 큰 도움이 될 가능성이 있다고 사료된다.

S U M M A R Y

I. Title

Paleoecology of Late Paleozoic sessile organisms around the Dasan Station.

II. Purpose and Necessity of R&D

Late Paleozoic problematica *Palaeoaplysina* and reefs mainly formed by aggregation of them is analyzed in order to provide their sedimentologic role during the initiation and growth of reef structure. In addition, auloporid tabulate corals including *Multithecopora* and *Aulopora* genera are investigated to identify their systematic affinity mode of corallites increase.

III. Contents and Extent of R&D

Samples containing *Palaeoaplysina* and auloporid corals obtained during 2014 field excursion are analyzed by mapping out large slabs and matching sets of thin sections.

IV. R&D Results

In addition to previously known type of reef aggregation by *Palaeoaplysina*, we identified additional type of their contribution toward “algal” reef growth: by multiple encrustations of *Palaeoaplysina* to form thickets of *Palaeoaplysina* up to several centimeter thick. Such thick band of *Palaeoaplysina* is repeatedly accreted upward as well as laterally to form lenticular body of *Palaeoaplysina* reef.

Multithecopora and *Aulopora* are analyzed in terms of growth pattern that potentially reveals relationship between their growth and environment.

V. Application Plans of R&D Results

The current result is considered as an additional type of reef aggregation by *Palaeoaplysina*. The next round of investigation will be focused on the interrelationship between *Palaeoaplysina* and other constituents of the reef, including phylloid algae and other sessile components. This study also provides additional criteria to interpret growth paleobiological and paleoecological factors.

목 차

제 1 장 서론.....	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과.....	13
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	32
제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	34
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	36
제 7 장 참고문헌.....	37



본 문

제 1 장 서론

후기고생대 당시 오늘날의 북극 다산기지가 위치한 스발바드와 북극해 일대는 고생대 말부터 전 세계 판들의 충돌로 형성된 초대륙 판게아 북반구의 중북부의 온대 및 한대 지역에 위치했었다(Anderson and Beauchamp, 2014). 이러한 당시 판게아 초대륙의 북부에는 천해환경에서 퇴적된 지층들이 널리 분포하고 있다. 석탄기와 페름기로 구성된 후기고생대는 오르도비스기 및 데본기 말기에 있었던 전 세계적 규모의 대량멸종(mass extinction)이 일어난 후의 시기로, 현생이언이 시작된 이래 생물초가 후생동물(metazoan)이 아닌 석회질 미생물과 석회질 조류등으로 주로 구성되는 매우 특이한 시기였다. 그러나 지금까지 우리나라의 석탄기와 페름기 지층에 대한 퇴적학 및 고생태학적인 연구는 석탄기와 페름기 퇴적층이 매우 드물게 분포하는 한반도의 지질특성에 의하여 제한되었기 때문에 연구진의 숫자, 연구의 깊이나 그 성과가 상대적으로 미미했었다.

본 연구는 지난 2002년 스발바드에 극지연구소 다산과학기지가 설립된 이래 지금까지 현생 환경 및 생태변화에 대하여 다양한 관점에서 진행된 극지연구소의 연구 방향에 지질학적 고환경 및 고생태 분석이라는 방향을 추가로 도입하여, 다산기지 인근에 노출되어 있는 고생대 후기 퇴적층이 형성될 당시의 고환경과 고생태가 어떠한 방향으로 변화하였었는지를 암석에 저장된 퇴적학적 및 고생물학적 정보를 종합하여 복원하는 것에 초점이 맞추어져 있다. 일반적으로 퇴적상(sedimentary facies)은 특정 공통형질을 공유하는 퇴적암들을 총칭하는 것으로, 이러한 형질에는 퇴적암을 구성하는 입자의 입도, 형태, 밀도, 퇴적구조, 화석 등 다양한 기재 및 분석대상이 포함된다. 따라서 특정 퇴적상의 생성 과정을 이해하여 당시 이러한 퇴적물이 어떠한 퇴적 조건 또는 환경 하에서 퇴적되었는지 해석할 수 있으며, 이를 바탕으로 거시적 그리고 미시적으로 퇴적층 생성 당시의 고환경을 재구성할 수 있다.

특히 퇴적암 중 탄산염암은 무척추 생물과 관련이 깊은데, 이는 탄산염암을 구성하는 입자 중 상당 부분이 생물의 유해로 구성되며, 특히 각 지질시대별로 특정 생물들이 진화와 멸종을 거듭하여 각 시대별로 그 구성이 달라지기 때문에 특정 시대의 탄산염암은 다른 지질시대에 형성된 탄산염암과는 그 주 구성 입자를 근거로 쉽게 구분이 가능하다. 후기고생대는 데본기 말기의 대량 멸종사건 이후 급격한 진화와 방산의 결과로 생물상이 급변하던 시기로, 이렇게 급하게 진화하는 무척추 생물군이 층서 및 퇴적기록에 어떻게 영향을 주고 또한 암석에 기록되었는지를 포괄적으로 이해하는 것은 아직 초보 단계이다. 후기고생대의 퇴적상은 그 이전이나 그 이후와는 확연하게 구별되는 특징을 보이며, 이러한 후기고생대에 특징적으로 나타나는 퇴적기록을 이해하면 당시의 환경변화 양상과 생물들이 이러한 환경변화에 어떻게 적응하였는지를 알아낼 수 있다.

무척추 생물은 탄산염을 구성하는 주요 입자의 생산자로 탄산염암의 형성에 영향을 미친다. 특히 생물이 형성하는 특징적인 탄산염암 구조 중 오늘날 열대지방의 천해에서 수많은 산호들이 서로 엉겨 붙어 형성하는 산호초(coral reef)와 같이 해저면에서 돌출한 구조를 생물초(reef)라 한다. 이러한 생물초는 특히 현생이연에 계속된 생물의 진화와 멸종에 민감하게 반응하기 때문에 이러한 독특한 생물학적 퇴적구조에 대한 퇴적학 및 고생태학적 연구는 후기고생대 당시 지구의 환경과 환경변화에 대한 이해를 위하여 반드시 필요하다(James and Wood, 2010). 본 위탁과제는 본과제의 연구 목표 중 하나인 “스피츠베르겐섬의 고환경 특성 규명”을 달성하기 위해 다산기지 인근의 후기고생대 Schteligfjellet 및 Wordiekammen층의 탄산염암에서 2014년 야외지질조사를 통하여 발견된 생물초를 주 대상으로 한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

탄산염 퇴적암의 퇴적상에 대한 연구는 18세기에 유럽에서 처음으로 시도되었다. 20세기 중반까지 탄산염 퇴적상의 연구는 주로 북미와 유럽에서 주도적으로 이루어졌다. 20세기 중-후반의 냉전 기간 동안 러시아에서 주로 전기 캄브리아기에 집중되어 일부 연구가 진행되었으나 그 연구 결과도 주로 러시아어로 발표되어 국제적으로 제대로 평가가 이루어지지 못하였다. 냉전 종식 후 1990년대부터 탄산염 퇴적층에 대한 현대적인 관점에서의 연구가 이루어지기 시작했으며, 25년이 지난 현 시점에는 새롭게 보고된 다양한 연구 결과들을 바탕으로 기존 통념들을 수정하는 단계에 있다. 그러나 아직 기존에 심층적 연구가 진행되었던 북미 및 유럽에 비해 스발바드와 북극해 일대에 대한 우리나라의 지질학적 연구는 그 숫자와 깊이에서 선진국에 비해 모두 많이 부족하여 향후 다양한 연구들이 다각도로 진행되어야 할 것이다.

최근 중국에서 기초과학인 지질과학 연구에 많은 예산을 투입하여 다양한 연구가 이루어지고 있는 점은 눈 여겨 볼만하다. 그러나 아직 이러한 연구들의 대부분이 1950년대부터 1980년대에 거시적 관점에서 암석을 관찰, 기재 및 해석하는데 집중되어 있어, 아직 미시적 관점에서 탄산염암을 세밀하게 관찰, 기재, 해석하여 수행하는 연구는 드물다. 또한 다른 지질시대에 비해 후기고생대 퇴적암체에 대한 연구는 최근 현대적 관점의 후속 연구가 활발하지 않아 아직 심도 있는 포괄적인 이해가 부족한 상황이다.

지금까지 다산기지가 위치한 스발바드섬에 대한 기초 지질조사 및 층서학적 연구는 유럽 과학자들에 의하여 정리되어 왔다. 그러나 각 암층서 단위에서 특징적으로 산출되는 화석을 기반으로 한 고환경 변화 연구는 아직 초보단계에 머물러 있다. 한편 다산기지 인근의 석탄기 및 페름기 지층과 대비되는 탄산염암에 대한 연구가 우리나라 영월 및 평창 일대에 분포하는 평안누층군 밤치층을 대상으로 진행 중으로, 본 연구에서 진행된 스발바드섬의 퇴적상, 고환경 및 고생태와 밤치층과의 비교를 통하여 후기 고생대의 탄산염암에 대한 심도 있는 연구가 수행 가능할 것으로 기대된다.

산호는 현생대 전반을 걸쳐 탄산염 퇴적체를 형성하는 주요 생물 중 하나로 알려져 왔다. 전기 고생대에 처음 출현한 상판산호 및 사사산호류는 후기 고생대말에 이들이 멸종할 때까지

생물초 혹은 탄산염암을 형성하였다. 산호 화석의 동정 및 고생물학적 특성에 관해서는 상당한 양의 연구가 다양한 종에 관해서 정리되어 있으나, 주로 북미, 유럽, 러시아 지역에서 진행되었다. 20세기 중-후반 시기 미국과 러시아 양국에서 당시까지 보고된 산호 화석들을 총집합한 결과물이 각각 출판되었으며, 점차 산호 화석 자체만이 아닌 주변 퇴적상과 연계하여 생활사를 분석하는 고생태 연구의 비중이 늘어났다.

스피츠버겐의 경우 유럽 학자들에 의해 기초 지질조사 및 층서학적 연구 뿐 아니라, 대부분의 화석 산출 보고 연구가 어느 정도 수행되었다(e.g. Ludwig, 1991; Nowiński, 1991). 그러나 산호 연구의 경우, 대부분이 스피츠버겐 지역에서 산출된 산호의 기재와 동정 및 보고에만 국한된 면이 있다(e.g., Nowiński, 1981; Nowiński and Zapalski, 2001). 특히 다산기지 인근 지역의 Schteligfjellet층의 ‘multithecoporid’ 산호의 경우 탄산염암으로 이루어진 Schteligfjellet층을 구별하는 데 매우 중요하다고 여겨져 왔지만(e.g. Ludwig, 1991), 정확한 동정이 수행되지 않은 상태이다.

우리나라의 경우 후기 고생대 시기의 탄산염암 및 산출 화석에 관한 연구의 양과 깊이에 있어 여타 선진국에 비해 부족할 뿐 아니라, 강원도 영월 및 평창 일대에 분포하는 평안누층군 후기 고생대 밤치층의 탄산염암에 관련된 연구 역시도 거의 수행되지 않은 실태이다. 산호의 경우, 국내에서 산호 화석이 발견된 예가 거의 없기 때문에 국내 학자에 의한 산호 연구는 주로 북미, 유럽 및 중국의 산호 샘플로 이루어졌다. 이와 같은 연구자 및 논문의 부족은 산호가 포함된 국외 지층을 심층적으로 조사 및 연구할 때 난항을 겪게 하는 원인이 되어 왔으며 이를 타개하기 위한 다양한 연구들이 다각도로 진행되어야 할 것으로 보인다.

본 연구를 수행하기 위한 자료를 제작하는 안동대학교 고생물학실험실에서 산호의 고생물학적 특징 및 고생태를 연구하기 위해 사용하는 기법들은 크게 2가지로, 연속 박편(serial thin sections)과 연속 아세테이트 필(serial acetate peel)이 그것이다. 단순 박편과 아세테이트 필 기법의 경우에는 20세기 중반에 암석학 전반 및 고생물학에 걸쳐 사용되기 시작했으며 현재까지도 많은 지질학 분야에서 유용하게 쓰이고 있지만, 1회성이 아닌 암석 혹은 화석 표품 전체를 연속적으로 절단하여 제작하는(간격: 박편 약 1.0 - 2.0 mm, 아세테이트 필 약 0.02 - 0.1 mm) 방식을 주도적으로 사용하는 것은 현재 전 세계적으로도 우리나라 안동대학교가 유일하

다. 암석 혹은 화석 전체를 3차원적으로 재구성하여 분석하는 이 자료처리기법은 기존의 단순 1회선 박편 제작 방법으로는 확실하게 알 수 없었던 의문점을 해소하는 데 도움이 되고 있으며, 이 기법을 이용한 연구들이 20세기 후반부터 많은 SCI(E)급 저널에 투고되어 왔다. 상대적으로 미진했던 다산기지 인근의 산호들의 고생태 및 그들의 생활 기작에 관한 연구를 수행하면서 연속 박편제작 처리기법을 적극적으로 사용하였으며, 이를 상세히 해석하여 그 의의를 구명하는 연구를 진행하였다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 서론

다산기지 서쪽에 발달하는 후기고생대 퇴적층인 Broggeringden, Schteligfjellet, 그리고 Wordiekammen층 중 Schteligfjellet과 Wordiekammen층은 상당부분이 탄산염암으로 구성되어 있다. 이러한 탄산염 퇴적체의 고환경 및 고생태를 이해하기 위해서는 탄산염 퇴적체 내에 저서성 고착형 생물들이 형성한 독특한 퇴적구조인 생물초에 대한 연구가 필연적이다. 2014년 8월에 진행된 현장조사를 통해 중기 펜실베이안(석탄기 후기)에 퇴적된 Schteligfjellet층 하부에서 주로 산호로 이루어진 생물초를, 그리고 그 상위에 놓이는 후기 펜실베이안(석탄기 후기)부터 초기 페름기 시기에 퇴적된 Schteligfjellet층의 상부에 놓이는 Wordiekammen층에서 아직까지 그 생물학적 분류가 불명확한 석회질 조류의 일종인 *Palaeoaplysina*로 주로 이루어진 생물초를 발견하였다. 지금까지 이러한 석회질 조류가 형성한 생물초는 주로 석탄기 후기~페름기 중기에 걸쳐 판게아 초대륙의 서쪽 경계에 분포하였던 것으로 알려졌다(Kiessling et al., 1999). 이러한 *Palaeoaplysina*는 지금까지 주로 생물초 내부, flank부분, 그리고 생물초 주변부에서 그 파편이 흩어진 형태로 보고된 것이 대부분이며, 궁극적으로 *Palaeoaplysina*가 어떠한 퇴적학적 과정을 통하여 생물초를 만들었는지에 대해서는 아직까지 분명하게 밝혀지지 않았다(Watkins and Wilson, 1989; Wahlman, 2002).

제 2 절 연구 방법

본 연구에서 주 연구 방법으로 적용한 미세퇴적상 분석(microfacies analysis)은 정밀한 야외관찰을 기반으로 선별된 암석에 대한 박편(필요시 연속편)을 퇴적학적 및 고생물학적인 요소를 종합적으로 고려하여 관찰 및 기재하여 탄산염암을 해석하는 방법이다(Flugel, 2004). 탄산염암의 경우 쇄설성 퇴적암과는 다르게 상당량의 퇴적물이 생물에 의해 생성되며 이들 퇴적물의 구성원을 알아야 탄산염암의 생성과정을 이해할 수 있다. 이러한 탄산염암의 구성원 중 다수는 그 크기가 매우 작아 야외에서 구별하기 어렵거나 또는 그 몸체의 내부 구조를 야외에서 관찰하기 어려운 점이 많아 이들을 야외에서 확대경으로 관찰하는 것만으로는 해석이 어려운 경우가 많다. 탄산염암에 대해 미세 퇴적상 분석을 시행하여 야외에서 관찰과 해석이 불가능한 부분을 실험실에서 보완할 수 있으므로 탄산염암에서 그 구성 입자, 퇴적 환경, 속성 작용 등

다양한 자료를 추출하고 해석할 수 있다. 특히 과거에는 통상 2.5 x 5 cm 크기의 암석 박편으로 관찰을 하였으나, 최근 5 x 7.5 cm 크기의 대형 박편을 이용하여 과거 소형 박편에서는 인지하기 어려웠던 상대적으로 큰 규모의 퇴적 구조들을 인식하는 방법이 사용되고 있다. 또한 더 큰 퇴적구조를 관찰하고 기재하기 위하여 큰 박편을 여러 개 연이어 제작하는 방법도 사용되고 있다. 한편, 박편으로는 2차원적인 구조만을 관찰할 수 있는 단점을 극복하기 위하여 최근에는 연속편의 제작을 통하여 하나의 샘플에서 수십에서 수백 개의 박편을 연이어 제작하여, 박편관찰을 바탕으로 3차원적 구조를 재구성하는 방법도 사용되고 있다.

2014년의 다산기지 주변의 지질조사를 통해 발견된 고착형 저서성 고생물의 고생태를 분석하기 위하여 야외 정밀 조사와 함께 탄산염암의 미세적인 연구를 위한 많은 양의 고착성 생물과 생물초 시료가 채취되었다. 2014년 말에 국내로 반입된 시료들을 대상으로 2015년 5월부터 고려대학교 퇴적암연구실과 안동대학교 고생물학 연구실의 Hillquist 박편 제작기를 이용하여 암석 시료들을 정밀 가공하여 두께 약 30 μm 의 5.2 x 7.6cm 크기의 대형 박편과 2.7 x 4.9cm 크기의 일반 박편으로 제작하는 과정을 진행하였으며, 이렇게 준비된 박편을 편광/실체 현미경으로 관찰에 기반을 둔 미세 퇴적상 분석(microfacies analysis)을 시행하여 생물초를 구성하는 생물의 종류, 생물초 내 여러 생물들 사이의 관계 등 생물초의 조직적 특성에 관한 연구를 실시했으며, 아울러 생물초 주변의 퇴적상도 미세 퇴적상 분석을 통하여 생물초가 생성될 당시의 퇴적환경의 해석도 병행하였다. 시료의 슬랩면에서 생물초 구성원의 2차원적 분포를 육안과 실체현미경으로 관찰하고, 육안으로는 관찰하기 어려운 생물초 내부 구조 및 구성원의 분포를 현미경에서 확인하여 기재하기 위하여 슬랩면 전체를 여러 개의 대형 박편으로 제작하여 기재하는 작업도 진행되었다. 자료의 기재를 바탕으로 생물초 구성 생물들의 분포와 그 생장 양식을 재구성할 수 있을 뿐 아니라 생물초 내부에서 지금까지 파악되지 않았던 수 밀리미터 규모 이하의 작은 구성원들까지 기재할 수 있다. 생물초 주변의 환경 변화를 해석하기 위하여 층리면에 수직하게 약 20-30센티미터 간격으로 박편으로 제작하여 이를 바탕으로 미세퇴적상 분석을 수행하였다.

스발바드 군도의 스피츠버겐 섬 서쪽의 Brøggerhalvøya 지역에 발달한 후기 고생대 탄산염 퇴적층인 Schteligfjellet층의 하부 2 m 구간에서 상당한 양의 상판산호 군체들이 발견되었다. 2014년 8월에 진행된 야외 현장조사를 통해 확보된 상판산호 표본들과 상판산호가 포함된 탄

산염암을 분석한 결과 이들 상판산호들은 auloporida목에 속하는 것으로 밝혀졌다. Auloporida 산호류들은 주로 석탄기-페름기 시기에 유럽, 아시아, 북미지역을 포함하여 전 세계에 걸쳐 살았던 것으로 알려져 있다(Fedorowski, 1981). 이들은 생물초를 형성하기도 했으며 혹은 다양한 종류의 저서 고착성 생물들과 상호작용하며 살았다(Suchy and West, 2001; Wahlamn, 2002). 넓은 시공간적 분포 덕분에 auloporida의 고생물학적 특성에 관한 연구는 상당히 진척되어 있다고 보여왔다(e.g. Fenton and Fenton, 1937; Scrutton, 1990; Coronado and Rodriguez, 2014). 그러나 야외 현장조사에서의 관찰 결과 Shteligfjellet층에서 산출된 auloporida중 기존에 알려지지 않은 형태의 성장 특성을 보이는 산호 군체가 발견되었다. 고착성 군체생물인 산호의 고생물학적 특성과 성장 방식을 이해하는 데에는 박편 제작이 필수적이라 할 수 있으며, 이를 위한 실내 작업들은 2014년 말에 도착한 표본들을 대상으로 2015년 중순부터 2017년 초인 현재까지 안동대학교 고생물학실험실에서 진행 중이다. 대부분의 화석들은 외골격이 구화된 상태이며 또한 부분적으로 심한 reworking을 받아 온전한 상태의 개체가 많지 않았으며 이 점을 고려하여 10여 개 군체표본을 대상으로 개체의 증식과 군체의 성장특성을 파악하기 위한 횡단면 연속 박편(serial transverse sections)을 제작하였다. 대체로 두께 약 30 μ m의 박편들이 제작되고 있으며 연속 박편의 경우 1.5 - 2.0 mm 간격으로 300여개의 박편이 현재까지 준비된 상태이다. 준비된 박편들은 주로 실체현미경을 통한 관찰과 함께 각종 수치데이터를 측정할 수 있는 컴퓨터 프로그램 등으로 분석되었다. 수행된 분석들은 상판산호의 생물학적 분류 및 고생태 분석을 위해 사용될 예정이다. 특히 연속 박편의 경우 해당 생물이 살았던 성장 방식과 해당 시기의 탄산염 암상 분석을 통해 생물과 환경의 상호작용인 고생태를 재구성할 수 있을 것으로 보인다.

제 3-1 절 *Palaeoaplysina*의 고생태 및 생물초 형성에 대한 역할

1. *Palaeoaplysina*의 형태 및 계통 분류

*Palaeoaplysina*는 후기 석탄기에서 전기 페름기 동안 광개아 초대륙의 북서부에 분포했던 생물로, 당시 이 지역에서 발달한 생물초에서 흔히 보고되는 화석이다. 이들은 넓고 구불구불한 판상의 형태로 분지하는 튜브상의 canal, 판 내부에 아라고나이트로 구성된 cellular 골격을 가지고 판의 윗면에는 볼록하게 솟아 오른 mamelon과 작은 구멍들이 도처에 산재해 있는 것

이 특징이다(Anderson and Beauchamp, 2014)(그림 1). *Palaeoaplysina*는 해면동물(Krotov, 1888), hydrozoan(Breuninger, 1976; Davies, 1971; Davies and Nassichuk, 1973), 석회질 조류(Watkins and Wilson, 1989; Kiessling et al., 1999; Wahlman, 2002; Vachard and Kabanov, 2007)로 해석되었으나 그 생물학적 계통은 아직까지 불분명하다.

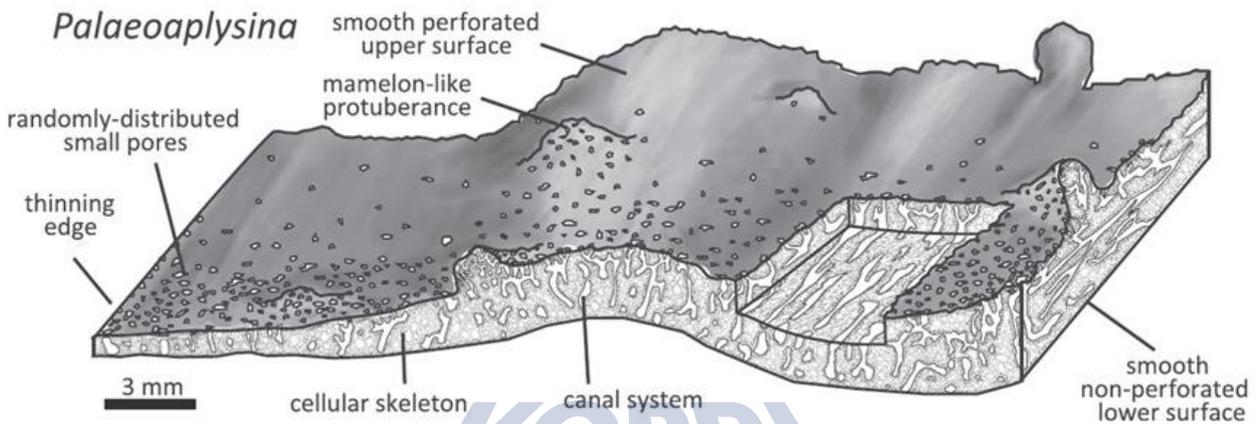


그림 1. *Palaeoaplysina*의 형태와 내부구조. *Palaeoaplysina*는 판상의 윗면에 국부적으로 볼록한 mamelon 구조를 가진 석회질 생물로 내부에는 분지하는 튜브형의 canal이 분포하고 그 사이사이에는 cellular 골격으로 구성되어 있다. Anderson and Beauchamp (2014)에서 발췌.

2. *Palaeoaplysina*의 growth habit 및 생물초 형성에 대한 고생태학적 역할

*Palaeoaplysina*의 서식 방식에 대해서는 해저면에 대하여 수직적으로 서서 살았다는 해석(Davies, and Nassichuk, 1973; Beauchamp et al., 1989a)과 수평적으로 피복하며 살았다는 해석(Davies, 1971; Breuninger, 1976; Skaug et al., 1982) 등 의견이 분분하다. 이러한 성장 방식은 각각 *Palaeoaplysina*가 유수의 흐름에 의해 운반되던 퇴적물을 막으며 퇴적물을 집적시키는 baffler였는지 또는 퇴적물 및 생물초 구성 생물을 피복하고 스스로 생물초의 주요 골격을 형성하는 binder 및 frame-builder였는지 등 이들의 생물초의 성장에 기여하는 역할 및 생물초의 형성 과정을 재구성하는데 큰 차이가 있으므로, 탄산염 퇴적체의 발달에 있어 *Palaeoaplysina*의 growth habit에 대한 이해는 중요하다.

3. 다산기지 주변 후기 고생대 Wordiekammen층 *Palaeoaplysina* 생물초

다산기지 주변의 *Palaeoaplysina*는 상부 석탄기(Sakmarian-Asselian) Wordiekammen층 Tyrrellfjelet 층원에서 수 매의 생물초를 구성하고 있다(그림 2). 생물초는 수십 센티미터~1 미터 두께의 층상의 바이오스트롬(biostromes)으로 와케암과 껍암 사이에 협재되어 있다(그림 2와 3A). 생물초 내부에는 어두운 회색의 *Palaeoaplysina* 판들이 분포한다(그림 3B-C).

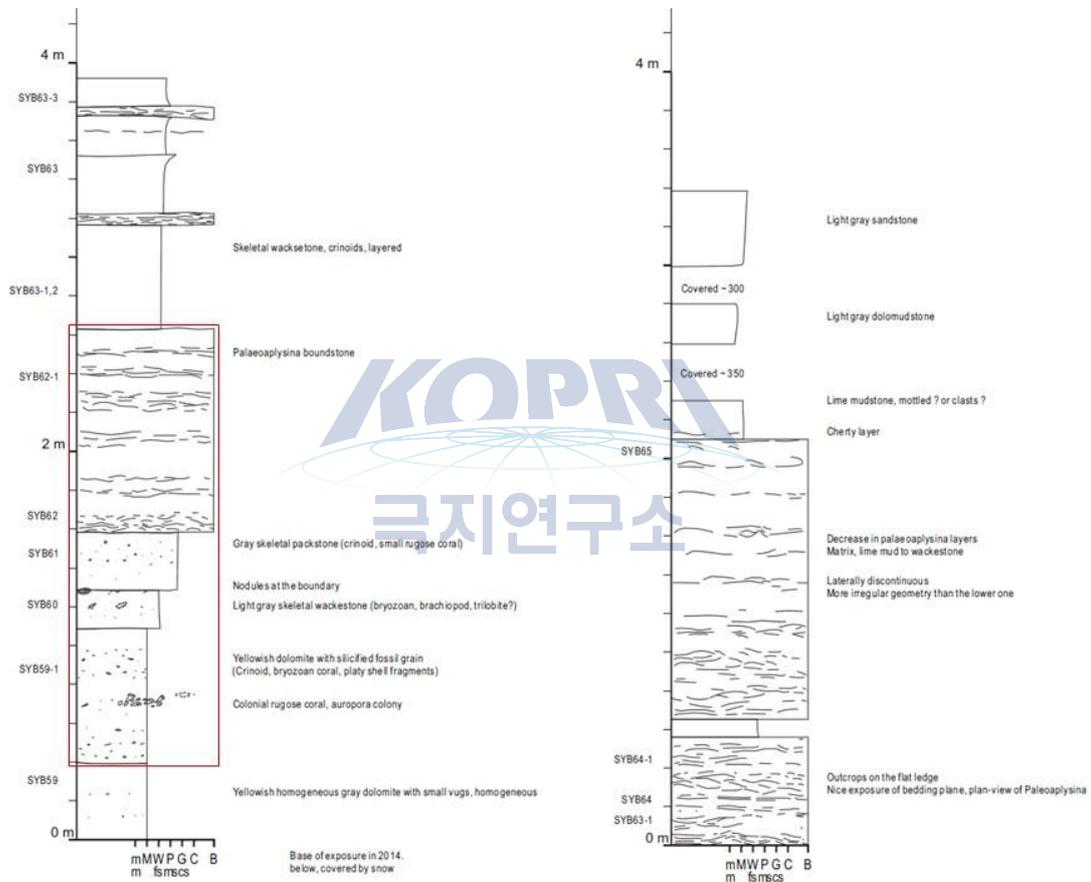


그림 2. *Palaeoaplysina* 생물초와 그 주변 퇴적층의 주상도. 붉은 사각형은 그림 3.3-3A 노두 사진 위치를 가리킨다.

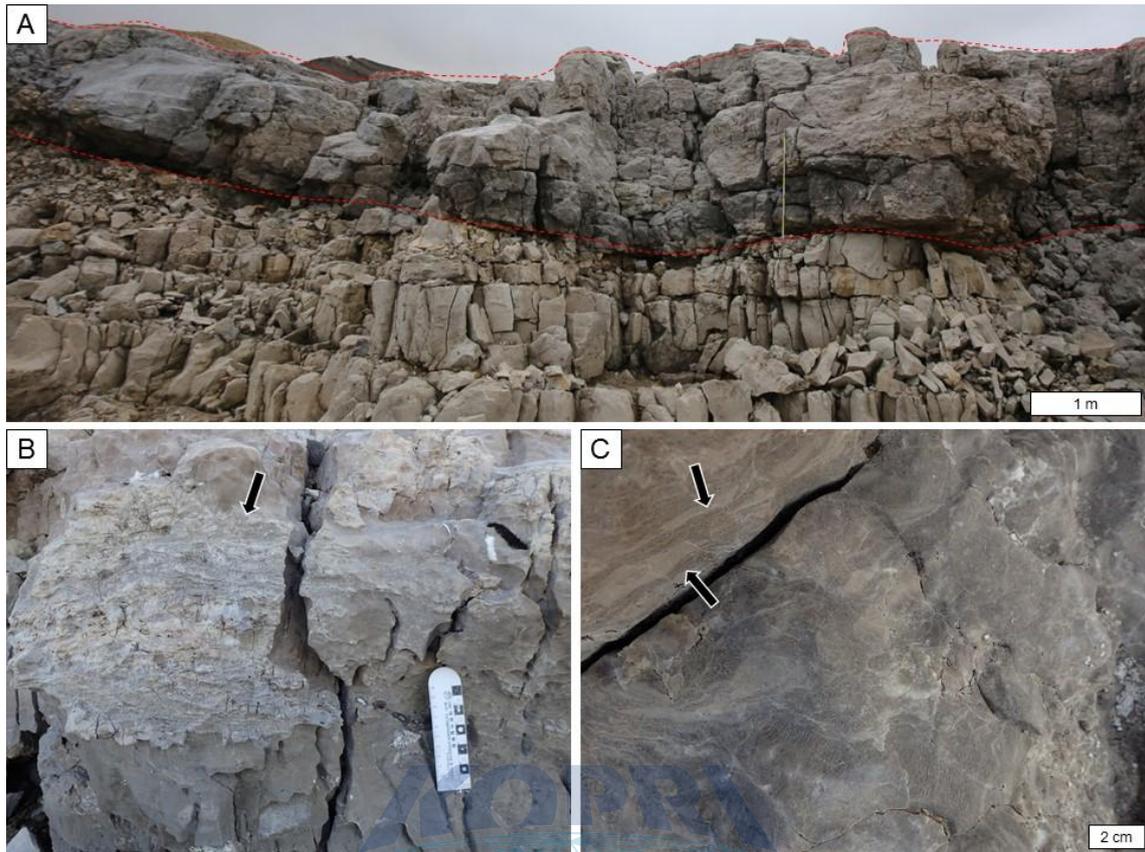


그림 3. 다산기지가 위치한 Ny-Ålesund로부터 북서쪽 약 5.5 km 지점에서 바라본 Wordiekammen층의 *Palaeoaplysina* 생물초(적색 점선)의 노두 사진. A) 층상의 *Palaeoaplysina* 바이오스트롬. 화살표는 판산의 생물초 구성 생물이 잘 보존된 부분을 보여준다. B) 생물초(화살표) 내부에 검은 띠 형태의 *Palaeoaplysina*가 중첩되어 있는 모습. C) *Palaeoaplysina* 판들(화살표) 사이에 황색의 퇴적물이 채워져 있다.

*Palaeoaplysina*는 대부분 굴곡진 모양으로 전반적으로 층리면에 수평적으로 놓여있고, 수직적으로 인접한 판들의 굴곡진 형태는 유사하다. 수직적으로 10 cm 내외의 구간에 조밀하게 놓여있는 *Palaeoaplysina* 판들은 층상 또는 렌즈상의 황색의 퇴적물과 교호를 하고 있다(그림 4). 이들은 0.2-0.3 mm에서 최대 0.5 mm의 두께를 보이며 길이는 슬랩에서 최장 25 cm까지 나타난다. 샘플의 전체 너비가 제한되어 있으므로 본래의 판 길이는 25 cm 이상이었을 것으로 추측할 수 있다(그림 4와 5). 관찰 대상 시료에서 *Palaeoaplysina* 판 내부에 수백 μm 직경의 석회 이질 퇴적물로 채워져 있는 튜브 형태의 canal과 부분적으로 솟아올라온 구조인 mamelon이 관찰되고 판의 나머지 공간은 cellular skeleton이 치환되어 생성된 방해석 교질물

로 채워져 있다(그림 5). 판의 윗면에는 canal이 판의 윗면을 뚫어 나타나는 작은 구멍들이 관찰되는 반면에 판의 아랫면은 비교적 매끄러운 가장자리를 보이고 작은 구멍들이 나타나지 않는다.

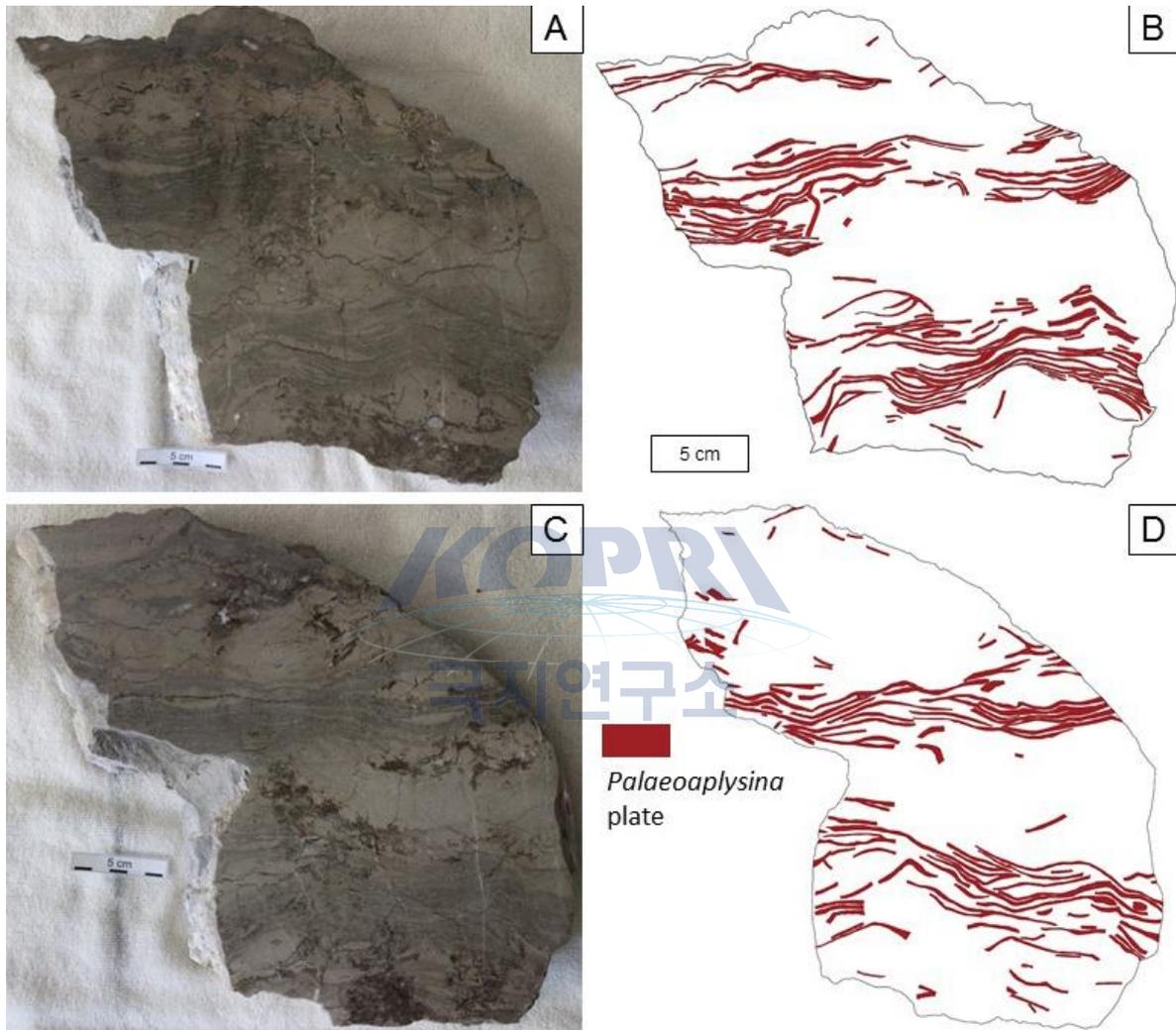


그림 4. *Palaeoaplysina* 생물초의 슬랩 사진과 스케치. 굴곡진 모양의 *Palaeoaplysina* 판들은 약 10 cm 내외의 두께로 조밀하게 분포하며 황색의 퇴적물 층과 교호하고 있다.

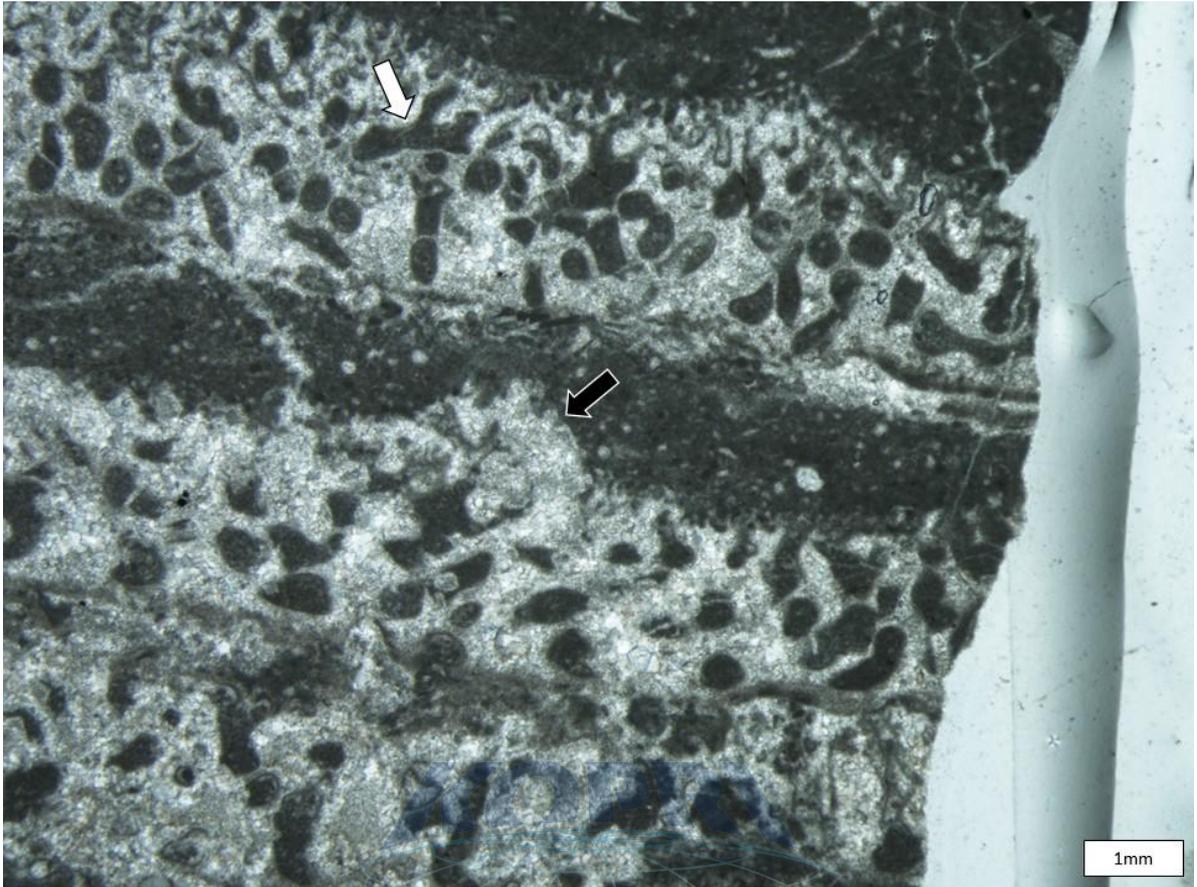


그림 5. *Palaeoaplysina*의 현미경 사진. 관상의 *Palaeoaplysina* 내부에는 석회 이질 퇴적물로 채워져 있는 분지상의 canal구조(흰 화살표), 윗면에 불룩 솟아 있는 mamelon(검은 화살표)와 윗면에 작은 구멍들이 관찰된다. canal 사이에는 방해석 교질물이 채워져 있다. *Palaeoaplysina* 관들이 서로 붙어 있거나(아래 부분) 한 매의 관(윗 부분)이 펠로이드 껍암에 둘러싸여있다.

박편의 총 면적 230.9 cm^2 를 분석한 결과 *Palaeoaplysina* 관들은 전체 박편 면적의 25.2%를 차지하고 있다. 총 117개의 관들 중 80.3%는 작은 구멍들이 뚫린 쪽이 박편의 상부를 향하여 놓여있는 정향 배열된 관이며 사교하거나 방향을 알 수 없는 관은 17.1%인 반면 뒤집힌 관은 2.6%로 극히 미미하다(그림 6).

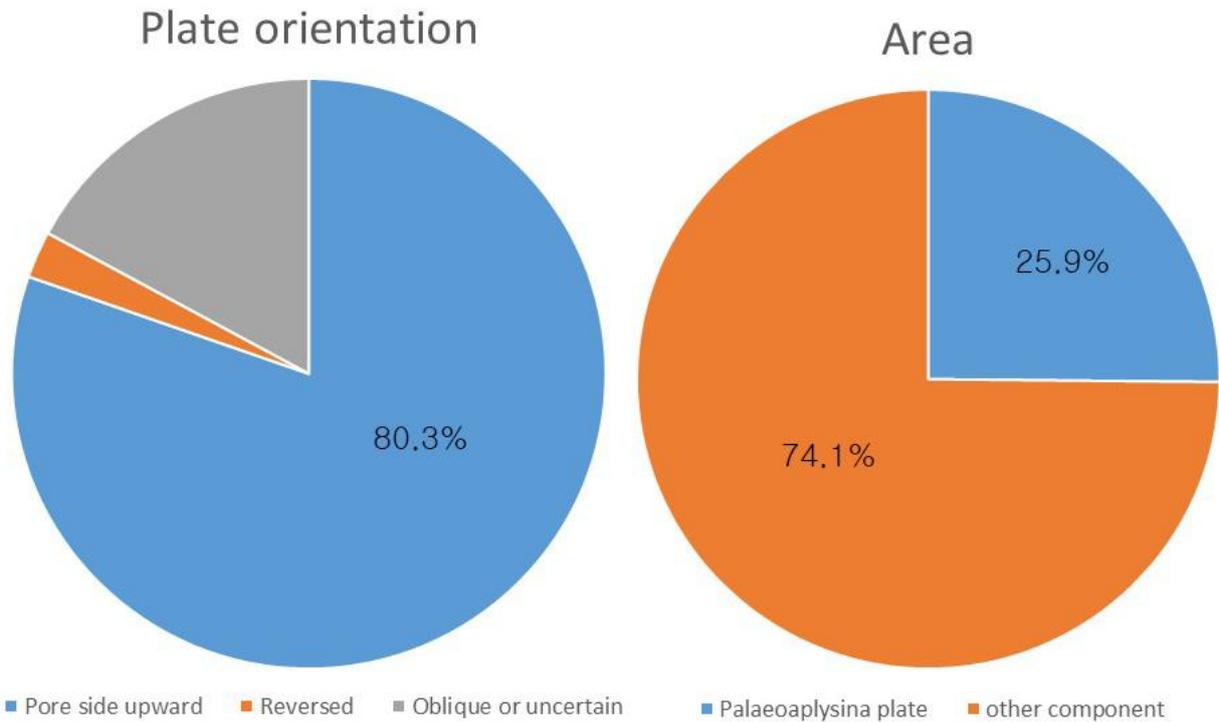


그림 6. 생물초에서 *Palaeoaplysina*가 차지하는 면적과 윗방향으로 놓여있는 판들의 비율.

	P6	P8	P11	P12	Total
Perforated side	0	0	0	1	1
imperforated side	2	2	3	6	13
Total	2	2	3	7	14

표 1. *Palaeoaplysina* 판 상부와 하부에 부착된 고착성 생물의 개수

이러한 판들은 수직적으로 인접한 여러 매의 판들이 부분적으로 또는 대부분의 면에 대하여 밀착되어 수 센티미터 두께의 구조를 이루거나 각각의 판들이 퇴적물에 둘러싸여 서로 떨어져 있다. *Palaeoaplysina* 판의 상부와 하부에는 몇몇 고착성 생물들이 관찰되는데 관찰된 시료에서는 주로 판의 하부에서 고착성 생물이 관찰된다(표 1). *Palaeoaplysina* 판의 밑면에는 주로 하부를 향하여 성장한 bryozoan이 관찰되고, 고착형 유공충의 경우 판의 상부와 하부에

서 모두 관찰된다. 위와 아래에 놓인 *Palaeoaplysina* 판 사이에는 펠로이드로 구성된 geopetal 퇴적물도 관찰된다(그림 7).

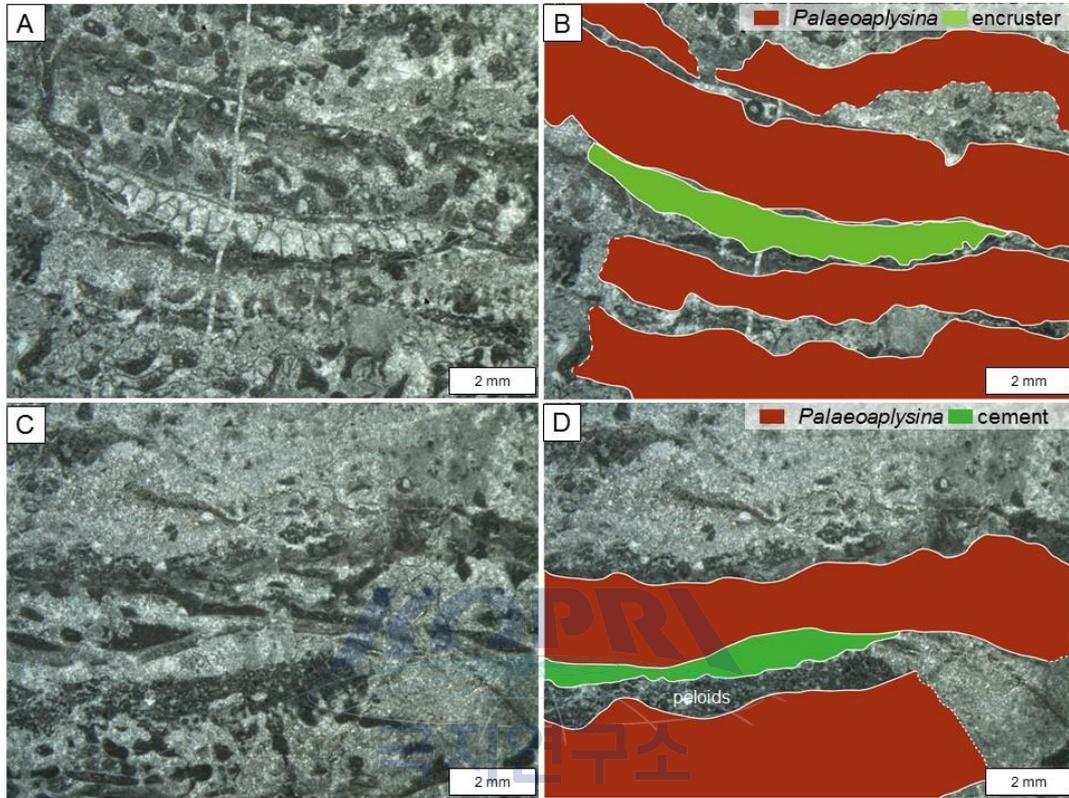


그림. 7. A-B) *Palaeoaplysina* 판 아랫면에 붙어있는 bryozoan의 현미경 사진과 스케치. C-D) *Palaeoaplysina* 판들 사이에 채우고 있는 펠로이드질의 geopetal 퇴적물과 방해석 교질물의 박편 사진과 스케치.

지금까지 Wordiekammen층의 *Palaeoaplysina* algal mound boundstone의 분석 결과는 석탄기 후기부터 페름기 초기의 초대륙 판게아의 북서부에만 분포했었던 분류미상의 판상 생물인 *Palaeoaplysina*가 기존의 통념보다 퇴적면을 encrusting하는 성질이 있음을 강하게 지시하고 있다(cf. Wray, 1977; Anderson and Beauchamp, 2014). *Palaeoaplysina* 판의 대부분(80.3%)이 구멍이 뚫린 면이 위로 배열되어 있고, 층리면에 평행하게 판들이 배열되어 있으며 얇고 긴 판이 판 하부의 굴곡을 따라 쌓여 있는 형태로 놓인 것은 생물초가 형성된 당시에 *Palaeoaplysina*가 조각 상태로 운반되어 퇴적된 것보다 성장한 모습 그대로 보존되었기 때문으로 보인다. 판과 판 사이에서 관찰되는 geopetal 구조와 판의 밑면에 부착하여 성장한

bryozoan이 관찰되는 것으로 보아 퇴적 당시에 판과 판의 사이에 공동이 존재했을 것으로 보이며 이 공동은 *Palaeoaplysina* 판들이 수차례 피복하며 형성된 일차 공동으로, 판의 밑면에 부착하여 나타나는 bryozoan은 cryptic encruster일 것으로 해석된다. 이것은 *Palaeoaplysina*가 직립하여 성장하는 형태로 해석할 경우 판이 원 위치(in situ)상태로 퇴적될 수 없기 때문에 나타날 수 없는 특징으로, 인접한 판들끼리 밀착되어 있는 모습, 일차 공동, 그리고 cryptic encruster의 존재는 *Palaeoaplysina*의 in situ growth와 encrusting habit을 주장하는 직접적인 증거가 될 수 있으며, 생물초의 형성에 있어 binder 및 판들이 중첩되어 생물초의 골격을 형성한 frame-builder 역할을 한 것으로 생각된다.

4. Wordiekammen *Palaeoaplysina*의 고생태학적 의의

*Palaeoaplysina*의 growth habit에 대한 기존 연구는 크게 erect habit을 주장하는 연구와 encrusting habit을 주장하는 연구로 나눌 수 있고 그 의견이 아직까지 분분하다. *Palaeoaplysina*의 성장 형태를 erect habit으로 해석하는 주장은 1) 해당 연구에서 관찰한 판 중 20%가 뒤집혀 있는 형태로 해석면에 encrusting habit으로 붙어 살았을 경우에는 대부분의 판이 같은 방향으로 배열되어 있어야 하고, 2) 두 plate의 접하는 상태가 바로 아래 판의 굴곡을 따라가지 않고 개별적이며, 3) encruster가 판의 하부에 부착되어 있는 것으로 보아 만약 *Palaeoaplysina*가 해석면에 부착되어 encrusting 형태로 자랐을 경우 encruster가 땅을 파고드는 형태로 자라야 하기 때문에 생물학적으로 불가능하고, 4) *Palaeoaplysina*와 형태적으로 유사한 Phylloid algae가 erect habit을 가지고 있으며, 5) 이들이 기저면에 부착했던 holdfast의 흔적이 보이지 않는다는 관찰들을 바탕으로 한다(Watkins and Wilson, 1989). Encrusting habit으로 해석하는 주장은 1) 뿌리와 같은 형태의 rhizome이 판의 바닥 부분에 붙어 있기 때문에 이를 통해 해석에 encrusting 하는 형태로 성장했을 것이라는 주장(Nakasawa et al., 2011), 2) 대부분의 판이 층리면에 평행한 형태로 나타나며 판의 윗면에 있는 작은 구멍이 있는 면이 지층의 상부를 향해 배열되어 있는 관찰들을 통해 *Palaeoaplysina*가 encrusting habit을 주장한다(Breuninger, 1976).

이 연구에서 관찰한 Wordiekammen *Palaeoaplysina* 생물초의 형태는 encruster가 판의 하부에 부착되어 있는 점과 Phylloid algae와의 형태적 유사성, 그리고 holdfast의 부재 등이

erect habit을 주장하는 논문에서의 관찰과 유사하나 Wordiekammen층의 *Palaeoaplysina*는 미미한 양의 판만이(2.6%) 뒤집혀 있고 판의 길이가 월등히 길며 상부와 하부 판이 같은 형태의 골곡을 보인다는 점에서 다르다(cf. Watkins and Wilson, 1989). *Palaeoaplysina* 판의 밑면에 부착된 encruster가 퇴적물로 둘러싸여 있는 것은 생물초의 growth cavity에 이질 퇴적물로 채워질 경우에도 나타날 수 있는 형태이므로 *Palaeoaplysina*가 erect habit이라는 해석에 대한 증거로서는 불충분하며 Phylloid algae와의 형태적 유사성을 통해 생태학적 역할의 유사성에 대해 해석하는 것에는 무리가 있고, holdfast의 존재는 화석화 작용 동안의 보존의 문제일 가능성이 있으므로 *Palaeoaplysina*의 erect habit을 주장하는 쪽의 증거는 growth habit을 유추하는 증거로 미흡하다. 반면에 *Palaeoaplysina*의 encrusting habit이라는 해석을 지지하는 증거인 대부분의 *Palaeoaplysina* 판들이 층리면에 평행하게 배열되어 있고 뒤집히지 않은 배열 상태를 보이는 것은 본 연구에서의 기재와 유사하나 이를 판이 원위치 상태로 보존되었다는 직접적인 증거로 보긴 어렵다(cf. Breuninger, 1976). 다른 간접 증거인 판의 아랫면에서 관찰되는 holdfast와 같은 기관은 이 연구에서는 관찰되지 않았으나 상기한 대로 속성 작용 동안의 보존 문제일 가능성이 있다(cf. Nakazawa et al., 2011). 본 연구에서 관찰한 인접한 판들끼리 밀착되어 있는 양태와 일차 공극의 존재를 보여주는 Wordiekammen *Palaeoaplysina*의 연구 결과는 *Palaeoaplysina*가 당시 encrusting habit을 가지고 서식하였다는 직접적인 증거를 처음으로 보여주는 것이며 겹겹이 쌓인 *Palaeoaplysina* 판들이 수직 성장하여 형성된 Wordiekammen 생물초에서 *Palaeoaplysina*는 binder 및 frame-builder로서 생물초의 골격을 형성하는데 기여했을 것으로 보인다.

제 3-2 절 Scheteligfjellet 석탄기 상판산호의 성장 특성과 고생태

다산기지 주변 후기 고생대 상판산호 연구에서는 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet층에서 산출된 석탄기 상판산호의 고생물학적 성장 특성을 고생태학적인 요인과 연결하여 분석해보고자 하였다. 현재 진행 중인 이 연구에서는 주로 석탄기-페름기에 유럽, 아시아, 북미 지역을 포함하여 전 세계에 걸쳐 살았던 것으로 알려진 auloporid 산호류들이 주요한 연구 대상으로 분석되었다(그림 8). 2014년에 실시된 다산기지 야외조사 기간에 확보된 다수의 산호 화석이 포함된 암석들을 실내 분석하였다. 대부분의 화석들은 외골격이 규화된 상태이며 또한

부분적으로 심한 reworking을 받아 온전한 상태의 개체가 많지 않았으며 이 점을 고려하여 10여 개 균체표품을 대상으로 개체의 증식과 균체의 성장특성을 파악하기 위한 횡단면 연속 박편(serial transverse sections)을 제작하였다. 분석을 위한 연속 박편의 간격은 1.5 - 2.0 mm로 하였으며 300 여개 의 박편이 제작되었다.

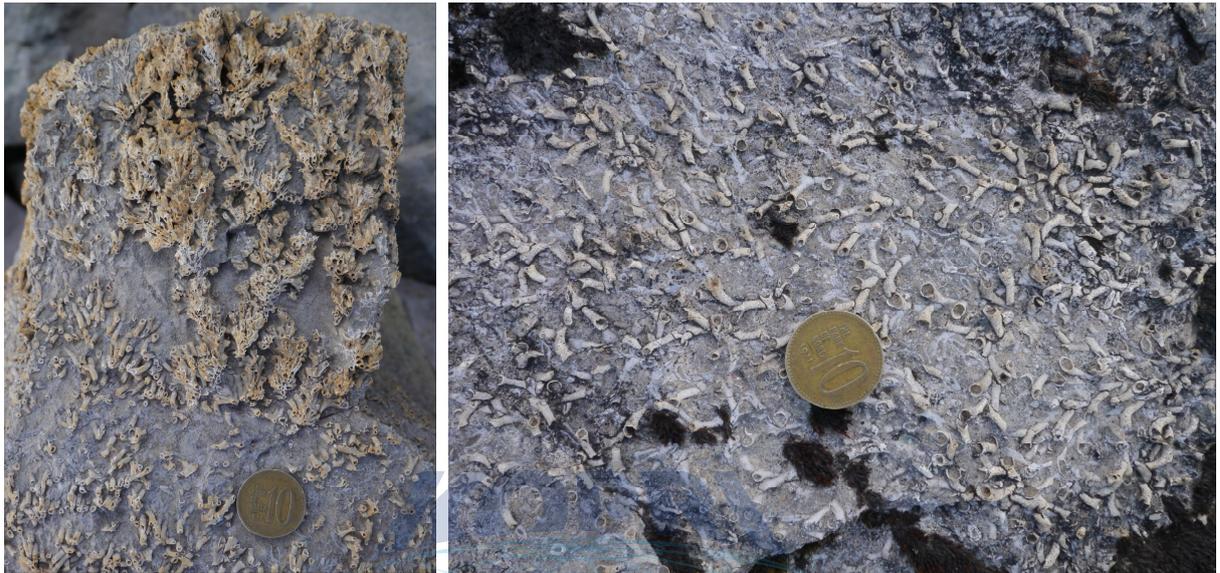


그림 8. Brøggerhalvøya 지역 석탄기 Scheteligfjellet 층에서 산출되는 산호화석들. 현재까지의 분석 결과 크게 2개 속에 속하는 auloporida목의 상판산호들이 확인되었다. 좌측은 phaceloid 혹은 덩불 형태의 성장 형태를 갖는 *Multithecopora*이며, 우측은 ‘기는 줄기’ 형태의 성장형을 갖는 *Aulopora*로 추정된다.

Scheteligfjellet 층에서 현재까지 분석된 상판산호는 *Multithecopora*와 *Aulopora*로 auloporida 목에 속한다(그림 8). 특히 *Multithecopora*는 2개 종(*M. syrinx*, *M. tchernychevi*)이 확인되었으며(그림 9), 이 2개 종은 1991년 Nowiński가 Spitsbergen의 Hornsund와 Isfjorden에서 기재한 바 있다. 이들은 주로 석탄기-페름기 사이에 USSR의 Donetsk Basin과 Spitsbergen에서 그 산출이 보고되었다(Nowiński, 1991).

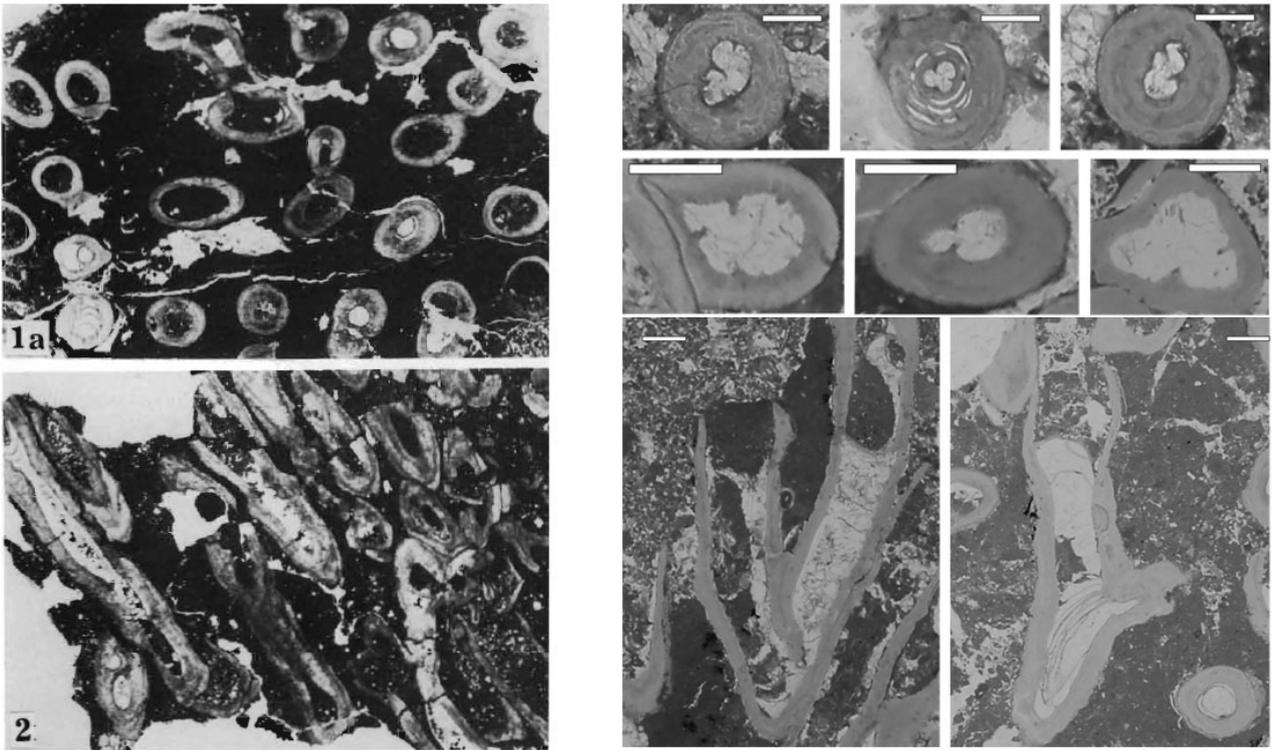


그림 9. *Multithecopora syrinx*의 횡단면 및 종단면 박편 사진. Nowiński (1991)가 보고한 Hornsund와 Isfjorden에서의 *M. syrinx*(좌측)와 유사한 형태의 *Multithecopora*가 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet층에서도 산출됨(우측). 우측 그림의 scale bar는 크기와 관계없이 모두 1 mm로 동일하다.

1989년, 1991년 Ludwig에 의해 수행된 Brøggerhalvøya Scheteligfjellet층 퇴적상 및 퇴적환경 연구에서 multithecoporid 산호의 존재는 기재된 바 있다. 또한 Buggisch et al. (2001)에서 이 산호를 *Multithecopora* cf. *syrinx*로 추정하였다. 이 상관산호에 관한 생물학적 분석 및 정확한 동정은 현재까지 이루어지지 않은 상태이지만, 2 m 두께의 이 multithecoporid가 포함된 탄산염암층은 기존 Nordenskiöldbreen층에 포함되었던 Scheteligfjellet 층원 (member)를 인지하는 중요한 기준층 (key bed)으로 알려져 왔다. 이 연구는 단순히 multithecoporid 혹은 *Multithecopora* cf. *syrinx*로 기재된 Scheteligfjellet층의 *Multithecopora*의 개체 증식과 성장 특성을 분석하여 보다 정확한 생물학적 동정과 분류를 목표로 계획되었으며, 나아가 비슷한 시기의 다른 고대륙에서 산출된 *Multithecopora*와의 비교를 통해 Spitsbergen의 *Multithecopora*가 갖는 지역적 특성이 있는지도 추가로 정리해볼

수 있을 것으로 보인다.



그림 10. Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet층에서 발견된 *M. tchernychevi*이 포함된 탄산염암을 10% 염산에 녹인 샘플. 가지상에 가까운 phaceloid형태의 *M. syrinx*와는 달리, *M. tchernychevi*는 한 세대마다 성장 시작 부분들이 수평적으로 연결되어 있는 특징을 보인다.

현재까지 진행된 *Multithecopora* 연구에서는 주로 두 종의 *Multithecopora*의 고생물학적 특징과 개체 증식 방식의 분석에 초점이 맞춰져 있는 상태이다. Scheteligfjellet층에서 발견된 두 개 종의 *Multithecopora*는 각각 현저하게 다른 외골격 형태를 갖고 있으며, 이 차이점으로 인해 종 단위까지의 동정이 가능했다. 그러나 *M. syrinx*에 비해 *M. tchernychevi*의 개체수는 현저하게 적으며, 이 종을 명확히 구별하기 위한 하단의 연결된 ‘성장판’을 찾지 못한 경우 phaceloid 성장형의 *M. syrinx*와 혼동될 소지가 존재한다. 현재 외골격 형태에서가 아닌, 연속 박편에서의 두 종의 차이점이 존재하는지 여부를 검증하기 위한 연구가 진행 중이며, 최종 결과에는 이를 반영하여 Scheteligfjellet층의 *Multithecopora*의 계통고생물학 분류 결과(systematic paleontology)를 보고할 예정이다.

Auloporid 목의 산호들은 대부분이 ‘기저 증식(basal-increase)’ 방식으로 개체 증식을 한다고 알려져 있지만, *Multithecopora*의 경우 단순 측면 증식(lateral increase) 으로만 보고되었으며(Hill, 1981) 어떤 과정을 거쳐 분열되는지에 대해서는 상세히 알려진 바 없다. 본 연구에서는 연속 박편 기법을 이용하여 *Multithecopora*의 성장 패턴을 분석하였다(그림 11).

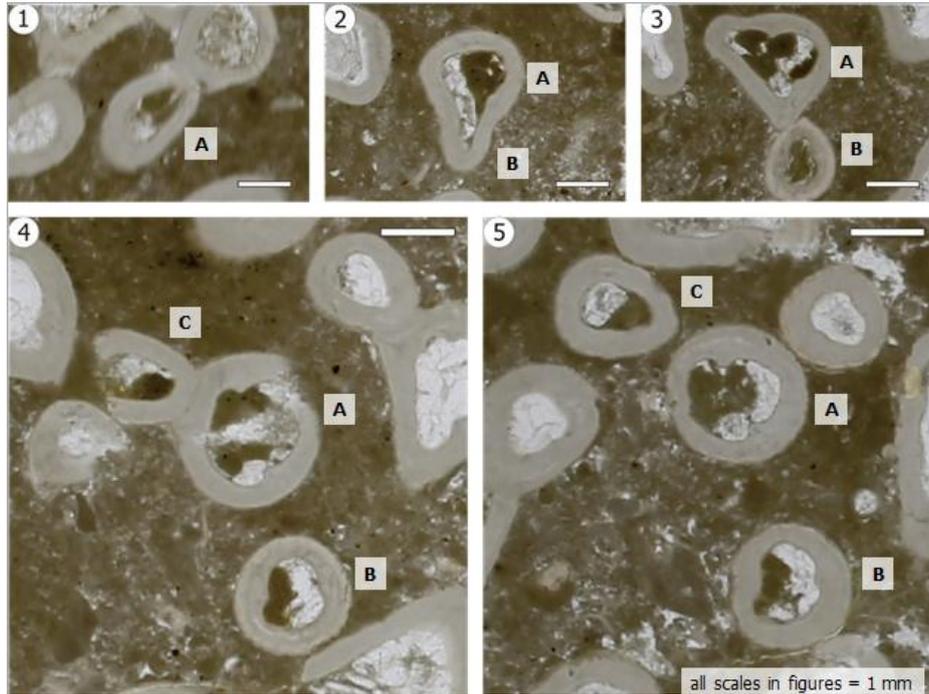


그림 11. 연속 박편에서 나타난 *Multithecopora syrinx*의 코랄라이트 개체 증식. 각 그림의 스케일은 1 mm로 동일하며 연속 박편간의 간격은 평균 1.5 mm이다.

극지연구소

단일 *Multithecopora*의 코랄라이트 개체가 증식할 수 있을 만큼 충분히 성장하면 (그림 11), 작은 발아체가 모체의 측면에서 돌출된다(그림 11.2B). 이 발아체가 충분히 성장하면 모체와의 사이에 벽이 생기면서 별개의 개체로 독립된다(그림 11.3B). 이와 같은 방식은 보통의 상판산호가 lateral increase할 때와 유사한 것으로 보이나, *M. syrinx*는 모체가 제 1발아체를 독립시킴과 동시에 제 2발아체를 생성하며(그림 11.3-5), 혹은 모체의 좌우에서 동시에 2개의 발아체가 발생했다가 순차적으로 또는 동시에 모체로부터 분리되는 경우도 관찰되었다. 또한 일반적인 상판산호에서와 달리, 발아체가 충분히 성장하기 전까지는 모체와 분리되지 않고 함께 성장하는 것으로 보인다. 이같은 개체 증식은 ‘기저 증식(basal increase)’으로 불리는 auloporida류 산호들이 증식하는 전형적인 방식인 것으로 추정되며(Scrutton, 1990), 일부 phaceloid 혹은 덩불처럼 보이는 *M. syrinx*의 계통 소속을 온전히 auloporida로 분류할 수 있는 근거가 될 수 있다.

Scheteligfjellet층에서 발견된 또 다른 종류의 상판산호인 *Aulopora*는, ‘기는 줄기’처럼 보이는 외골격 형태에 의거하여 분류되었다. *Multithecopora*와는 달리, *Aulopora*는 기존의

Scheteligfjellet층 연구들에서도 보고된 바가 없는데, 대체로 퇴적암 내부의 층리면(bedding plane)에 평행하게 보존되기 때문에 수직적인 측면에서는 외골격 형태가 완전히 보이지 않았을 것으로 추정된다. 또한 일부 골격 파편들만 보았을 때는 *Multithecopora*와의 차이점을 인지하기 힘들기 때문에 보고가 누락되었을 것으로도 볼 수 있다.

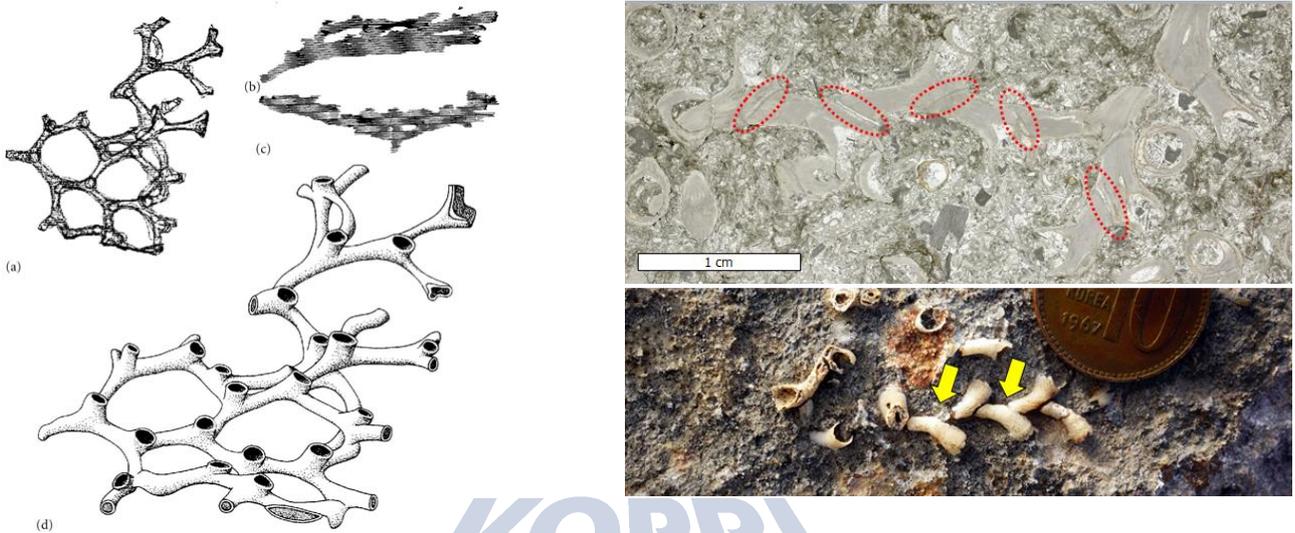


그림 12. 일반적으로 알려진 *Aulopora*의 성장 형태(좌측, Scrutton, 1990)와 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet층에서 산출된 *Aulopora*의 성장 형태(우측). *Aulopora*의 코랄라이트 개체가 분기되는 부분마다 분절되어 그 공간에 시멘트(cement)가 채워진 것이 보인다.

본 연구에서 분석한 바에 의하면, Scheteligfjellet층에서 산출된 *Aulopora*의 경우 기존에 보고된 *Aulopora*와는 현저하게 다른 방식의 성장형태를 갖고 있는 것으로 관찰되었다. 기존의 *Aulopora* 연구들에서는 calice의 벽면에서 새로운 코랄라이트가 돌출되어 basal increase(그림 11 참고) 방식으로 증식하는 방식이 주로 보고되어왔다(Hill, 1981; Scrutton, 1990).

Scheteligfjellet의 *Aulopora*의 경우, 단일 코랄라이트 개체가 성장할 때, ‘가지치기(branching) 방식’을 채택하지만 자세히 보면 모체에서 새로운 가지가 뻗어나갈 때 모체와 붙어 있던 부분이 일일이 분절되어 있는 것으로 보인다(그림 12). 연속 박편에서의 성장 방식 자체는 *Multithecopora*의 분석 결과와 동일하게 기저 증식 (basal increase)으로 증식하지만, 발아체가 완전히 성장한 이후에는 모체와의 연결이 끊어지는 형태로 보존된 것을 알 수 있다. 이는 그림 12 및 13에서도 알 수 있듯이, 대부분의 *Aulopora* 군체의 분리된 개체들 사이에 시멘트 (cement)가 채워져 있는 것으로 보아 보존상의 문제가 아닌 *Aulopora* 자체의 특징인 것으로 추정된다.



그림 13. Scheteligfjellet층의 *Aulopora*가 포함된 탄산염암을 10% 염산에 녹였을 때 추출된 산호의 코랄라이트 조각들. 일부는 가지상으로 분기된 부분이 분절되지 않은 경우도 있지만 (좌측, 백색 점선원) 대부분의 경우 하나의 방향성을 가진 짧은 단일 개체로 추출된다. 이들은 각각의 개체가 분리되어 있지만, 암석에 보존된 형태에서는 우측의 사진처럼 하나의 군체를 이루는 것처럼 보인다.

극지연구소

이와 같은 특징은 산 용액에 산호 군체가 포함된 탄산염암을 녹였을 때 더욱 두드러진다(그림 13). 이들 코랄라이트 가지들은 각각 분리가 가능하지만, 탄산염암에서 보존된 형태에서는 분리되지 않은 채 전체가 군체를 이룬 형태 그대로 유지되었다. 이와 같은 성장 형태의 *Aulopora*는 기존에 보고된 적이 전혀 없으며, 1) Scheteligfjellet층의 *Aulopora*가 독특한 특징을 갖는 고유종(endemic species)일 가능성 혹은 2) Scheteligfjellet층의 환경이 *Aulopora*의 생존에 영향을 미치는 외부 요인이 되어 성장 방식을 변화시켰을 가능성 등이 제기될 수 있다. 코랄라이트 가지들이 일일이 분절된 형태는 현생 산호들 중 *Acropora palmata*의 케이스에서 보고되었던 분절 증식(fragmentation) 방식의 무성 생식(asexual increase)의 한 종류와 유사하며(Lirman, 2000) 이는 외부 요인에 반응한 *Aulopora*의 생활사전략(life-history strategy)의 하나로도 볼 수 있을 것이다. 이에 관해서는 더 많은 자료의 수집과 준비가 필요한 상태이다.

석탄기-폐름기 시기는 전 세계적으로도 다양한 생물들이 보고되었던 시기이고, 특히

산호의 경우 상판산호나 사사산호 모두 다양한 종류가 알려져 왔다(Fedorowski, 1981). 그러나 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet층에서는 2개 속의 상판산호만 동정된 상태이다. 같은 고대륙인 Spitsbergen에서도, Honrsund와 Isfjorden의 경우 비슷한 시기에 훨씬 다양한 종류의 상판산호가 보고되었던(Nowinski, 1991) 것과 대조적으로 Scheteligfjellet층의 탄산염암에서는 기존 보고 뿐 아니라 현재까지의 분석에서도 산호 화석의 다양성이 떨어지는 경향을 보인다. 이 문제는 추가로 탄산염암 표본들을 확보하여 새로운 박편을 제작하는 동시에 기존 자료들의 철저한 재확인 작업을 거친 이후 Scheteligfjellet층에서 산출되는 산호류의 종류를 재확정하는 작업을 우선적으로 요구한다. 또한 타 대륙 혹은 Spitsbergen의 다른 지역과 Brøggerhalvøya지역의 고환경이 달랐을 가능성을 시사하며, 좀 더 정확한 고찰을 위해서는 후기 고생대 시기의 고환경 복원 연구가 병행되어야 할 것으로 전망된다.



제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

스발바르드섬 극지연구소 다산과학기지 서쪽에 발달하는 후기고생대 Wordiekammen층에서 2014년 8월 야외조사 중 발견된 석회질 조류 *Palaeoaplysina*로 이루어진 생물초는 지금까지 석탄기 후기부터 페름기 중기에 관계아 초대륙의 서쪽 경계에서만 분포하였던 것으로 알려져 있다(Davies and Nassichuk, 1973). 생물학적 분류미상의 *Palaeoaplysina*가 어떠한 퇴적학적 역할을 통하여 생물초를 형성하였는지에 대하여 아직 분명하게 밝혀진 바가 없기 때문에 이러한 석회질 조류 생물초가 형성되는 퇴적환경을 이해하기 위하여 석회질 조류 생물초 상하위층의 퇴적상을 분석하였으며, 30 μ m 두께로 정밀 가공된 생물초 박편 샘플로 생물초 boundstone의 미세 퇴적상 분석(microfacies analysis)을 실시하였다. 1차년도 목표였던 *Palaeoaplysina* 생물초의 발달 특성 및 고생태 규명을 위하여 야외 지질조사 기초자료 및 생물초 geometry를 정리하고, 후기고생대 Wordiekammen층의 퇴적환경을 분석하였으며, 또한 *Palaeoaplysina* 생물초의 고생태 규명하기 위하여 *Palaeoaplysina*에 대한 기초 문헌조사 및 정리, 그리고 *Palaeoaplysina* boundstone의 현미퇴적상(microfacies) 분석을 실시하였다. 1차 년도 연구를 통하여 획득한 자료를 바탕으로 2016년 춘계 지질과학 공동학술대회에서 결과를 발표하고 이를 2017년 상반기에 SCI(E)급 학술지에 논문을 투고할 예정이다.

현재까지 진행된 *Multithecopora* 연구에서는 주로 두 종의 *Multithecopora*의 고생물학적 특징과 개체 증식 방식의 분석에 초점이 맞춰져 있는 상태이다. Scheteligfjellet층에서 발견된 두 개 종의 *Multithecopora*는 각각 현저하게 다른 외골격 형태를 갖고 있으며, 이 차이점으로 인해 종 단위까지의 동정이 가능했다. 그러나 *M. syrinx*에 비해 *M. tchernychevi*의 개체수는 현저하게 적으며, 이 종을 명확히 구별하기 위한 하단의 연결된 ‘성장판’을 찾지 못한 경우 phaceloid 성장형의 *M. syrinx*와 혼동될 소지가 존재한다. 현재 외골격 형태에서가 아닌, 연속 박편에서의 두 종의 차이점이 존재하는지 여부를 검증하기 위한 연구가 진행 중이며, 최종 결과에는 이를 반영하여 Scheteligfjellet층의 *Multithecopora*의 계통고생물학 분류 결과(systematic paleontology)를 보고할 예정이다.

또한 *Aulopora*의 경우 스발바르드 섬에서 보고된 적이 없는 상판산호의 속으로, 대체로 퇴적암 내부의 층리면 (bedding plane)에 평행하게 보존되기 때문에 수직적인 측면에서는 외골격 형태가 완전히 보이지 않았을 것으로 추정된다. 또한 일부 골격 파편들만 보았을 때는

*Multithecopora*와의 차이점을 인지하기 힘들기 때문에 보고가 누락되었을 것으로도 볼 수 있다. 이 *Aulopora* 산호는 또한 기존에 보고된 다른 *Aulopora*들이 보인 성장 패턴과는 전혀 다르기 때문에 (i.e. Scrutton, 1990) 이러한 차이점이 생물학적 기반인지 혹은 환경적 요인인지를 추가적으로 분석하여 보고할 예정이다.

2차년도의 목표였던 Scheteligfjellet층에서 발견된 각 산호류의 동정을 위하여 야외 지질조사 기초자료 및 분석용 자료들을 제작하고, 후기고생대 Scheteligfjellet층의 퇴적환경을 분석하였으며, 또한 auloporid 산호류에 대한 기초 문헌조사 및 정리를 실시하였다. 2차년도 연구를 통하여 획득한 자료를 바탕으로 이를 2017년에 SCI(E)급 학술지에 논문을 투고할 예정이다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

전기고생대 이후 본격적으로 발달하던 고생대 생물 및 탄산염 퇴적체는 데본기 후기의 대량 멸종사건(Frasnian-Famennian mass extinction) 이후 급격히 쇠락하였다. 이 사건 직후부터 시작된 후기고생대는 생물 다양성의 관점에서 보면 중생대 트라이아스기부터 오늘날까지 이어져 온 현생 생물군으로 진화하기 직전의 시기로, 특히 중기 석탄기-후기 페름기 동안 번성한 석회질 조류 및 저서 고착성 후생동물들에 의한 생물초는 중생대 및 오늘날의 지구 시스템 형성을 이해하기 위해 매우 중요하다.

스발바드 섬에는 지질학적으로 중요한 연구가 수행될 곳이 다수 있음에도 불구하고 최근 우리나라 극지연구소의 다산기지가 건설되기 전까지는 국내 연구자들의 접근이 원천적으로 어려웠고, 또한 야외조사 수행이 어려운 환경 때문에 유럽 국가들과 비교하여 지금까지 우리나라 연구자들에 의하여 제대로 연구될 수 있는 기회가 거의 없었다. 지난 10여년간 국내 연구진에 의하여 꾸준히 진행된 우리나라와 동아시아 인근 지역의 전기 고생대 고착성 생물과 생물초의 연구를 통하여 (Hong et al., 2012; Kwon et al., 2012; Choh et al., 2013; Hong et al., 2014; Lee et al., 2014a; Lee et al., 2014b; Hong et al., 2015; Oh et al., 2015; Park et al., 2015) 축적된 연구방법론과 연구 인력을 활용하여 후기고생대 *Paleoaplysina* 및 산호 생물초에 대한 연구는 국내에서 처음으로 시도되는 것이며, 저서 고착형 생물의 성장 과정, 퇴적 환경, 그리고 이러한 생물들의 퇴적학적 역할에 대한 이해를 증진하는 데 기여할 것이다. 또한 스피츠베르겐 섬에서 나타나는 후기 고생대 탄산염암의 생성 환경을 바탕으로 한반도에 분포하는 동시기 탄산염암에 대한 이해도 크게 증진시킬 수 있으리라 기대된다. 강원도 태백 지역 일대의 태백산분지에는 석탄기-트라이아스기에 퇴적된 평안누층군이 노출되어 있으나, 이들은 거의 대부분 쇄설성 퇴적암으로 이루어져 있다. 이 시대의 지층들 중 주로 탄산염암으로 이루어진 퇴적층은 영월 일대에 분포하는 밤치층이 유일하나 스러스트 역단층에 의하여 제한적으로 노출되어 있는 밤치층은 아직까지 현대적 관점에서 퇴적학 및 고생물학적 조사가 이루어지지 않았다. 향후 밤치층에 대한 지질학적 연구를 스피츠베르겐 섬에서 얻어지는 결과와 비교하여 진행하면 이는 아직까지 국내 학계에서 이해가 부족한 후기 고생대의 고환경 변화를 이해하는데 도움이 될 것이다.

이 연구에서 주로 다루는 산호류와 *Paleoaplysina*는 석탄기-페름기 시대에 주로 생물초를 형성하는 주요 생물초 구성원으로, 이들의 퇴적학적 및 고생태학적 의의를 이해하면 당시 탄산염 대지에 이러한 생물초가 어떻게 분포하였는지를 유추하는데 큰 도움이 될 수 있다. 특히 *Paleoaplysina* 생물초는 속성작용을 거치면서 높은 공극률을 발달할 수 있기 때문에 석유의 저류암으로 작용할 수 있기 때문에 현재 북해, 바렌트해, 러시아 등지에서 상업적으로 석유를 생산하고 있다. 따라서 후기 고생대 탄산염암층에서 석유를 생산할 수 있는 잠재적 저류암의 이해를 통하여 향후 해외 자원개발의 현장에서 동시대 지층의 경제적 가치를 재평가할 수 있는 노하우를 국내 연구진이 보유할 수 있다는 점에서 이 연구는 경제적인 측면에서 잠재적으로 우리나라에 큰 도움이 될 가능성이 있다고 사료된다. 또한 이 과제에 참여하는 연구원들은 야외지질조사, 실험실에서 암석의 정밀 가공과 분석, 그리고 자료 처리 등을 수행하면서 단순 연구 보조원이 아니라 학술연구의 능동적 주체로 성장할 수 있는 기회를 가질 수 있을 것이다. 이를 위하여 석사 및 박사과정 학생들의 연구주제를 본 과제와 연계시키고 재정적 지원을 통하여 연구에 대한 참여의식을 높여 능동적으로 창의적으로 연구에 참여하도록 유도하여 장차 우수한 연구역량을 지닌 차세대 신진 연구 인력의 양성을 도모할 것이다. 이 과제를 수행하며 양성된 연구 인력은 순수 지질과학 연구뿐만 아니라 석유와 천연가스 등 화석연료와 탄산염분지에 수반되는 증발암 등과 같은 생물 기원 탄산염 퇴적체에서 생산될 수 있는 에너지 및 광물자원의 탐사와 분야로도 진출할 수 있을 것으로 기대된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

특이사항 없음.



제 7 장 참고문헌

- Anderson and Beauchamp, 2014, Paleobiology and paleoecology of Palaeoaplysina and Eopalaeoaplysina new genus in Arctic Canada: *Journal of Paleontology*, 88, 1056-1071.
- Beauchamp et al., 1989, Upper Paleozoic stratigraphy and basin analysis of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago. Part 1: Time frame and tectonic evolution, p. 105-113. In *Current Research, Part G*, Geological Survey of Canada Paper 89.1G.
- Breuninger, R. H., 1976. Palaeoaplysina (Hydrozoan?) Carbonate build-ups from upper Paleozoic of Idaho. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 60, 584-607.
- Buggisch, W., Joachimski, M., Lützer, H., Thiedig, F., Hüneke, H., 2001. Conodont stratigraphy of the Carboniferous and Permian strata from Brøggerhalvøya and Billefjorden Trough. *Geologisches Jahrbuch B91*, 637-689.
- Choh, S.-J., Hong, J., Sun, N., Kwon, S.-W., Park, T.-Y., Woo, J., Kwon, Y.K., Lee, D.-C., Lee, D.-J., 2013. Early Ordovician reefs from the Taebaek Group, Korea: constituents, types, and geological implications. *Geosciences Journal* 17, 139-149.
- Davies, G.R., 1971. A Permian Hydrozoan mound, Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 973-988.
- Davies and Nassichuk, 1973, The Hydrozoan? Palaeoaplysina from the upper Paleozoic of Ellesmere Island, Arctic Canada. *Journal of Paleontology*, 47:251 - 265.
- Fedorowski, J., 1981. Carboniferous corals: distribution and sequence. *Acta Palaeontologica Polonica* 26, 87-160.
- Fenton, M.A., Fenton, C.L., 1937. Aulocaulis, a new genus of Auloporoid corals. *American Midland Naturalist* 18, 119-128.
- Flügel, 2004, *Microfacies of carbonate rocks, analysis, interpretation and application*. Springer, Berlin.
- Hill, D., 1981. Rugosa and Tabulata. *Treatise on invertebrate paleontology, Part F, Coelenterata, Supplement 1*. Geological Society of America, Boulder, Colorado and University of Kansas Press, Lawrence, (762 pp.).

- Hong, J., Cho, S.-H., Choh, S.-J., Woo, J., Lee, D.-J., 2012. Middle Cambrian siliceous sponge-calcimicrobe buildups (Daegi Formation, Korea): Metazoan buildup constituents in the aftermath of the Early Cambrian extinction event. *Sedimentary Geology* 253-254, 47-57.
- Hong, J., Choh, S.-J., Lee, D.-J., 2014. Tales from the crypt: early adaptation of cryptobiontic sessile metazoans. *Palaios* 29, 95-100.
- Hong, J., Choh, S.-J., Lee, D.-J., 2015. Untangling intricate microbial - sponge frameworks: The contributions of sponges to Early Ordovician reefs. *Sedimentary Geology* 318, 75-84.
- James and Wood, 2010, Reefs. In: N.P. James, R.W. Dalrymple (Eds.), *Facies Models* 4, Geological Association of Canada, St. John's, pp. 421-447.
- Kiessling et al., 1999, Evaluation of a comprehensive database on Phanerozoic Reefs. *AAPG Bulletin*, 83:1552 - 1587.
- Krotov, P., 1888. Geologicheskaya izsledovaniya na Zapodnom sklon Solikamskovo i Cherdynskagos Urala. *Trudy Geologicheskago Komiteta* 6, 431-434.
- Kwon, S.-W., Park, J., Choh, S.-J., Lee, D.-C., Lee, D.-J., 2012. Tetradiid-siliceous sponge patch reefs from the Xiazhen Formation (late Katian), southeast China: A new Late Ordovician reef association. *Sedimentary Geology* 267-268, 15-24.
- Lee, J.-H., Chen, J., Choh, S.-J., Lee, D.-J., Han, Z., Chough, S.K., 2014a. Furongian (late Cambrian) sponge-microbial maze-like reefs in the North China Platform. *Palaios* 29, 27-37.
- Lee, M., Sun, N., Choh, S.-J., Lee, D.-J., 2014b. A new Middle Ordovician reef assemblage from north-central China and its palaeobiogeographical implications. *Sedimentary Geology* 310, 30-40.
- Lirman, D., 2000. Fragmentation in the branching coral *Acropora palmata* (Lamarck): growth, survivorship, and reproduction of colonies and fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 251, 41-57.
- Ludwig, P., 1989. Mittelkarbonische Beckenentwicklung auf der Broggerhalbinsel (Svalbard): Sedimentologische Profilvergleiche und deren fazielle und tektonische Deutung. *Polarforschung* 59, 79-99.

- Ludwig, P., 1991. The marine transgression in the Middle Carboniferous of Brøggerhalvøya (Svalbard). *Polar Research* 9, 65-76.
- Nakazawa, T., UENO, K., Kawahata, H., Fujikawa, M., 2011. Gzhelian - Asselian Palaeoaplysina – microencruster reef community in the Taishaku and Akiyoshi limestones, SW Japan: implications for late Paleozoic reef evolution on mid-Panthalassan atolls. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 310, 378-392.
- Nowiński, A., 1991. Late Carboniferous to Early Permian tabulata from Spitsbergen. *Palaeontologia Polonica*, no. 51. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, (74 pp.).
- Oh, J.-R., Choh, S.-J., Lee, D.-J., 2015. First report of *Cystostroma* (Stromatoporoidea; Ordovician) from Sino-Korean Craton. *Geosciences Journal* 19, 25-31.
- Park, J., Lee, J.-H., Hong, J., Choh, S.-J., Lee, D.-C., Lee, D.-J., 2015. An Upper Ordovician sponge-bearing micritic limestone and implication for early Palaeozoic carbonate successions. *Sedimentary Geology* 319, 124-133.
- Scrutton, C.T., 1990. Ontogeny and astogeny in *Aulopora* and its significance, illustrated by a new non-encrusting species from the Devonian of southwest England. *Lethaia* 23, 61-75.
- Suchy, D.R., West, R.R., 2001. Chaetetid buildups in a Westphalian (Desmoinesian) Cyclothem in Southeastern Kansas. *Palaios* 16, 425-443.
- Vachard, D., Kavanov, P., 2007. *Palaeoaplysina* gen. nov. and *Likinia Ivanova* and *Ilkhovkii*, 1973 emend., from the type Moscovian (Russia) and the algal affinities of the ancestral palaeoaplysinae n. comb. *Geobios* 40, 849-860.
- Watkins and Wilson, 1989, Paleoecologic and biogeographic significance of the biostromal organism *Palaeoaplysina* in the Lower Permian McCloud Limestone, Eastern Klamath Mountains, California. *PALAIOS*, 4:181 - 192.
- Wahlman, G.P., 2002. Upper Carboniferous - lower Permian (Bashkirian - Kungurian) mounds and reefs, In: Kiessling, W., Flügel, E., Golonka, J. (Eds.), *Phanerozoic Reef Patterns*. SEPM Special Publication 72, Tulsa, Oklahoma, pp. 271 - 338.
- Wray, 1977, *Calcareous Algae*. Elsevier, Amsterdam, 185 p.



1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.