



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

慶北大學校 理學碩士學位論文

제주도 서귀포층의 가리비 화석에
나타나는 해면동물의 천공 구조:
엔토비아(*Entobia*)

大學院 地質學科 古生物學專攻

李 美 熙

2015年 6月

慶北大學校 大學院

제주도 서귀포층의 가리비 화석에 나타나는 해면동물의 천공 구조: 엔토비아(*Entobia*)

이 論文을 理學碩士 學位論文으로 提出함

大學院 地質學科 古生物學專攻

李 美 熙

指導教授 李 成 周

李美熙의 理學碩士 學位論文을 認准함

2015年 6月

委員長_____인

_____인

_____인

慶北大學校 大學院委員會

목 차

목차	i
List of Figures	ii
1. 서언	1
2. 지질개요	3
3. 시료 및 연구 방법	6
3-1. 시료	6
3-2. 연구 방법	8
4. 생침식	11
5. 가리비 화석 표면의 천공 구조	13
5-1. 천공구조	13
5-2. 해면동물의 천공 구조	17
6. 엔토비아의 내부 구조	23
7. 기재	29
8. 토의	34
8-1. 엔토비아의 분류	34
8-2. 천공배열	35
9. 결론	38
참고문헌	39
Abstract	48

List of Figures

- Figure 1. Geologic map of study area. The Seogwipo Formation is well exposed along the rock cliff of Namseongjung-ro. Diverse scallop fossils containing *Entobia* structures were collected at western cliff of the study area. 5
- Figure 2. Various calcareous fossils found from the Seogwipo Formation. (A) Bivalves, (B) scaphopods, (C) gastropods, (D) brachiopods, (E) echinoids and (F) corals. Fossils of bivalves and brachiopods are found in assemblages while others occur sporadically. 7
- Figure 3. Procedures of the embedding technique. The bored shell is reacted with H_2O_2 in order to remove organic material, and then dried after cleaning in ultrasonic bath for 3 minutes. The araldite were poured under vacuum conditions and cured for 48 hours at 60 °C. The sample is then reacted with 5 % HCl and NaClO for removal of calcareous substrate and organic matter. The resin-cast of the sample is observed under SEM (modified from Wisshak, 2012). 10
- Figure 4. Various types of endoliths in relation to carbonate substrate. Chasmoendoliths live inside ready-made cracks and fissures; cryptoendoliths fill preexisting pores within the substrate. Euendoliths (Eu means true) actively

penetrate the carbonate substrate (modified from Golubic et al., 1975). 12

Figure 5. Boring structures made by various organisms. Polychaete worms produce U-shaped boring structures. Only paired circles and/or dumb-bell shaped structures are observed on the surface, while sinuous tunnel structures are visible when exposed. Gastropods make more or less large circular holes with inclined or vertical walls. Boring structures made by sponge represent small circle shapes on shell surface that are connected each other through complex internal networks. 15

Figure 6. Boring structures of polychaetes and gastropods on fossil shells from the Seogwipo Formation. (A-D) Ellipse, dumb-bell and tube-shape borings made by polychaete worms. (C) Complicated internal structures are exposed when outer layer of shell is removed. (E-F) Large circular structures made by gastropods. Scale bar in (F) is 1cm for all figures. 16

Figure 7. Excavating mechanism of boring sponge. The etching cell initiates to penetrate carbonate shells by means of both chemical and mechanical actions. After dissolving carbonates using chemical acid in early stage, the cells remove weakened substrate (sponge chips) by mechanical scooping. Sponge chips isolated from the shell are released to water

column through osculum. Finally complicated internal networks containing *Entobia* balls are formed inside the shells, and released sponge chips are often found in the sediments near carbonate shells (modified from Hatch, 1974 and Pomponi, 1980). 19

Figure 8. Sketch of fully developed *Entobia* structure, showing a succession of growth phases (A-D). Larval cells of sponge initiate to penetrate vertically into carbonate shells forming exploratory tubules (A). When growth continues, the tubules become swollen to form elliptical chambers (C) to spherical *Entobia* balls (D). The chambers are connected each other by intercameral canals (B) of variable shapes. In the course of *Entobia* growth, tubules divide to make branch-like tunnel structures, finally forming complicated *Entobia* networks. The surfaces of *Entobia* are generally ornamented by tiny tubules, apophyses (after Radwski et al., 2011). ... 20

Figure 9. Densely developed *Entobia* holes on fossil scallops. Holes are distributed linearly (A, B) or randomly (C, D) on the shell surfaces. (C) Random or linear distribution of holes are often observed together on a same shell surface. (D) Empty internal structure of shells are clearly seen in a vertical view of shells. Scale bar in (D) represents 3cm for all figures. 21

Figure 10. Surface holes (left ones in all pictures) and

complicated internal networks of *Entobia* (right ones in all pictures). Internal networks are pictures taken under a strong light inside, where networks are observed as dark lines. (A, B, E) External view of *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis* and (C) *Chlamys* sp., and (D) internal view of an unidentified scallop. Polygonal dark area in (C) is a fossil bryozoan colony attached on shell surfaces. (E) If the shell is thick, internal structure can't observe using light transmission. Scale bar in (E) represents 5cm for all figures. 22

Figure 11. SEM pictures of *Entobia ovula*. (A) Panoramic view of resin-cast of a shell fragment of a fossil scallop (dashed line of right coner). (B) Details [rectangular in (A)] of linearly positioned *Entobia* balls, characterized by a series of ball attached one another and bumpy surface ornamentation. (C) Close view of surface structure, reminiscent of mechanical scooping by etching cells of boring sponge. Scale bar in (A) represents 5 mm. 25

Figure 12. Close view of *Entobia ovula*. (A, B, C) Spherical to ellipsoidal *Enbotia* balls are connected one another by short intercameral canals, and horizontally emerged tubules are visible. (D) Raspberry-like bumpy surface with tiny apophyses in upper parts of large tubules. (E) Cylindrical tubule without an *Entobia* ball is often connected directly to

an aperture. (F) A few micro-endoliths are accompanied with *Entobia ovula*. Scale bar in (F) is 0.5 mm. 26

Figure 13. SEM pictures of *Entobia megastoma*. (A) Panoramic view of resin-cast of a fossil scallop's fragment (dashed line of right coner). (B, C) Detail view of rectangle in (A) showing a diagnostic feature of *Entobia megastoma*, (B) flat polygonal to irregular balls connected randomly, and (C) bumpy surface structure. Scale bar in (A) is 5 mm. 27

Figure 14. Close view of *Entobia megastoma* of Fig. 13 (A). Diverse *Entobia* balls (A; spherical, C; polygonal, D; ellipsoidal) are often connected by thick tunnels. (B) Tiny and tapered apophyses are generally developed on the *Entobia* surfaces. (E, F) Initial sturcture of *Entobia* and a great number of micro-endolithic structures are observed near *Entobia megastoma*. Scale bar in (F) is 0.5 mm. 28

Figure 15. Sketch of two *Entobia* species identified in scallop fossils of the Seogwipo Formation, showing both external holes (upper and left side) and internal networks (lower and right side); (A) *Entobia ovula*, (B) *Entobia megastoma*. *E. ovula* is characterized by a linear arrangement of chambers, while chambers in *E. megastoma* are connected more or less randomly. (A) Such an arrangement in *E. ovula* is also identifiable as a linear distribution of circular holes in the surface of scallop fossils. 33

1. 서언

천공생물(borer)이란 암석이나 패각의 표면을 파고들어 구멍을 형성하는 생명체로, 복족류, 환형동물, 해면동물 및 태형동물 등이 대표적이다(Pohowsky, 1978; Casadio et al., 2001; Wilson, 2007). 이 외에 남조세균(Dong et al., 2007; Radtke and Golubic, 2011), 조류(Verbruggen and Tribollet, 2011) 및 균류(Golubic et al., 2005) 등의 다양한 미세생명체(microorganisms)도 패각이나 암석의 표면을 침식하는 것으로 알려져 있다. 이들은 일반적으로 포식활동(예, 복족류)이나 새로운 서식지 확보(예, 남조세균) 및 몸체 고정(예, 해면동물) 등을 위하여 기질의 내부를 파고들기 때문에 천공생물이 서식하는 기질들은 생침식 과정(bioerosion)에 의해 붕괴된다(Thomas, 1979; Mao Che et al., 1996).

천공생물에 의한 생침식의 대상이 되는 기질의 대부분은 석회질 광물로 이루어진 패각이나 암석으로 연체동물의 패각(Mikulas and Pek, 1996; Kaehler and McQuaid, 1999)이나 산호(Shashar et al., 1997; Glynn, 1997; Kolodziej et al., 2011; Tribollet and Golubic, 2011), 석회조류(Tribollet and Payri, 2001; Ghirardelli, 2002) 및 석회질 암석(Donn and Boardman, 1988; Blissett et al., 2006)의 표면 등이 천공생물에 의한 생침식의 대상이 된다. 대상 기질에 대한 생침식의 정도는 천공생물의 종류에 따라 다소 차이가 있으며 일반적으로 두 종류 이상의 천공생물이 존재하는 경우 침식의 강도는 증폭되어 암석은 보다 쉽게 파괴된다. 예를 들어, 미세조류(예, 남조세균)에 의해 생침식이 진행

중인 패각의 표면에 복족류가 서식하는 경우(Schneider and Torunski, 1983) 두 생물체의 공동작용(synergistic effect)에 의해 패각은 쉽게 파괴된다. 즉, 미세조류를 섭식하기 위해 표면을 갉아먹는 복족류와 이를 피해 패각 속 더 깊이 파고드는 미세조류의 활동이 기질을 더 빠르게 침식시킨다. 또한 천공생물에 의해 약해진 기질은 작은 물리적 충격에도 쉽게 파괴되기 때문에 천공생물이 서식하는 석회질 암석의 표면이나 패각은 쇄설성 암석에 비해 비교적 빠른 침식작용이 일어난다.

천공생물들은 기질 내에서 저마다 고유한 형태의 생침식 구조를 형성한다. 이러한 특징을 이용해 환경을 복원하는 등 다양한 연구가 가능하다(Glaub, 1999; Vogel et al., 1999; Wisshak et al., 2005). Hannon and Meyer(2014)는 고생대층에서 산출된 생침식 구조를 이용해 고환경을 복원하였으며, Chazottes et al.(2009)은 산호 화석에서 산출되는 천공생물의 흔적을 이용해 당시 고수심을 복원하였다. 또한 Urchman et al.(2001)은 암석해안에서 산출되는 천공 구조를 이용해 상대적인 해수면 변화를 유추하였다.

제주도 서귀포층에서 산출되는 이매패류의 패각에서 다양한 생침식 구조가 발견되었다. 그 중 해면동물에 의해 형성된 천공 구조인 엔토비아(*Entobia*)에 대해 좀 더 면밀히 관찰하였다. 이러한 연구는 국내에서 처음 시도될 뿐 만 아니라 세계적으로도 보고된 사례가 드물다. 다양한 생물들이 만들어낸 천공 구조의 연구는 생물의 다양성, 천공 구조의 분류, 고생태 해석, 암석 풍화와의 상관관계, 암석의 순환 등 다양한 정보를 제공할 것이다.

2. 지질개요

서귀포층은 제주도 형성 초기에 퇴적된 층으로 일본인 학자인 Haraguchi(1931)에 의해 처음 명명되었다. 이 층은 “북촌-표선 선”을 기준으로 제주도 지하의 서쪽 전역에 평균 100 m 정도 두께로 분포하고 있으며(오진용 외, 2000), 천지연 폭포 입구의 해안절벽을 따라 약 1.5 km에 걸쳐 두께 약 30 m 정도로 노출되어 있다(Fig. 1). 이곳은 보존이 양호한 다양한 패류화석을 포함하고 있기 때문에 1968년에 천연기념물 제195호(제주 서귀포층 패류화석 산지)로 지정되어 보호받고 있다. 패각 외에도 상어 이빨(이용남 외, 2014), 석회질 초미화석(You et al., 1987; Yi et al., 1998), 유공충(정규귀 외, 1997; Kang et al., 1999), 개형충, 성게 및 극피동물 등의 화석과 다양한 혼적화석(Kim and Heo, 1997)이 보고되었다.

서귀포층의 형성 연대는 다양한 화석과 고지자기 연구를 통해 제시되었다. 각각의 결과는 약간의 오차를 보이지만 전반적으로 신생대 제3기 말에서 제4기 초에 형성된 것으로 여겨진다. Yoon(1988)은 연체동물 화석을 이용해 본 층이 후기 플라이오세부터 후기 플라이스토세에 형성된 것으로 해석하였으며, 저서성 유공충은 전기 플라이스토세 중기 이후(정규귀 외, 1997), 석회질 초미화석은 후기 플라이오세부터 초기 플라이스토세(Yi et al., 1998), 부유성 유공충은 중기 플라이스토세 이전(Li et al., 1999)에 형성된 것으로 해석되었다. 또한 고지자기 연구를 통해 민경덕 외(1986)는 서귀포층이 후기 플라이오세에서 초기 플라이스토세의 가우스 정자극기(Gauss normal chron)에 형성되었다고 해석하였으며, 윤상규 외(1986)는 중기 플라이스토세의 브륀 정자극기(Brunhes normal chron), 김인수와 이동호(2000)는 후기 플라이오세에서 중기 플

라이스토세에 해당하는 올두바이 정자극 아기(Olduvai normal subchron)와 브룬 정자극기 직전의 역자극기에 형성된 것으로 해석하였다.

서귀포층은 역질사암, 사암, 사질이암, 이암 등으로 구성되어 있으며, 윤석훈과 조성권(2006)은 조직의 특성과 퇴적 구조를 조합하여 12개의 퇴적상으로 구분하여 연안 환경에서부터 외대륙붕까지 다양한 천해환경에서 형성된 것으로 해석하였다. 본 논문의 시료 채취 지점은 생물편으로 이루어진 생물교란 역질 사암에 해당하며, 이는 해안으로 접근하는 폭풍쇄류의 영향으로 연안에 형성된 생물편 बैं크에서 퇴적된 것으로 해석된다. 또한 정규귀 외(1997)는 지하에 분포하는 서귀포층에서 산출되는 저서성 유공충을 분석하여 서귀포층은 만 내지 공해성을 띤 천해환경에서 퇴적되었으며, 당시 한류와 난류의 혼합 환경에서 난류 환경으로 변하는 영향을 받은 것으로 해석하였다. Yi et al.(1998)은 하부에서는 한류의 영향이 우세하고 상부로 갈수록 난류의 영향이 우세해지는 환경으로 해석하였다.

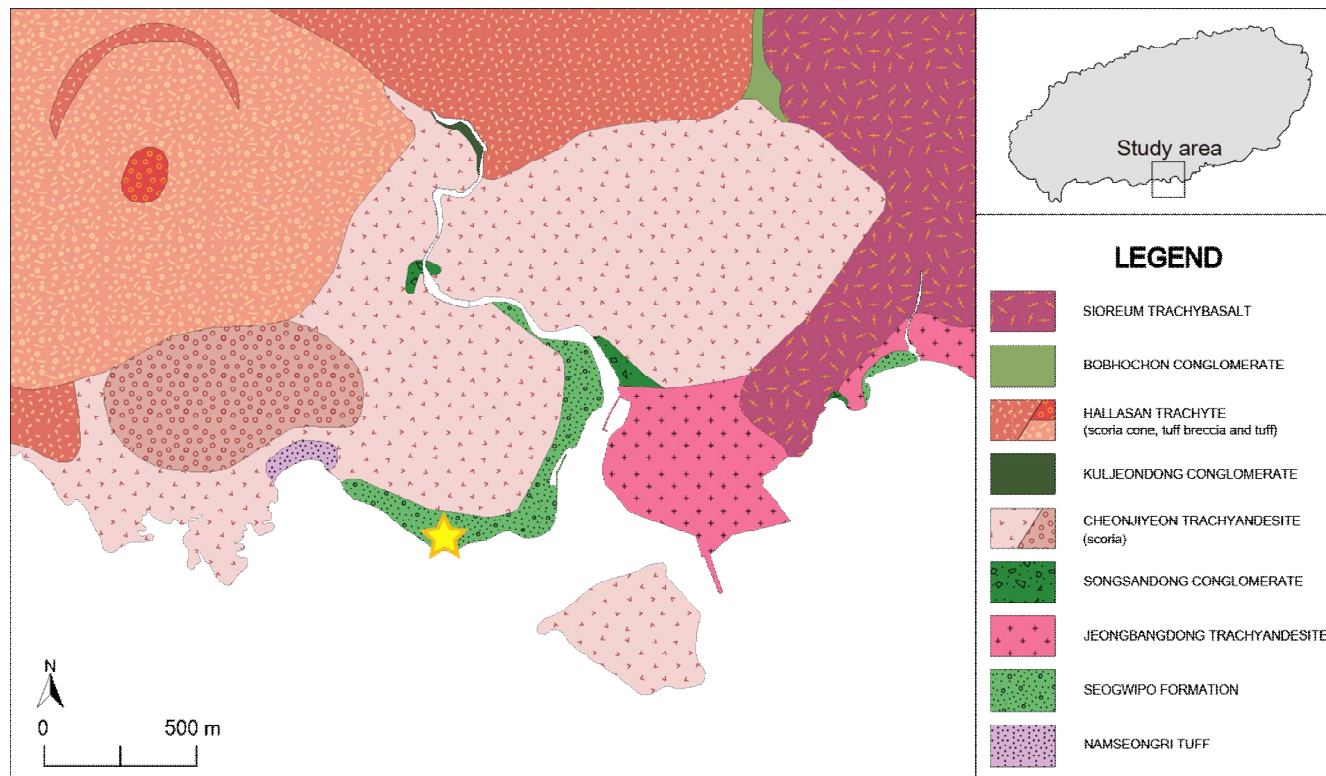


Figure 1. Geologic map of study area. The Seogwipo Formation is well exposed along the rock cliff of Namseongjung-ro. Diverse scallop fossils containing *Entobia* structures were collected at western cliff of the study area.

3. 시료 및 연구 방법

3-1. 시료

서귀포층에서 이매패류, 굴족류, 복족류, 완족류, 성게, 산호 등 다양한 화석이 발견되었다(Fig. 2). Yoon(1988)은 본 층에서 산출되는 패류 화석을 서귀포층 패류화석군이라고 명명하였으며, 이를 일본의 옴마 동물군(Omma fauna)과 카케가와 동물군(Kakegawa fauna)과 대비하였다. 서귀포층에서 가장 흔하게 발견되는 화석은 이매패류로 최성자 외(1998)에 의해 *Nemocardium (Keenaea) samarangae*, *Cyclocardia ferruginea*, *Glycymeris (Glycymeris) rotunda*, *Cryptopecten vesiculosus*, *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis*, *Pecten (Notovola) sp.*, *Chlamys sp.* 등이 보고되었다.

본 연구는 가리비 화석인 *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis*, *Pecten (Notovola) sp.*, *Chlamys sp.*를 대상으로 진행하였으며, 그 중 대부분이 *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis*에 해당된다. *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis*는 연구지역에서 산출되는 대표적인 화석으로, 플라이오세 ~ 플라이스토세를 지시하는 표준화석이다. 이 종은 아원형의 좌우대칭인 각을 가지고 있으며 다른 종의 가리비에 비해 각의 크기가 크고 두꺼운 특징을 보인다.



Figure 2. Various calcareous fossils found from the Seogwipo Formation. (A) Bivalves, (B) scaphopods, (C) gastropods, (D) brachiopods, (E) echinoids and (F) corals. Fossils of bivalves and brachiopods are found in assemblages while others occur sporadically.

3-2. 연구 방법

패각에 분포하는 천공 구조의 관찰은 육안과 실체현미경 및 레진 충전 기법(embedding technique)을 활용하여 이루어졌다. 실험하기에 앞서 세심한 육안 관찰 및 사진 촬영이 이루어졌으며, 각각의 특징들을 기재하였다. 패각의 표면에 존재하는 다양한 크기의 천공 구조를 확인하기 위하여 육안뿐 만 아니라 실체현미경(Nikon사 SMZ1500) 하에서도 관찰하였다. 또한 조명기를 이용해 패각에 빛을 투과시켜 내부 구조의 확인을 시도하였으며, 이를 통해 패각 내에 존재하는 천공 구조를 확인하였다. 천공 구조가 확인된 패각의 경우 정확하고 입체적인 내부 구조 관찰을 위해 Golubic et al.(1970)에 의해 제시된 레진 충전 기법(embedding technique)에 따라 실험을 진행하였다(Fig. 3).

패각을 증류수에 세척한 다음 유기질 제거를 위해 과산화수소(H_2O_2)를 처리하였다. 이후 미세한 구멍 내에 존재하는 물질을 없애기 위해 초음파세척기(ultrasonic cleaner)에서 세척한 후 상온에서 건조시켰다. 패각의 미세한 구멍 속에 존재하는 수분을 없애기 위해 아세톤 처리를 시행하였으며 아세톤 처리는 10 % 농도에서부터 20 % 간격으로 점진적으로 농도를 높여가며 진행하였다. 각 단계별로 30분씩 진행되었고, 100 % 아세톤에서는 1시간 이상 처리하였다. 앞의 과정을 거쳐 완전히 건조된 시료에 아랄다이트(araldite)를 부어 시료 내부의 구멍으로 충전시켰다. 이때 보다 완벽한 레진캐스트(resin-cast)를 얻기 위하여 순수한 아랄다이트를 처리하기 전 아세톤과 아랄다이트를 섞어 점도를 낮춘 혼합물을 먼저 부은 후 아랄다이트의 농도를 점차 높여가며 충전시켰다. 최

종적으로 순수한 아랄다이트를 부은 후 건조 오븐에서 60 °C로 약 48시간 굳혔다. 아랄다이트가 단단하게 굳은 시료는 패각을 제거하기 위해 패각이 노출되도록 자른 후 5 % 농도의 묽은 염산에 반응시켰다. 묽은 염산 처리를 거친 후에도 유기물이 남아있는 경우 차아염소산나트륨(sodium hypochlorite)처리를 한 다음 상온에서 건조시켰다. 완성된 레진 캐스트는 실체현미경에서 전체적인 특징을 관찰하였고 경북대학교 공동실험실습관에 설치된 전계 방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, Hitachi사 SU8220)을 이용하여 미세 구조를 상세히 관찰하였다. FE-SEM의 경우 한 번에 찍을 수 있는 사진의 영역이 제한적이므로 여러 장의 사진을 찍어 이어 붙이는 파노라마 기법을 이용하여 엔토비아의 전체적인 구조를 관찰하였다.

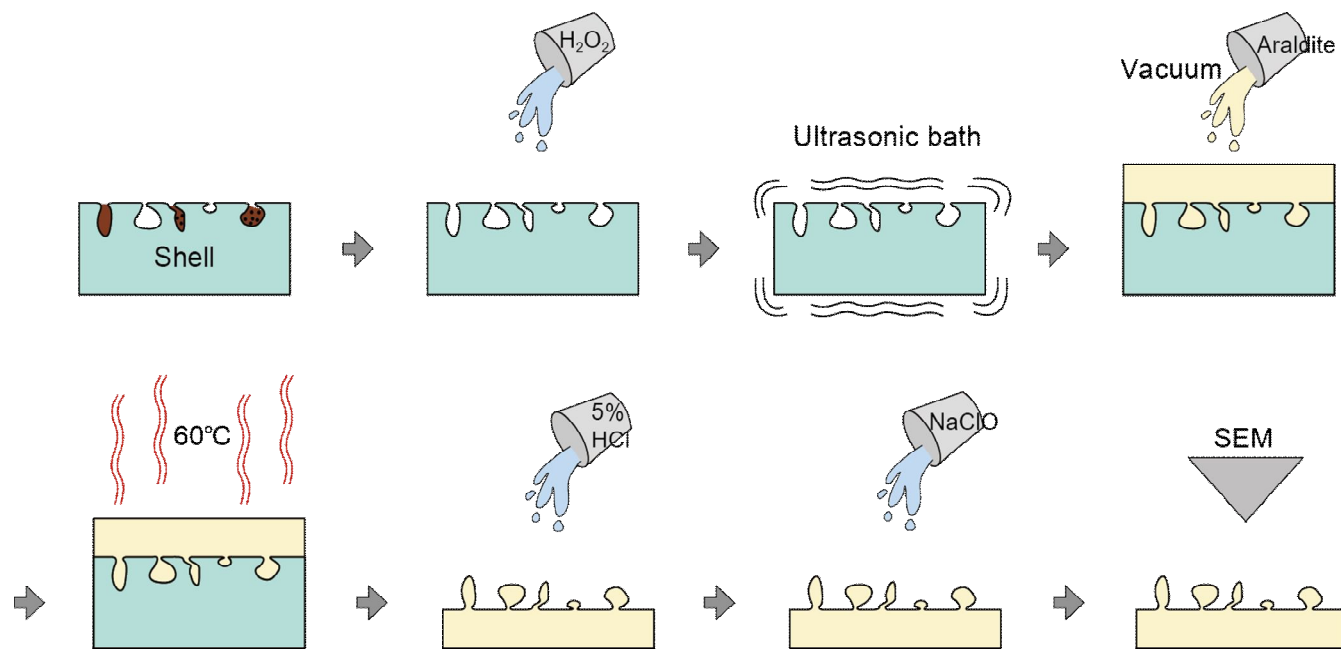


Figure 3. Procedures of the embedding technique. The bored shell is reacted with H_2O_2 in order to remove organic material, and then dried after cleaning in ultrasonic bath for 3 minutes. The araldite were poured under vacuum conditions and cured for 48 hours at 60°C . The sample is then reacted with 5% HCl and NaClO for removal of calcareous substrate and organic matter. The resin-cast of the sample is observed under SEM (modified from Wisshak, 2012).

4. 생침식

생명체의 활동에 의해 암석이나 광물이 파괴되는 현상을 생침식(bioerosion)이라고 하며, 식물이 성장하면서 뿌리가 암석 사이로 파고들어 암석이 파괴되는 것이 대표적인 예이다. 이 외에도 생침식은 여러 생명체에 의해 다양한 방법으로 발생한다. 어떤 생명체는 암석 표면을 긁어내거나 갉아먹기도 하고 또 다른 생명체는 암석의 내부를 능동적으로 파고들기도 한다. 일반적으로 암석 표면을 긁거나 뜯어내는 것과 같은 기계적 작용에 의한 생침식을 생물학적 마모(biological abrasion)라고 하며, 화학물질을 분비해 기질을 약화시켜 파고드는 것을 생물학적 부식(biological corrosion)이라고 한다(Neumann, 1966; Tribollet et al, 2011). 암석 표면을 긁거나 갉아먹는 생물의 경우 달팽이, 성게, 비늘돔(parrotfish)이 대표적이며, 이들은 대개 기질에 존재하는 유기물의 섭취를 목적으로 한다. 반면 암석 내부를 파고드는 생명체는 포식 활동보다는 서식이나 몸체를 보호하기 위한 경우가 일반적이며, 해면동물이나 환형동물이 이에 해당한다. 이처럼 기질을 직접적으로 파고들어 암석이나 패각의 내부에 구멍을 형성하는 생물을 천공생물이라고 한다.

천공생물에는 육안으로 확인할 수 있는 생물 뿐 아니라 마이크론 크기의 미세한 생물도 존재한다. 그중에서도 특히 석회질 기질을 파고드는 생물을 내암성생물(endolithic organism)이라고 한다. 내암성생물에는 대표적으로 남조세균(cyanobacteria), 조류(algae), 균류(fungi)가 있으며, 생명체가 기질 내부에 서식하는 위치에 따라 암상내암성생물(chasmoendoliths), 은생내암성생물(cryptoendoliths), 진내암성생물

(euendoliths)로 나누어진다(Fig. 4). 암상내암성생물의 경우 암석의 균열이나 틈과 같은 좁은 공간에 서식하고 은생내암성생물은 암석 내에 존재하는 구멍이나 입자 사이의 공간에 존재한다. 기질 내부의 이미 존재하는 공간에 서식하는 앞의 두 생물과는 달리 진내암성생물은 능동적으로 기질을 용해시켜 내부의 공간을 만들어 서식한다(Golubic et al., 1981; Chacon et al., 2006; Rantazidou et al., 2006; Radtke et al., 2010). 이처럼 천공생물은 기질 내부에서 자신에게 적합한 환경에서 서식하며 생명체마다 고유의 생침식 구조를 형성하기 때문에 지질학적, 고생물학적 연구에 이용된다.

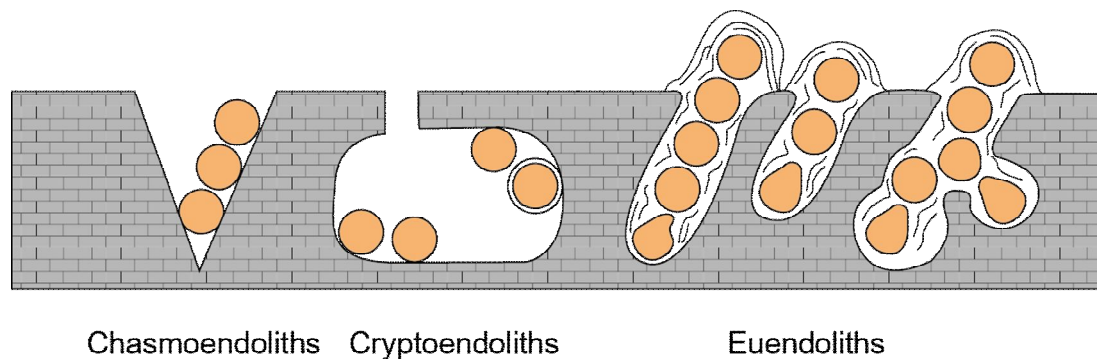


Figure 4. Various types of endoliths in relation to carbonate substrate. Chasmoendoliths live inside ready-made cracks and fissures; cryptoendoliths fill preexisting pores within the substrate. Euendoliths (Eu means true) actively penetrate the carbonate substrate (modified from Golubic et al., 1975).

5. 가리비 화석 표면의 천공 구조

5-1. 천공 구조

서귀포층에서 산출되는 다양한 패각(이매패류, 완족류 및 굴족류)들 중 이매패류의 표면은 여러 가지 형태의 천공에 의해 파괴되어 있다. 이러한 구조의 대부분은 물리적 또는 화학적 풍화가 아닌 생명체에 의해 형성된 것으로, 원모양과 덤벨모양(dumb-bell), 타원모양 및 U자형 관모양 등 다양한 형태로 관찰된다. 이와 같은 생침식 구조는 일반적으로 환형동물, 복족류, 해면동물 등에 의해 형성되며 각각의 생명체는 생활 방식에 따라 고유의 구조를 만든다(Fig. 5).

패각 표면에서 발견된 천공 구조 중 덤벨모양이나 패각 표면에 평행하게 나타나는 U자형 관모양, 이들과 함께 나타나는 작은 원이나 타원모양은 환형동물에 의해 형성된 구조로 알려져 있다(Zottoli and Carriker, 1974; Liu and Hsieh, 2000; Hutchings, 2010; Simon, 2011). 환형동물은 퇴적물을 걸러 먹는 여과 섭식 동물(filter feeder)로 패각의 내부에서 자신을 보호하며 섭식 활동을 하기 위해 기질을 파고들어 간다. 이들은 단단한 기질 내부로 들어가기 위해 체내에서 분비되는 화학물질을 이용하여 기질을 약화시킨 후 강모(setae)를 사용해 기질을 제거한다(Hutchings, 1986). 이와 같은 방법으로 형성된 천공 구조는 기본적으로 U자형을 가지지만 생명체가 패각을 파고든 방향에 따라 좀 더 다양한 형태를 띠게 된다(Fig. 6A-D). 즉, 덤벨형이나 쌍을 이루는 두 개의 원형의 경우는 패각 표면에 수직으로 파고 들어가 내부에 서식한 경우로 패각이 풍화되어 노출되면 내부의 관모양 구조가 관찰된다.

또한 패각 표면에서 발견되는 원형의 단순한 구조는 직경 약 0.5 cm

정도로 다른 천공에 비해 다소 큰 크기를 가지며 패각을 완전히 관통해 있다(Fig. 6E-F). 이러한 원형 구조의 대부분은 크기가 다소 작은 하얀색의 이매패류에서 발견된다. 이는 일반적으로 복족류에 의해서 형성된 구조로 그들은 서식의 목적이 아닌 포식 활동을 위해 기질을 뚫는다(Walker, 2007). 복족류는 다른 생물들의 이빨과 같은 역할을 하는 독특한 기관인 치설(radula)을 이용하여 기질을 파고들여(Carriker, 1969), 패각 속에 존재하는 연체부를 섭식한다. 따라서 복족류가 만든 생침식 구조는 비교적 크기가 크고 패각을 완전히 관통하는 특징을 보인다. 이러한 복족류 구멍(e.g., ichnogenus *Oichnus*)의 가장자리는 일반적으로 경사가 지거나 수직인 특징을 지닌다. 간혹 이러한 구조는 가리비 화석의 표면에서도 발견되는데, 가리비 화석의 대부분에서 발견되는 원형 구조에 비해 상대적으로 크기가 크고 내부까지 관통되어 있어 다른 생명체에 의해 형성된 천공 구조와 구별이 어렵지 않다.

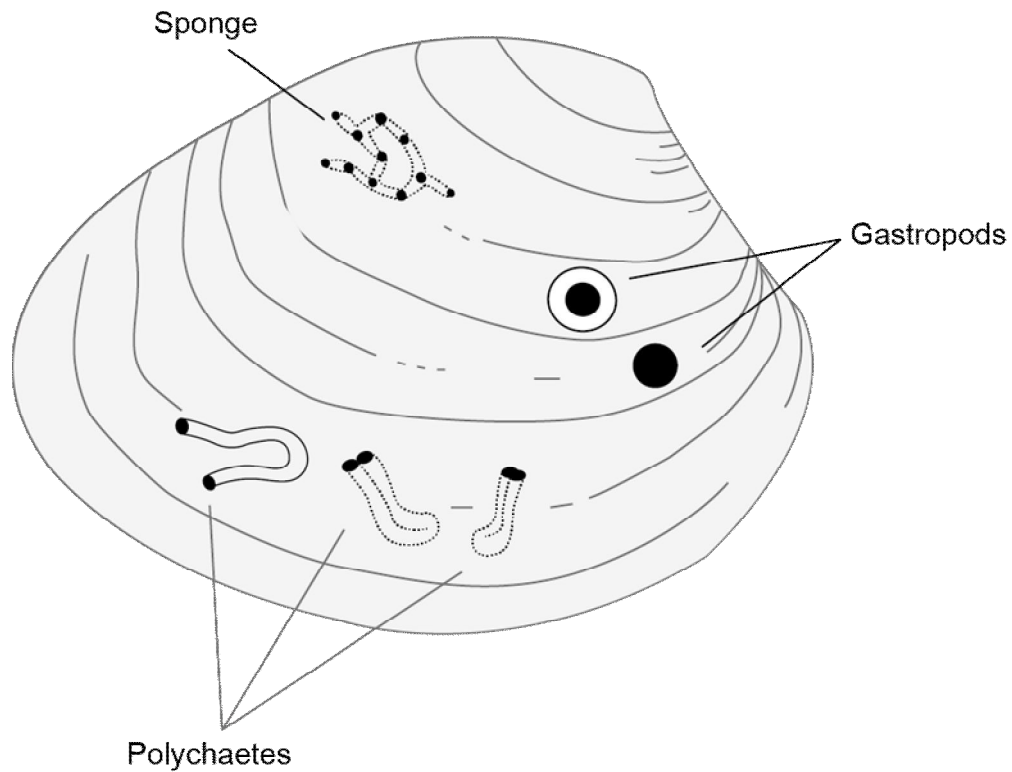


Figure 5. Boring structures made by various organisms. Polychaete worms produce U-shaped boring structures. Only paired circles and/or dumb-bell shaped structures are observed on the surface, while sinuous tunnel structures are visible when exposed. Gastropods make more or less large circular holes with inclined or vertical walls. Boring structures made by sponge represent small circle shapes on shell surface that are connected each other through complex internal networks.

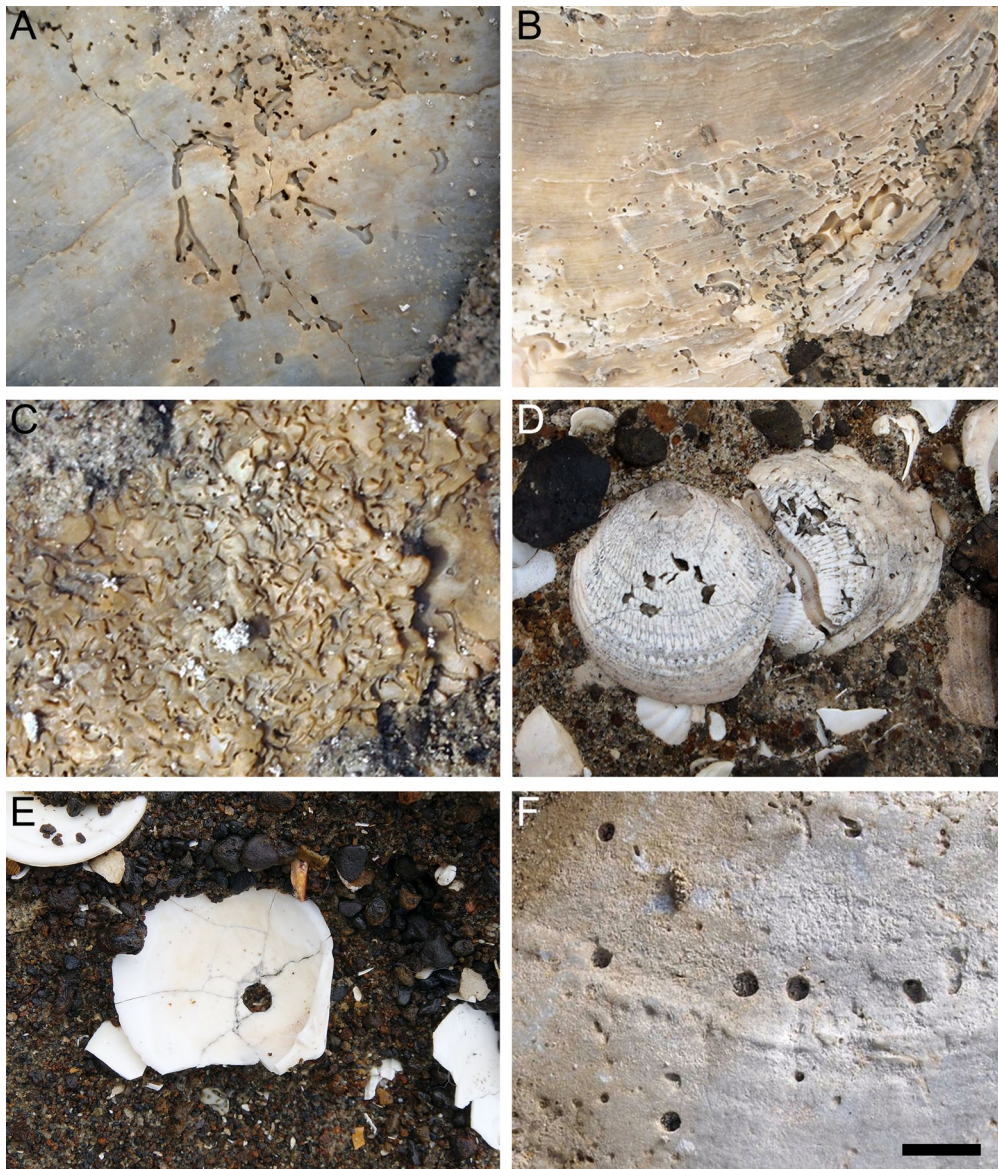


Figure 6. Boring structures of polychaetes and gastropods on fossil shells from the Seogwipo Formation. (A-D) Ellipse, dumb-bell and tube-shape borings made by polychaete worms. (C) Complicated internal structures are exposed when outer layer of shell is removed. (E-F) Large circular structures made by gastropods. Scale bar in (F) is 1cm for all figures.

5-2. 해면동물의 천공 구조

해면동물의 천공 구조는 환형동물이나 복족류에 의해 형성된 생침식 구조와는 달리 내부에 복잡한 구조를 갖는 것이 특징이다. 일반적으로 천공성 해면동물(family Clionaidae)은 유충 시기에 석회질 기질의 표면에 정착한 후 독특한 방법을 이용하여 내부 구조를 형성한다(Fig. 7). 특화된 세포(etching cell)에서 탄산무수화 효소(carbonic anhydrase)를 분비해 기질을 용해시킨 후 세포가 기질 속으로 파고든다. 이후 약해진 기질을 탄산염 광물질의 작은 칩(sponge chip)형태로 분리시킨 다음 출수공을 통해 물속으로 내보낸다(Hatch, 1980; Pomponi, 1980; Rupert et al., 2004). 이러한 방법을 이용하여 해면동물이 기질에 정착한 초기에는 얇은 관모양 터널을 형성하며, 해면동물이 성장함에 따라 터널의 곳곳에 구형 혹은 타원형의 챔버(chamber)를 만든다. 이렇게 형성된 각각의 챔버들은 통로(canal)를 통해 연결되어 복잡한 네트워크 형태의 내부 구조를 형성한다(Fig. 8). 이처럼 석회질 기질에서 나타나는 해면동물의 천공 구조를 흔적화석으로 분류하여 엔토비아라고 하며, 전반적인 형태나 챔버의 크기, 모양, 표면장식 등에 따라 흔적종(ichnospecies)으로 세분한다(Bromley and D'Alessandro, 1984).

서귀포층에서 산출된 패각 표면에는 원형의 천공 구조가 다량 관찰되며 이는 환형동물이나 복족류에 의해 형성된 천공 구조와 함께 산출된다. 패각의 최외층이 제거된 일부 시료에서 표면의 천공과는 다른 복잡한 형태의 내부 구조가 발견되며 이는 기질을 서식지로 삼아 내부로 파고들어 살아가는 해면동물의 생침식 구조이다(Fig. 9).

서귀포층에서 산출된 해면동물의 천공 구조는 대부분이 가리비 화석에서 발견된다. 대다수의 천공 구조는 패각의 외부 표면에서 나타나며 일부는 내부 표면에서 관찰된다. 외부 표면에 분포하는 천공의 경우 패

각 전체에 전반적으로 분포하며, 일부 시료에서는 표면의 천공들이 각정(umbo)부분에서 가장자리로 갈수록 대체로 작아지는 경향을 보인다. 또한 패각 표면에 분포하는 원형의 천공 구조는 대부분이 규칙성 없이 나타나는데 일부에서는 선적 배열을 보이기도 한다. 선적 배열을 보이는 천공(직경 0.1 ~ 0.5 mm)은 무작위로 분포하는 것(직경 0.3 ~ 1.2 mm)보다 상대적으로 크기가 작고 균등한 특징을 보인다. 빛을 투과시켜 관찰한 천공의 내부 구조 또한 선적 배열을 가지는 것과 규칙성이 없는 망상형 구조를 보인다(Fig. 10). 하지만 패각이 두껍거나 표면에 퇴적물이 붙어있는 경우 빛이 투과되지 않아 내부 구조의 관찰이 어렵다.

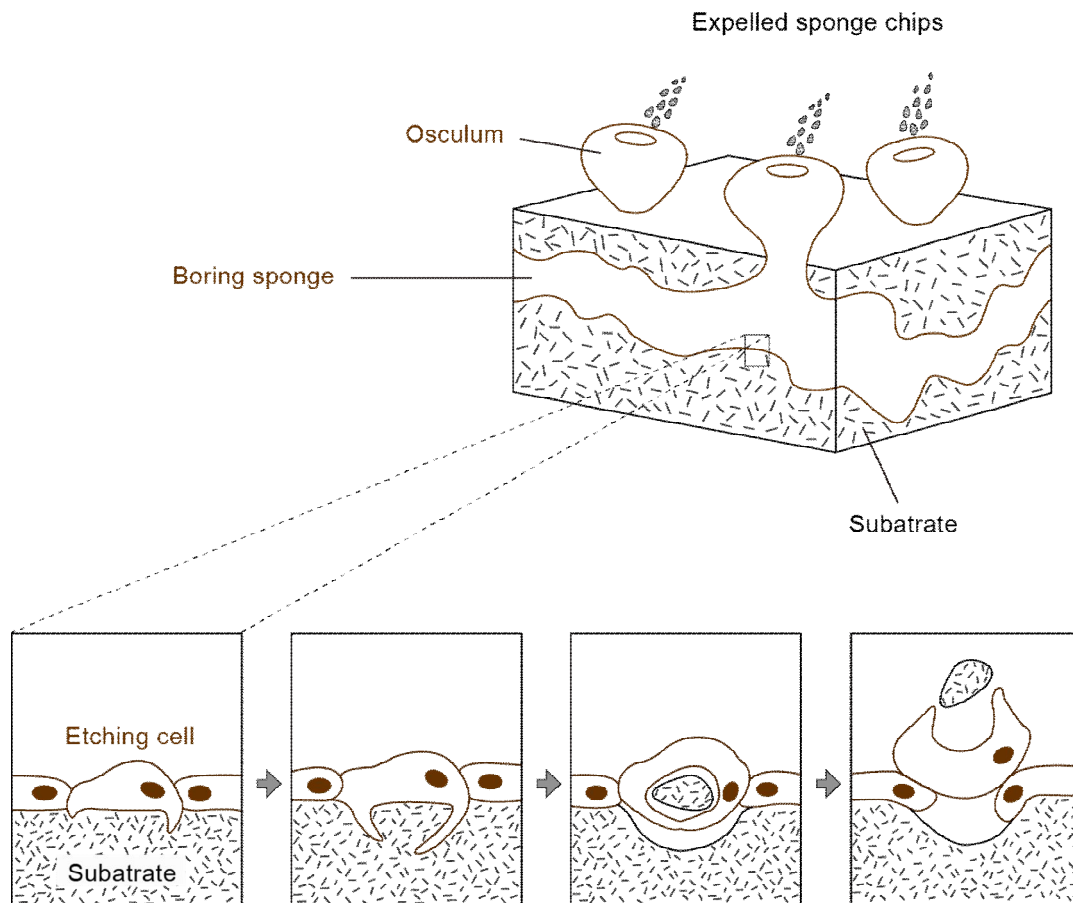


Figure 7. Excavating mechanism of boring sponge. The etching cell initiates to penetrate carbonate shells by means of both chemical and mechanical actions. After dissolving carbonates using chemical acid in early stage, the cells remove weakened substrate (sponge chips) by mechanical scooping. Sponge chips isolated from the shell are released to water column through osculum. Finally complicated internal networks containing *Entobia* balls are formed inside the shells, and released sponge chips are often found in the sediments near carbonate shells (modified from Hatch, 1974 and Pomponi, 1980).

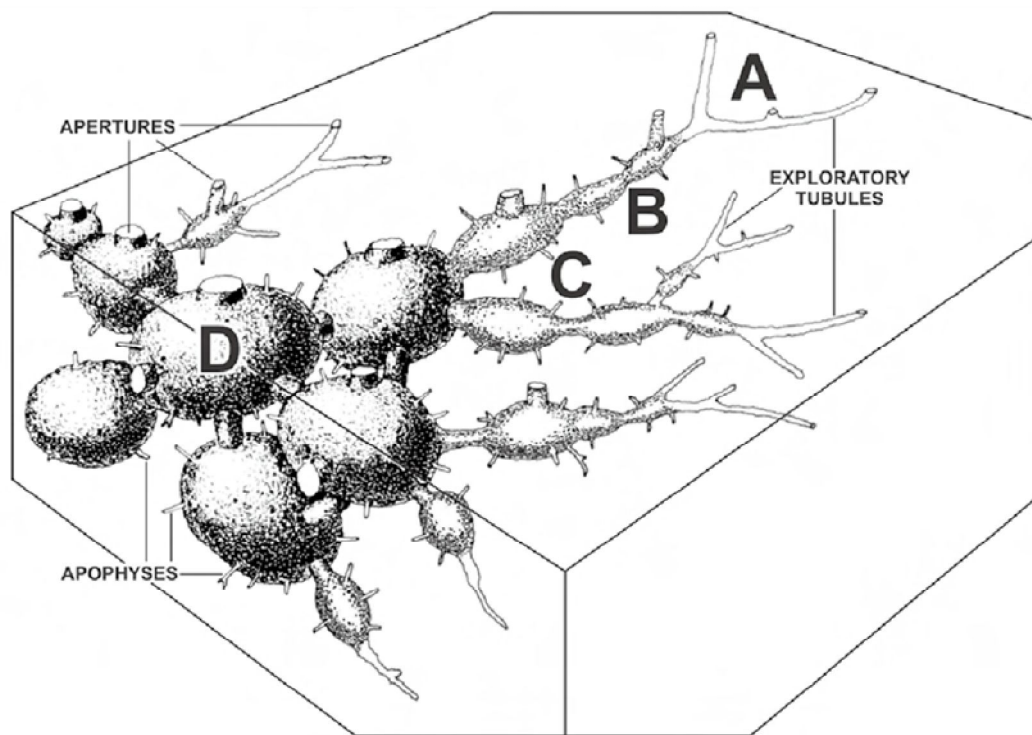


Figure 8. Sketch of fully developed *Entobia* structure, showing a succession of growth phases (A–D). Larval cells of sponge initiate to penetrate vertically into carbonate shells forming exploratory tubules (A). When growth continues, the tubules become swollen to form elliptical chambers (C) to spherical *Entobia* balls (D). The chambers are connected each other by intercameral canals (B) of variable shapes. In the course of *Entobia* growth, tubules divide to make branch-like tunnel structures, finally forming complicated *Entobia* networks. The surfaces of *Entobia* are generally ornamented by tiny tubules, apophyses (after Radwski et al., 2011).

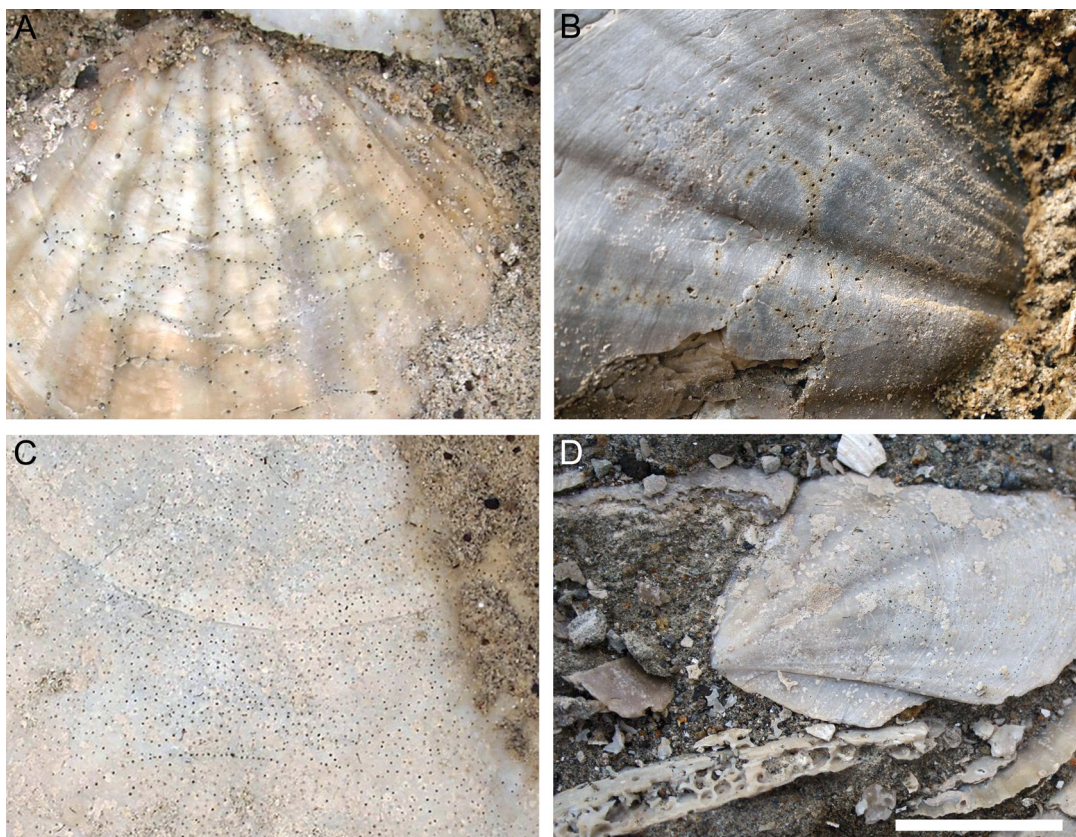


Figure 9. Densely developed *Entobia* holes on fossil scallops. Holes are distributed linearly (A, B) or randomly (C, D) on the shell surfaces. (C) Random or linear distribution of holes are often observed together on a same shell surface. (D) Empty internal structure of shells are clearly seen in a vertical view of shells. Scale bar in (D) represents 3cm for all figures.

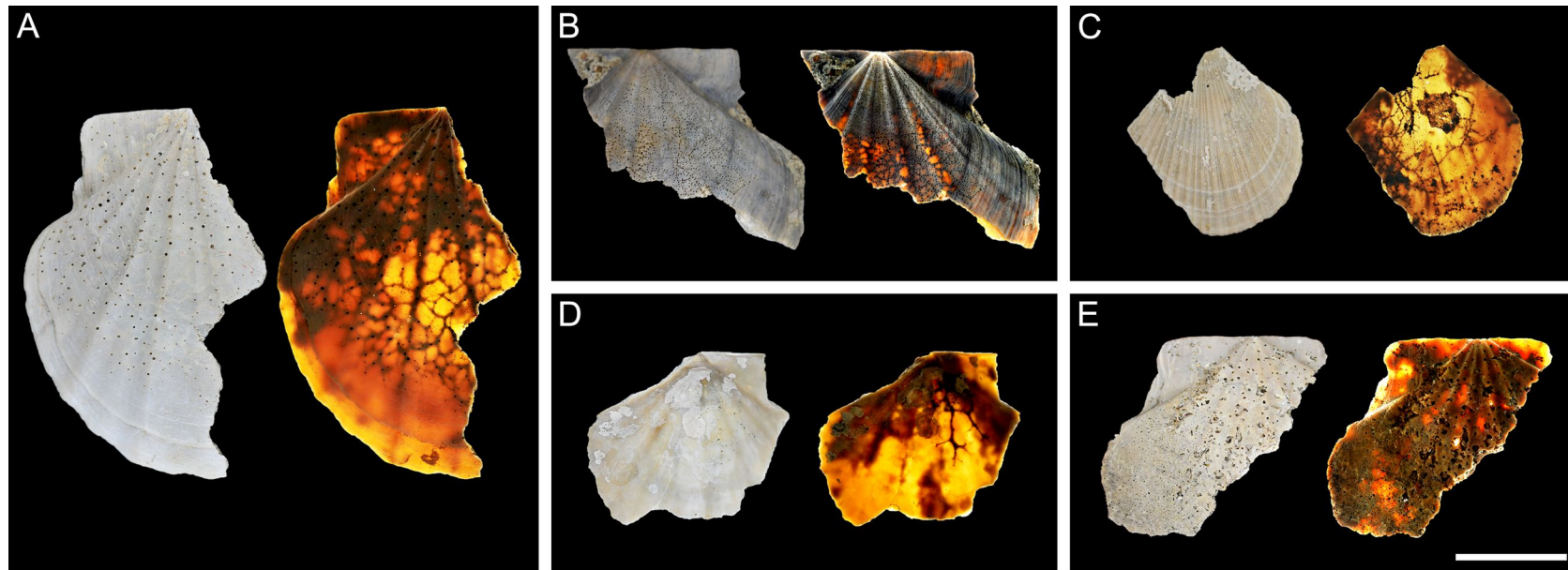


Figure 10. Surface holes (left ones in all pictures) and complicated internal networks of *Entobia* (right ones in all pictures). Internal networks are pictures taken under a strong light inside, where networks are observed as dark lines. (A, B, E) External view of *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis* and (C) *Chlamys* sp., and (D) internal view of an unidentified scallop. Polygonal dark area in (C) is a fossil bryozoan colony attached on shell surfaces. (E) If the shell is thick, internal structure can't observe using light transmission. Scale bar in (E) represents 5cm for all figures.

6. 엔토비아의 내부 구조

보다 정확한 내부 구조의 확인을 위해 특징적인 구조를 보이는 패각을 선정해 레진 충전 기법을 시행하여 전자현미경으로 관찰하였다. 패각 표면에 나타난 천공의 하부에는 엔토비아의 챔버가 존재하며, 각 챔버들끼리 연결된 네트워크 구조를 가진다. 이는 전형적인 해면동물의 천공 구조로 각각의 특징에 따라 두 가지 타입으로 분류된다(Fig. 11-14).

첫 번째 타입의 경우 직경 0.7 ~ 1.6 mm의 구 내지 타원형태의 챔버를 가지며 선적 구조를 보인다(Fig. 11). 각 챔버는 짧은 통로에 의해 연결되어 있으며, 챔버와 통로의 구분이 뚜렷하다. 챔버에서 하나 또는 두 개의 어린챔버(growing chamber)가 수직 방향으로 분지하여 성장한다. 일부 챔버의 정상부에서는 원형 구조가 관찰되며, 이는 해면동물이 패각을 파고들 때 기질을 완전히 관통한 경우 나타나는 구조이다. 시료의 일부에서 일반적인 구형 내지 타원형 챔버와는 다른 형태의 다소 큰 원통형 갤러리가 관찰된다(Fig. 12D-E).

두 번째 타입의 경우 뚜렷한 규칙성이 없는 망상형 구조를 가진다(Fig. 13). 챔버가 비교적 크고 다소 납작한 형태로 나타나며, 지름 1.4 ~ 3.9mm로 챔버 사이의 크기 차이가 크다. 각 챔버 사이를 연결하는 통로가 길고 두꺼워 챔버와 통로의 구분이 뚜렷하지 않다. 갤러리가 Y자형으로 분지하는 경향을 보이며, 엔토비아의 가장자리로 갈수록 갤러리가 점점 가늘어지는 특징을 보인다. 내부 구조의 표면에서 작은 돌기가 관찰되며, 이는 약 0.1 ~ 1 mm 정도의 길이로 끝 부분으로 향할수록 가늘어지는 형태를 가진다. 서로 분리되어 있는 각각의 챔버가 접하는 경우 다른 곳에 비해 특징적으로 많은 돌기가 발달하여 있으며 얇은 관으로 연결되어 있다(Fig. 14A). 엔토비아의 초기 단계에 형성되는 라즈베리

형태의 챔버가 주요 네트워크와 독립적으로 관찰된다(Fig. 14E-F).

두 타입 모두 엔토비아의 표면에서 마치 라즈베리 표면과 같은 울퉁불퉁한 미세 구조가 관찰된다(Fig. 11C, 13C). 이는 천공성 해면동물이 기질을 파고들 때 형성되는 흔적으로, 엔토비아에서 관찰되는 특징적인 구조이다. 일부 엔토비아의 표면에서 세포가 기질을 녹여 파고드는 일련의 과정을 보이는 얇은 막형태의 흔적이 발견된다(Fig. 11C).

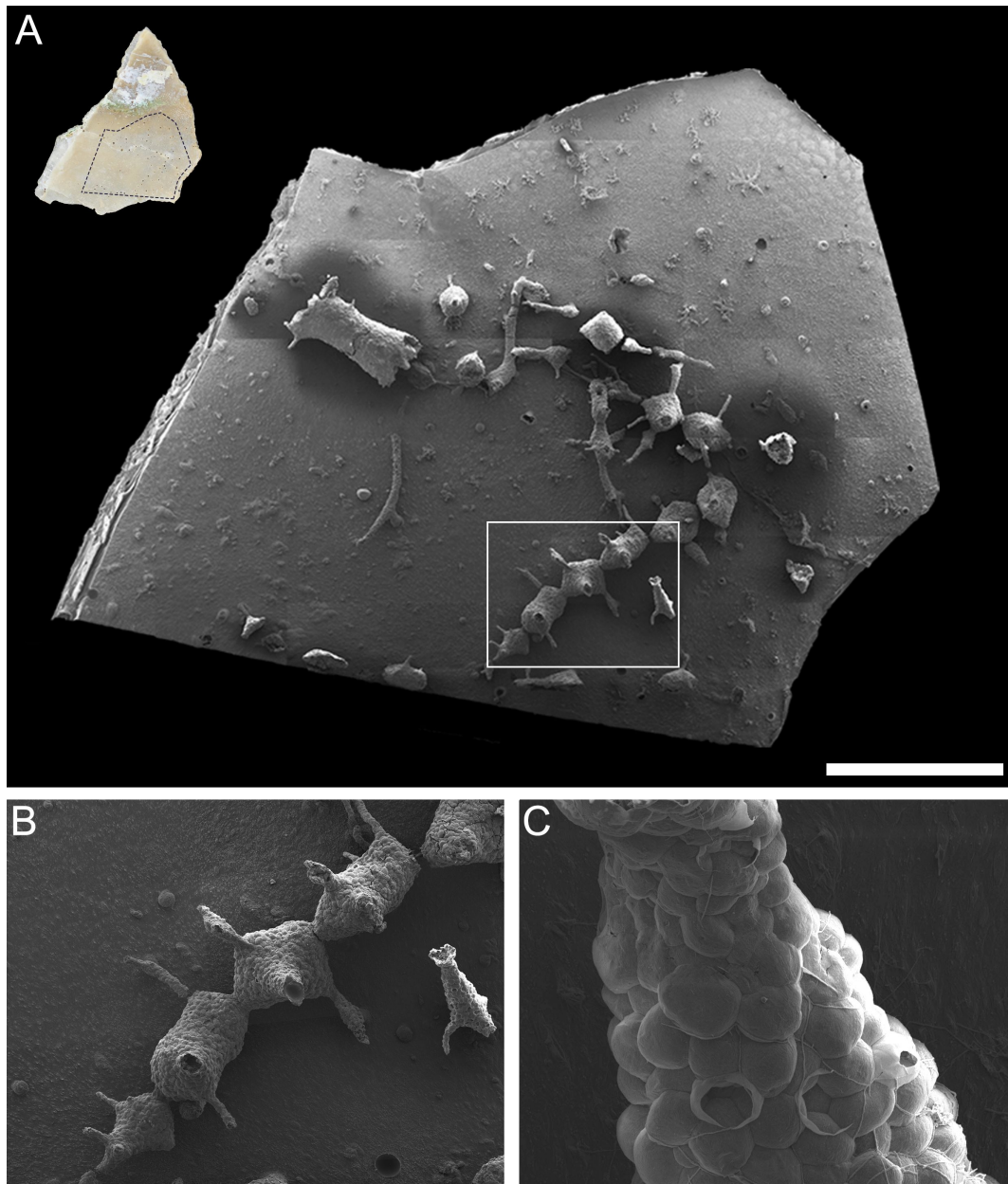


Figure 11. SEM pictures of *Entobia ovula*. (A) Panoramic view of resin-cast of a shell fragment of a fossil scallop (dashed line of right coner). (B) Details [rectangular in (A)] of linearly positioned *Entobia* balls, characterized by a series of ball attached one another and bumpy surface ornamentation. (C) Close view of surface structure, reminiscent of mechanical scooping by etching cells of boring sponge. Scale bar in (A) represents 5 mm.

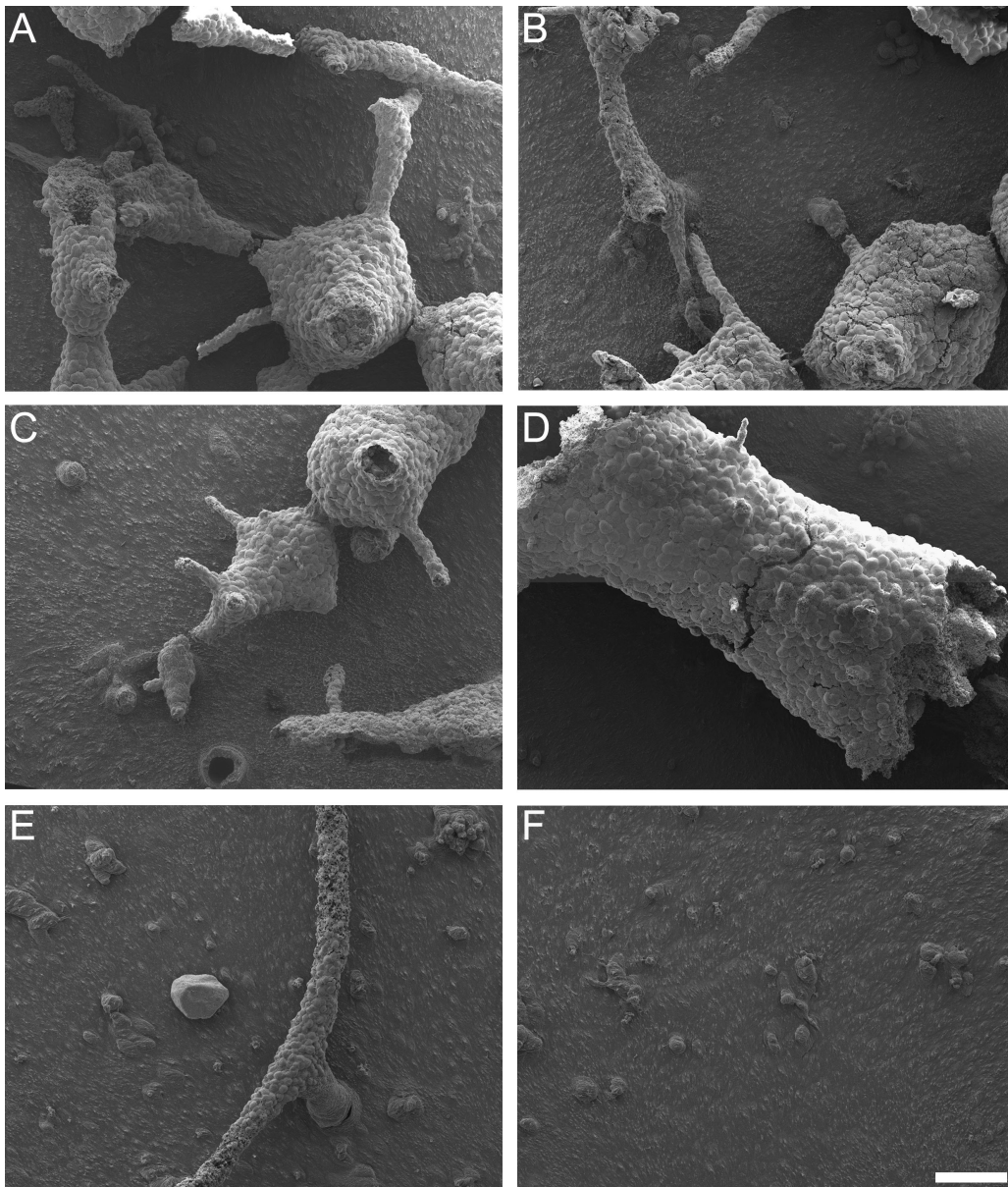


Figure 12. Close view of *Entobia ovula*. (A, B, C) Spherical to ellipsoidal *Entobia* balls are connected one another by short intercameral canals, and horizontally emerged tubules are visible. (D) Raspberry-like bumpy surface with tiny apophyses in upper parts of large tubules. (E) Cylindrical tubule without an *Entobia* ball is often connected directly to an aperture. (F) A few micro-endoliths are accompanied with *Entobia ovula*. Scale bar in (F) is 0.5 mm.

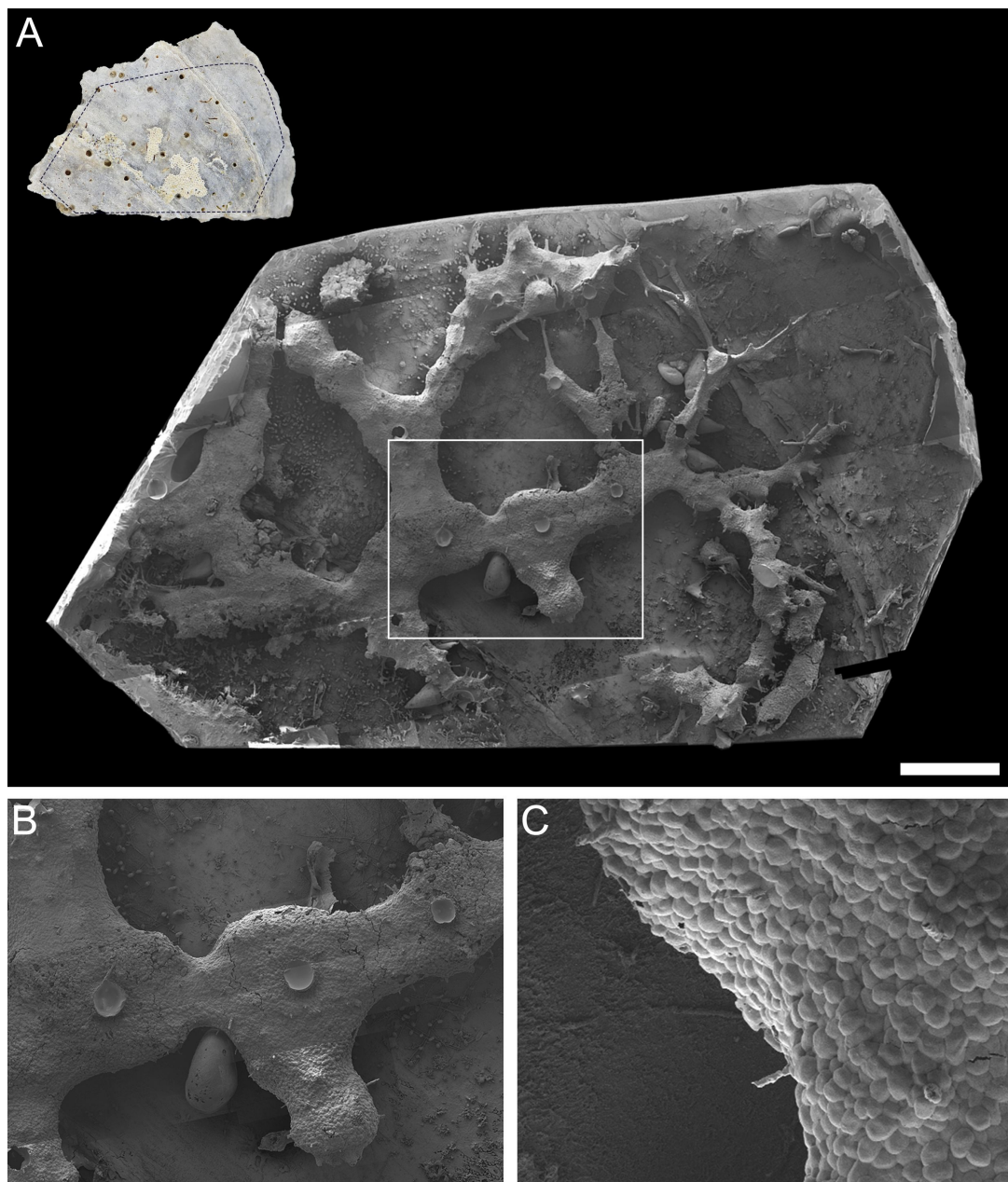


Figure 13. SEM pictures of *Entobia megastoma*. (A) Panoramic view of resin-cast of a fossil scallop's fragment (dashed line of right coner). (B, C) Detail view of rectangle in (A) showing a diagnostic feature of *Entobia megastoma*, (B) flat polygonal to irregular balls connected randomly, and (C) bumpy surface structure. Scale bar in (A) represents 5 mm.

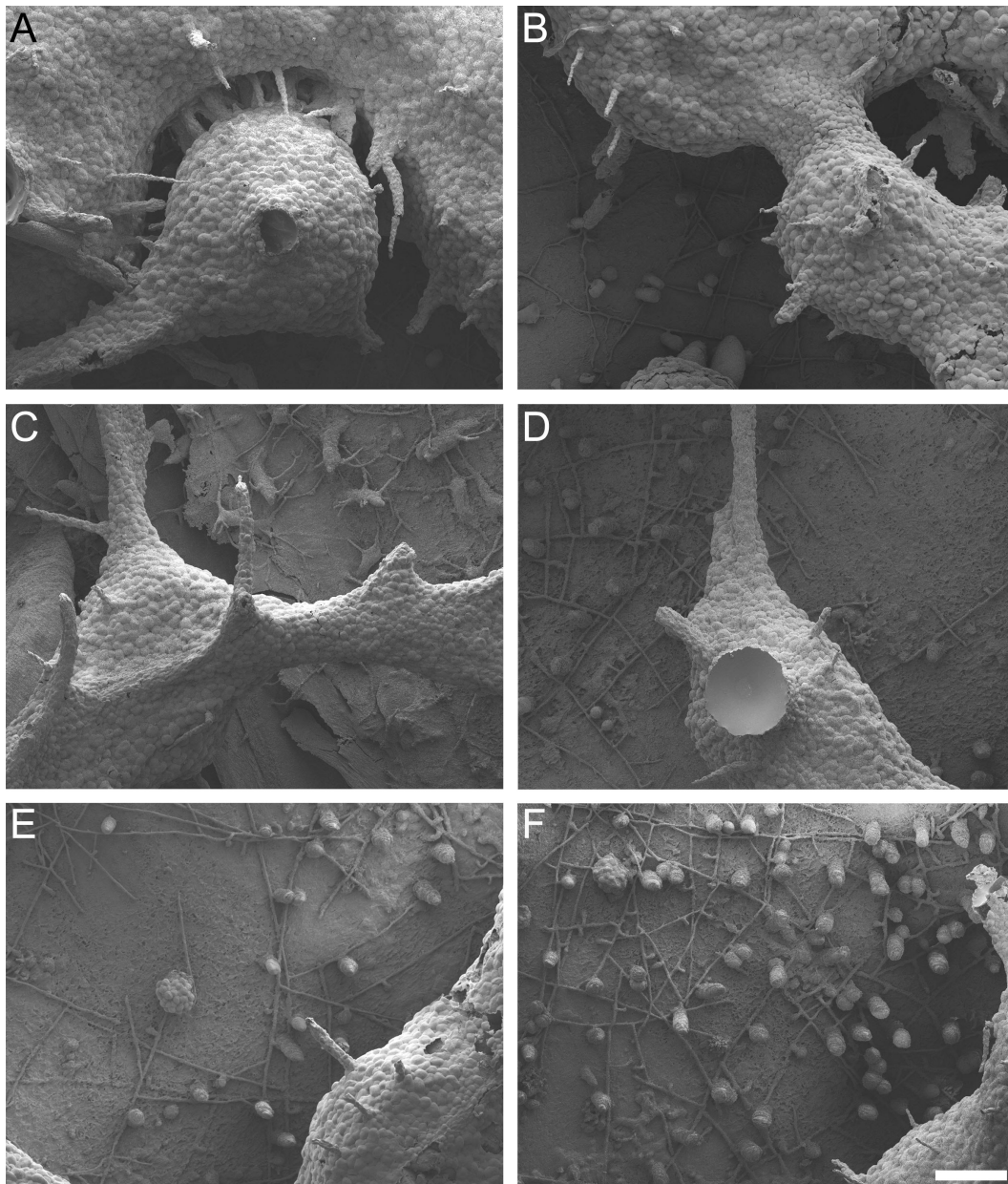


Figure 14. Close view of *Entobia megastoma* of Fig. 13 (A). Diverse *Entobia* balls (A; spherical, C; polygonal, D; ellipsoidal) are often connected by thick tunnels. (B) Tiny and tapered apophyses are generally developed on the *Entobia* surfaces. (E, F) Initial structure of *Entobia* and a great number of micro-endolithic structures are observed near *Entobia megastoma*. Scale bar in (F) is 0.5 mm for all figures.

7. 기재

Systematics

Ichnogenus *Entobia* Bronn, 1838

Diagnosis: Boring structure found in carbonate substrates comprising a single chamber (swollen, fusiform portions of sponge boring), networks or boxworks of galleries connected to the surface by several or numerous apertures. Morphology changes markedly with ontogeny. Diameters of galleries tend to increase in the course of growth of sponge; in some forms, inflation at regular distances produces closely interconnected chambers; in other forms, chamber development is restricted; while in others, cameration (any stage of growth that is characterized by inflation or swelling of discrete parts of the system to produce chambers) is developed. Fine apophyses (minute hair-like extensions that commonly extend from all parts of the sponge boring) arise from all surfaces of the network system (after Bromley and D'Alessandro, 1984).

Entobia ovula Bromley and D'Alessandro, 1984

Fig. 11, 12, 15A

Modern trace makers: *Cliona schmidtii*, *Cliona vermifera*

Diagnosis: *Entobia* consisting mature stage of globular, ovoid chambers created in a three-dimensional network. The chambers are separated by a very short channel, which can be reduced to a simple constriction. Each chamber is rarely connected to two channels with the surface. When fully developed, the chambers are lined up in straight lines that sometimes fork at variable angles and are anastomosed together, resulting in a three-dimensional network of one to two barely discernible levels.

Description: Apertures are mostly circular shapes and from 0.1 to 0.5 mm in diameter. They are distributed in a row and are connected to the chambers. The chambers are spherical to oval in shape. Their size ranges from 0.7 to 1.6 mm. Also the network of chambers is arranged in a row such as apertures and another line fused.

Remark: Although the definition of the ichnogenus *Entobia* Bronn, 1837, as borings attributable to sponges of the family Clionaidae is clear, the distinction between particular ichnospecies remains less simple, and even vague. *Entobia* is classified by internal

structure such as shape, size and orientation in chamber. Based on these criteria, this specimen is classified *Entobia ovula*. It is characterized by spherical or oval shape chamber and each chamber lined up in a row. Also, growing chamber is branched with right angle in adult chamber. However, cylindrical gallery differ from diagnostic features shows in this sample.

Entobia megastoma Fischer, 1868

Fig. 13, 14, 15B

Modern trace makers: *Cliona celata*

Diagnosis: Chambered *Entobia* which is organized in irregular three-dimensional networks, whose complexity may increase in older phases of growth. The galleries are nearly cylindrical, bifurcation is reflected in regular intervals and swelling are present, where several galleries come together. The diameter of the galleries can vary greatly. Openings to the substrate surface of the substrate are large (on average, between 0.6 and 1.7 mm) and numerous, round or oval shaped, rarely together fused and irregularly distributed.

Description: Apertures are mostly circular shapes and 0.3 ~ 1.2

mm in diameter. They are irregularly distributed and are connected to the chambers. The chamber is discus shape and their size ranges from 1.4 to 3.9 mm. The surface of *Entobia* structure exists apophyses.

Remark: This specimen is classified based on shape and size of chamber and decoration on *Entobia*'s surface. It is characterized by discus-shape chamber and big size than other *Entobia*. Also, apophyses which thin and tapering shape represent surface of chamber. Thus, it is classified *Entobia megastoma*.

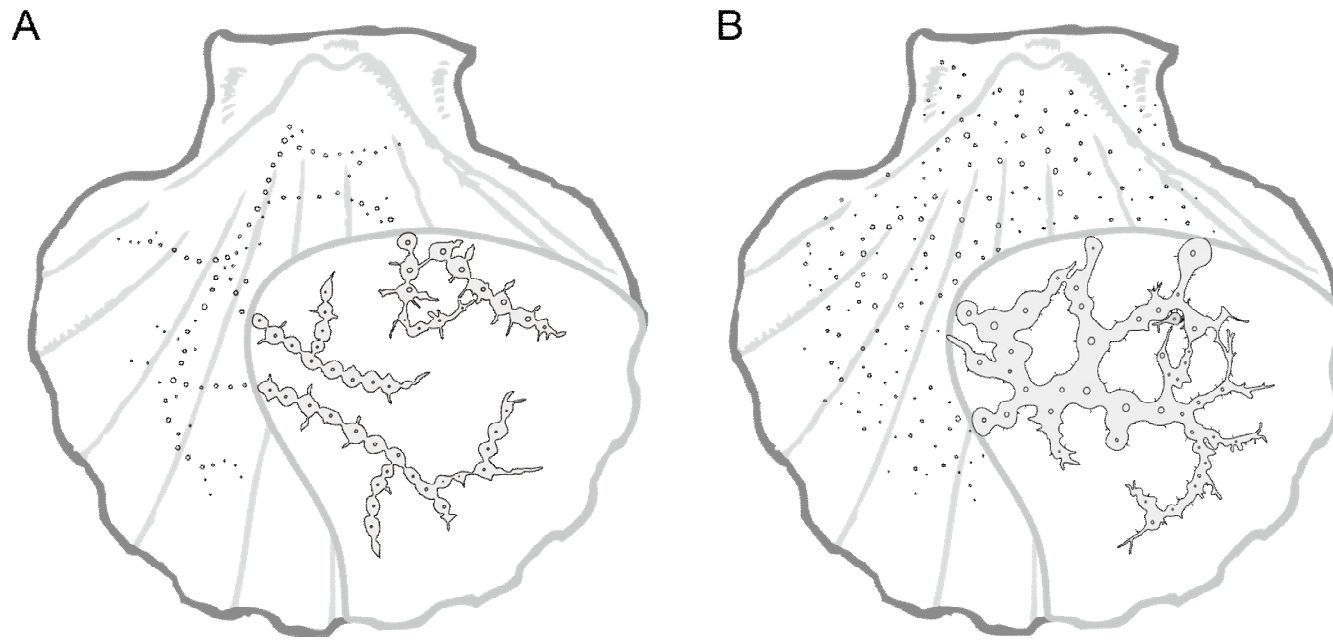


Figure 15. Sketch of two *Entobia* species identified in scallop fossils of the Seogwipo Formation, showing both external holes (upper and left side) and internal networks (lower and right side); (A) *Entobia ovula*, (B) *Entobia megastoma*. *E. ovula* is characterized by a linear arrangement of chambers, while chambers in *E. megastoma* are connected more or less randomly. (A) Such an arrangement in *E. ovula* is also identifiable as a linear distribution of circular holes in the surface of scallop fossils.

8. 토의

8-1. 엔토비아의 분류

흔적화석은 한 종의 생명체가 여러 종의 화석을 만들기도 하고 다른 종의 생명체가 한 종의 화석을 만들기도 한다. 엔토비아는 천공성 해면동물의 흔적화석으로 연구지역에서 발견된 두 종의 엔토비아 역시 다른 종의 해면동물에 의해 형성된 것인지, 한 종의 생물이 성장하면서 다른 모양을 형성하며 파고든 것인지 명확하게 판단하기 어렵다. 본 시료에서 산출되는 두 종의 경우 크기, 분지 형태 등 전반적인 구조에서 확연한 차이를 보인다. *Entobia ovula*는 구형의 챔버가 일렬로 배열된 뚜렷한 특징을 보이는 반면 *Entobia megastoma*의 경우 원반형 챔버가 별다른 규칙성 없이 망상으로 관찰되며, *E. ovula*에서 관찰되지 않는 미세 돌기가 발견된다. 이러한 구조적 차이는 천공성 해면동물의 각 종이 가지는 고유한 특징으로 *E. ovula*와 *E. megastoma*가 서로 다른 종의 해면동물에 의해 형성된 것으로 판단된다.

엔토비아가 존재하는 패각의 표면에는 다수의 천공이 발견된다. 이러한 천공들은 한 개체의 해면동물에 의해 형성된 것인지, 혹은 각각의 다른 개체가 패각을 독립적으로 뚫고 들어간 후, 기질 내부에서 융합된 것인지 구분하기 쉽지 않다. 이는 종의 동정을 통한 접근보다는 천공의 내부 구조를 통해 구분 지을 수 있다. 패각 표면에서 선적 배열을 보이는 천공의 경우 내부의 챔버 또한 일렬로 존재한다. 해면동물의 유충이 패각에 정착할 때, 서로 다른 개체의 경우 선적 배열을 이루어 고착할 가능성은 매우 희박한 것으로 생각된다. 이러한 이유로 *E.ovula*의 경우 하나의 개체가 연속적으로 내부 구조를 형성한 것으로 생각된다. 반면 불

규칙한 내부 구조를 가지는 *E. megastoma*는 엔토비아 초기 단계의 작은 챔버가 주요 갤러리와는 독립적으로 관찰된다. 또한 서로 분리되어 있는 챔버가 접하는 부분에서 특징적으로 많은 돌기가 존재하고 이들이 수많은 관으로 이어진 것이 발견된다. 이는 분리된 챔버들이 융합되는 일련의 과정으로 생각되며, 이러한 이유로 *E. megastoma*는 패각의 표면에서 각각의 개체가 독립적으로 패각을 파고든 후 기질 내부에서 갤러리를 형성하면서 서로 융합된 것으로 판단된다.

8-2. 천공배열

서귀포층은 많고 다양한 패류화석을 포함하고 있음에도 불구하고 해면동물의 천공 구조의 90 % 이상이 가리비 화석에서 발견된다. 이는 해면동물이 정착할 때 기질이 되는 생명체의 서식 환경의 차이에 따른 결과로 해석된다. 해저에 서식하는 동물은 퇴적물 내부에 서식하는 내생동물(infauna)과 퇴적물의 표면이나 암석에 고착하여 성장하는 표재동물(epifauna)로 구분된다. 연구지역에서 산출되는 가리비를 제외한 작은 이매패류나 굴족류, 완족류 등은 내생동물에 해당하는 반면 가리비는 표재동물로 암석에 고착하거나 물속에서 헤엄쳐 이동하며 서식한다. 즉 가리비는 내생동물에 비해 물에 노출되어 있는 시간이 길기 때문에 해면동물의 유충으로부터 공격당할 가능성이 크다. 이로 인해 대부분의 엔토비아 구조는 가리비 패각 화석에서 산출되는 것으로 생각된다.

가리비 패각에서 발견되는 엔토비아 구조는 패각의 내부 표면보다는 외부 표면에서 주로 발견되며, 외부에 존재하는 천공은 대체로 패각의 전체 표면에 광범위하게 분포한다. 반면에 패각의 내부 표면에 존재하는 천공 구조는 일부분에 한정적으로 나타난다. 이러한 현상은 가리비가 죽

은 후 뿐만 아니라 살아 있는 동안에도 해면동물이 정착했음을 의미한다. 살아있는 가리비의 경우 패각의 외부는 항상 물에 노출되어 있기 때문에 해면동물이 쉽게 고착할 수 있는 환경을 제공한다. 반면 내부 표면은 가리비가 살아있는 동안에는 노출되는 시간이 매우 짧으며, 유기질 막으로 피복되어 있어 해면동물의 고착이 불가능하다. 이러한 이유로 일차적으로 외부 표면에 엔토비아가 형성된다. 또한 해면동물은 가리비가 죽은 후에도 기질을 파고드는데, 이때에도 외부와 내부 표면을 뚫는 빈도는 상이하게 나타난다. 가리비가 죽은 후 분리된 패각은 수력학적으로 보다 안정적인 자세를 취한다(Bien et al., 1999). 패각의 경우 위로 볼록한 자세가 아래로 볼록한 것보다 안정적이므로 대부분의 가리비가 위로 볼록한 형태로 놓이게 되고 이것이 가리비의 외부 표면에서 천공 구조가 많이 산출되는 이유로 작용한다. 또한 아래로 볼록한 경우 패각의 오목한 부분에 퇴적물에 쌓인다. 여과 섭식 동물인 해면동물은 퇴적물에 의해 물이 차단되면 생존하기 어렵다. 이 때문에 아래로 볼록한 패각에 해면동물이 정착했는지라도 오랜 시간 생존할 수 없다. 이로 인해 패각의 내부 표면에서 발견되는 천공은 그 수가 적고 국지적으로 분포하는 양상을 보이는 것으로 판단된다.

패각의 외부 표면에서 나타나는 천공 중 일부 패각에서 각정 부분의 구멍이 크고 외각으로 갈수록 작아지는 경향을 가진다. 패각 내에서 천공의 크기가 상대적으로 크다는 것은 해면동물이 보다 오래 서식했음을 의미하고(Bromley and D'Alessandro, 1989), 이는 해면동물이 최초로 고착한 부분으로 생각된다. 이러한 경향성은 가리비의 성장패턴과 해면동물의 성장에 따른 상호작용으로 해석된다. 가리비는 초기에 각정에서 패각을 형성하기 시작해 내부의 막인 외투막(mantle)에서 탄산칼슘을 분비하여 등방향으로 성장한다. 어린 가리비에 해면동물이 정착한 경우 천공의 크기가 작고, 그 수 또한 적다. 하지만 가리비가 성장하면서 기질

내부에 서식하는 해면동물 또한 함께 성장하기 때문에 기존의 천공은 점점 커지고 패각이 새롭게 성장한 가장자리에는 작은 천공이 형성된다. 시간이 흐름에 따라 이러한 현상이 지속된 경우 패각에서 가장 오래된 부분인 각정에서 천공의 크기가 크고 가장자리로 갈수록 작아지는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

또한 패각 표면에 나타난 천공 구조 중 선적 배열을 보이는 패각이 관찰된다. 레진 충전 기법으로 내부 구조를 확인한 결과 챔버 또한 일렬로 배열되어 있었기 때문에 이는 해당 종의 고유한 특징으로 생각된다.

9. 결론

제주도 서귀포층은 이매패류를 비롯하여 굴족류, 복족류, 완족동물, 성게 등의 다양한 패류 화석이 산출된다. 이러한 패류화석에서는 환형동물과 복족류 및 해면동물에 의해 형성된 다양한 천공 구조가 나타난다. 그 중 해면동물의 천공 구조인 엔토비아(*Entobia*)는 선적 배열을 가지는 것과 불규칙하게 분포하는 것으로 구분되며, 이는 각각 *Entobia ovula*와 *Entobia megastoma*로 동정된다. 일반적으로 여러 개의 개체가 만드는 천공 구조는 선적 배열을 이루기 어려우므로 *E. ovula*는 하나의 개체에 의해 형성된 것으로 판단된다. 반면에 *E. megastoma*의 경우 주요 네트워크 외에 독립적인 초기 챔버가 나타나고 분리된 챔버들을 연결하는 관이 분포하므로 다수의 개체에 의해 형성된 것으로 생각된다. 한편 해면동물의 천공은 종의 구분과 상관없이 대부분이 가리비 화석에서 관찰되며 천공의 크기는 각정에서 패각의 가장자리로 갈수록 작아지는 경향성을 가진다. 이러한 경향은 당시 패각의 서식환경 및 성장과 밀접한 관련을 가지는 것으로 판단된다. 그리고 패각의 내부 표면 보다는 외부 표면에서 높은 산출빈도를 보인다. 이는 가리비가 살아있을 때 해면동물의 고착이 시작되었음을 의미한다. 결국 이러한 천공 구조의 특징은 생침식 구조를 만든 해면동물의 고유 생태뿐 만 아니라 해면동물이 기질에 정착할 당시 가리비의 서식환경 및 성장패턴 등에 영향을 받은 결과로 생각된다.

참고문헌

- 김인수, 이동호, 2000, 제주도 서귀포층과 서귀포조면암층 노두의 자기 층서와 대자율. 대한지질학회지, 36, 163-180.
- 민경덕, 원중선, 황석연, 1986, 제주도에 분포하는 화산암류 및 퇴적암 류에 대한 고지자기 연구. 대한광산지질학회지, 19, 153-163.
- 윤상규, 한대석, 이동영, 1986, 제주도 남부지역 제4기 지질조사 연구. 한국동력자원연구소, 서울, 64 p.
- 윤석훈, 조성권, 2006, 제주도 서귀포층의 퇴적상과 퇴적환경. 대한지질 학회지, 42, 1-17.
- 이용남, 이항재, 황재하, 2014, 제주도 서귀포층에서 산출된 백상아리 이빨. 지질학회지, 50, 643-647.
- 정규귀, 강소라, 윤선, 1997, 제주도 서남부지역 시추코아의 저서성 유 공충 화석군집. 한국고생물학회지, 13, 69-85.
- 최성자, 김유봉, 전희영, 김복철, 1998, 한국의 화석. 한국자원연구소, 대 전, 132 p.
- Asgaard, U., Bromley, R.G., 2012, Echinometrid sea urchins, their trophic styles and corresponding bioerosion. In: Wisshak, M. and Tapanila, L. (eds.), Current Developments in Bioerosion. Springer, Berlin, 279-304.
- Bien, W.F., Wendi, J.M. and Alexander, R.R., 1999, Site selection and behavior of sponge and bivalve borers in shells of the cretaceous oysters *exogyra cancellata* and *pycnodonte mutabilis* from delaware, U.S.A.. Historical Biology, 13, 299-315.

- Blissett, D.L., Pickerill, R.K. and Rigby, J.K., 2006, A new species of boring sponge from the White Limestone Group, Jamaica. *Caribbean Journal of Science*, 42, 247–251.
- Bromley, R.G. and D'Alessandro, A., 1984, The ichnogenus *Entobia* from the Miocene, Pliocene and Pleistocene of southern Italy. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 90, 227–296.
- Bromley, R.G. and D'Alessandro, A., 1989, Ichnological study of shallow marine endolithic sponges from the Italian coast. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 95, 279–314.
- Carriker, M.R., 1969, Excavation of boreholes by the gastropod, *Urosalpinx*: an analysis by light and scanning electron microscopy. *American Zoologist*, 9, 917–933.
- Casadio, S., Marensi, S.A. and Santillana, S.N., 2001, Endolithic bioerosion traces attributed to boring bryozoans in the Eocene of Antarctica. *Asociacion Paleontologica Argentina*, 38, 321–329.
- Chacon, E., Berrendero, E. and Pichel, F.G., 2006, Biogeological signatures of microboring cyanobacterial communities in marine carbonates from Cabo Rojo, Puerto Rico. *Sedimentary Geology*, 185, 215–228.
- Chazottes, V., Cabioch Guy, Golubic, S. and Radtke, G., 2009, Bathymetric zonation of modern microborers in dead coral substrates from New Caledonia—Implications for paleodepth reconstructions in Holocene corals. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280, 456–468.
- Cherchi, A., Buosi, C., Zuddas, P. and De Giudici, G., 2012, Bioerosion by microbial euendoliths in benthic foraminifera from

- heavy metal-polluted coastal environments of Portovesme (south-western Sardinia, Italy). *Biogeosciences*, 9, 4607–4620.
- Dong, H., Rech, J.A., Jiang, H., Sun, H. and Buck, B.J., 2007, Endolithic cyanobacteria in soil gypsum: Occurrences in Atacama (Chile), Mojave (United States), and Al-Jafr Basin (Jordan) Deserts. *Journal of Geophysical Research*, 112, G02030.
- Donn, T.F. and Boardman, M.R., 1988, Bioerosion of rocky Carbonate Coastlines on Andros Island, Bahamas. *Journal of Coastal Research*, 4, 981–394.
- Fischer, P., 1868, Recherches sur les éponges perforantes fossiles. *Nouvelles archives du Museum d'Histoire Naturelle de Paris*, 4, 117–172.
- Ghirardelli, L.A., 2002, Endolithic microorganisms in live and dead thalli of coralline red algae (Corallinales, Rhodophyta) in the Northern Adriatic Sea. *Acta Geologica Hispanica*, 37, 53–60.
- Glaub, I., 1999, Paleobathymetric reconstructions and fossil microborings. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 45, 143–146.
- Glynn, P.W., 1997, Bioerosion and coral reef growth: A dynamic balance. In: Birkeland, C. (ed.), *Life and Death of Coral Reefs*. Springer, United States, 69–98.
- Golubic, S., Brent, G. and Le Campion, T., 1970, Scanning electron microscopy of endolithic algae and fungi using a multipurpose casting-embedding technique. *Lethaia*, 3, 203–209.
- Golubic, S., Friedmann, I. and Schneider, J., 1981, The lithobiontic ecological niche, with special reference to microorganisms.

- Journal of Sedimentary Petrology, 51, 475–478.
- Golubic, S., Perkins, R.D. and Lukas, K.J., 1975, Boring microorganisms and microborings in carbonate substrate. In: Frey, R.W. (ed.), The Study of Trace Fossils. Springer-Verlag, Berlin, 229–259.
- Golubic, S., Radtke, G. and Le Campion-Alsumard, T., 2005, Endolithic fungi in marine ecosystem. Trends in Microbiology, 13, 229–235.
- Hannon, J.S. and Meyer, D.L., 2014, Microendolithic structures from the Fort Payne Formation (lower Mississippian), Kentucky and Tennessee: Implications for the paleoenvironment of carbonate mud-mounds. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 393, 20–29.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Cheju Island. Bulletin of Geological Survey of Korea, 10, 1–34.
- Hatch, W.I., 1974, The implication of carbonic anhydrase in the physiological mechanism of penetration of carbonate substrata by the marine burrowing sponge *Cliona celata*. Ph.D. Thesis, Boston University, 159 p.
- Hatch, W.I., 1980, The implication of carbonic anhydrase in the physiological mechanism of penetration of carbonate substrata by the marine burrowing sponge *Cliona celata* (Demospongiae). Biological Bulletin, 159, 135–147.
- Hutchings, P.A., 1986, Biological destruction of coral reefs. Coral Reefs, 4, 239–252.
- Hutchings, P., 2010, Role of polychaetes in bioerosion of coral

- substrates. In: Wisshak, M. and Tapanila, L. (eds.), Current Developments in Bioerosion. Springer, Berlin, 249–264.
- Kaehler, A. and McQuaid, C.D., 1999, Lethal and sub-lethal effects of phototrophic endoliths attacking the shell of the intertidal mussel *Perna perna*. Marine Biology, 135, 497–503.
- Kang, S., Jung, K.K. and Yoon, S., 1999, Benthic foraminiferal fauna from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea. Journal of the Paleontology Society of Korea, 15, 95–108.
- Kim, J.Y. and Heo, W.H., 1997, Shell beds and trace fossils of the Seogwipo Formation (Early Pleistocene), Jeju Island, Korea. Ichnos, 5, 89–99.
- Kolodziej, B., Golubic, S., Bucur, I.I., Radtke, G. and Tribollet, A., 2012, Early Cretaceous record of microboring organisms in skeletons of growing corals. Lethaia, 45, 34–45.
- Li, B., Park, B.K., Kim, D. and Woo, H.J., 1999, The geological age and paleoenvironment of the lower Seogwipo Formation, Cheju Island, Korea. Geosciences Journal, 3, 181–190.
- Liu, P.J. and Hsieh, H.L., 2000, Burrow architecture of the spionid polychaete *Polydora villosa* in the corals *Montipora* and *Porites*. Zoological Studies, 39, 47–54.
- Mao Che, L., Le Campion-Alsumard, T., Boury-Esnault, N., Payri, C., Golubic, S. and Bezac, C., 1996, Biodegradation of shells of the black pearl oyster, *Pinctada margaritifera* var. *cumingii*, by microborers and sponges of French Polynesia. Marine Biology, 126, 509–519.
- Mikulas, R. and Pek, I., 1996, Borings in the oyster shells from

- the Badenian at Ceska Trebova and its neighbourhood (Eastern Bohemia, Czech Republic). *Journal of the Czech Geological Society*, 41, 97–100.
- Neumann, A.C., 1966, Observations on coastal erosion in Bermuda and measurements of the boring rate of the sponge *Cliona lampa*. *Limnology and Oceanography*, 11, 92–108.
- Pantazidou, A., Louvrou, I. and Economou-Amilli, A., 2006, Euendolithic shell-boring cyanobacteria and chlorophytes from the saline lagoon Ahivadolimni on Milos Island, Greece. *European Journal of Phycology*, 41, 189–200.
- Pohowsky, R.A., 1978, Notes on the study and nomenclature of boring Bryozoa. *Journal of Paleontology*, 48, 557–564.
- Pomponi, S.A., 1980, Cytological mechanisms of calcium carbonate excavation by boring sponges. *International Review of Cytology*, 65, 301–319.
- Radtke, G., Glaub, I., Vogel, K. and Golubic, S., 2010, A new dichotomous microboring: *Abeliella bellafurca* isp. nov., distribution, variability and biological origin. *Ichnos*, 17, 25–33.
- Radtke, G. and Golubic, S., 2010, Microbial euendolithic assemblages and microborings in intertidal and shallow marine habitats: Insight in cyanobacterial speciation. In: Reitner et al. (eds.), *Advances in Stromatolite Geobiology*. Springer-Verlag, Berlin, 233–263.
- Radwsky, A., Wysocka, A. and Gorka, M., 2011, ‘*Entobia* balls’ in the Medobory Biohermal Complex (Middle Miocene, Badenian; Western Ukraine). *Acta Geological Polonica*, 61, 265–276.

- Schneider, J. and Torunski, H., 1983, Biokarst on limestone coasts, morphogenesis and sediment production. *Marine Ecology*, 4, 45-63.
- Shashar, N., Banaszak, A.T., Lesser, M.P. and Amrami, D., 1997, Coral endolithic algae: Life in a protected environment. *Pacific Science*, 51, 167-173.
- Simon, C.A., 2011, *Polydora* and *Dipolydora* (Polychaeta: Spionidae) associated with molluscs on the South Coast of South Africa, with descriptions of two new species. *African Invertebrates*, 52, 39-50.
- Tomas, P.A., 1979, Boring sponges destructive to economically important molluscan beds and coral reefs in Indian seas. *Indian Journal of Fisheries*, 26, 163-200.
- Tribollet, A. and Golubic, S., 2011, Reef bioerosion: Agents and processes. In: Dubinsky, Z. and Stambler, N. (eds.), *Coral reefs: An Ecosystem in Transition*. Springer, Dordrecht, 435-449.
- Tribollet, A. and Payri, C., 2001, Bioerosion of the coralline alga *Hydrolithon onkodes* by microboeres in the coral reefs of Moorea, French Polynesia. *Oceanologica Acta*, 24, 329-342.
- Tribollet, A., Radtke, G. and Golubic, S., 2011, Bioerosion. In: Reitner, J. and Thiel, V. (eds.), *Encyclopedia of Geobiology*. Springer, Dordrecht, 117-134.
- Uchman, A., Demircan, H., Toker, V., Derman, S., Sevim, S. and Szulc, J., 2001, Relative sea-level changes recorded in borings from a Miocene rocky shore of the Mut Basin, southern Turkey. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 72, 263-270.

- Verbruggen, H. and Tribollet, A., 2011, Boring algae. *Current Biology*, 21, 876-877.
- Vogel, K., Balog, S.F., Bundschuh, M., Gektidis, M., Glaub, I., Kruttschinna, J. and Radtke, G., 1999, Bathymetrical studies in fossil reefs, with microendoliths as paleoecological indicators. *Profil*, 16, 181-191.
- Walker, S.E., 2007, Traces of gastropod predation on molluscan prey in tropical reef environments. In: Miller, W. (ed.), *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier, Amsterdam, 324-344.
- Warne, J.E., 1975, Borings as trace fossils, and the processes of marine bioerosion. In: Frey, R.W. (ed.), *The Study of Trace Fossils*. Springer-Verlag, Berlin, 181-226.
- Wilson, M.A., 2007, Macroborings and the evolution of marine bioerosion. In: Miller, W. (ed.), *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier, Amsterdam, 356-367.
- Wisshak, M., 2012, Microbioerosion, In: Knaust, D. and Bromley, R.G. (eds), *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*, Elsevier, Amsterdam, 213-243.
- Wisshak, M., Gektidis, M., Freiwald, A. and Lundalv, T., 2005, Bioerosion along a bathymetric gradient in a cold-temperate setting (Kosterfjord, SW Sweden): an experimental study. *Facies*, 51, 93-117.
- Yi, S.S., Yun, H.S. and Yoon, S., 1998, Calcareous nannoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleoceanographic implications. *Paleontological Research*, 2,

253-265.

Yoon, S., 1981, The Seoguipo Molluscan Fauna of Jeju Island, Korea. Saito Ho-on Kai Special Publication, 539-545.

You, H.S., Koh, Y.K. and Kim, J.Y., 1987, Nannofossils from the Seoguipo Formation in Cheju Island, Korea. Journal of the Paleontology Society of Korea, 3, 108-121.

Zottoli, R.A. and Carriker, M.R., 1974, Burrowing morphology, tube formation, and microarchitecture of shell dissolution by the spionid polychaete *Polydora websteri*. Marine Biology, 27, 307-316.

Entobia* structures on surface of fossil scallops from the Seogwipo Formation, Jeju Island

Lee Mi-Hee

*Department of Geology
Graduate School, Kyungpook National University
Daegu, Korea
(Supervised by Professor Lee Seong-Joo)*

(Abstract)

The early Cenozoic Seogwipo Formation, Korea, contains beautifully preserved diverse carbonate shells including bivalves, gastropods, scaphopods and brachiopods. Among them, a great number of diverse boring structures (spherical holes and sinuous tunnels) are detected on the surfaces of bivalve shells. The isolated large holes (50mm) are interpreted as gastropods' boring structures while sinuous tubules are identified as polychaetes traces. The most dominant boring structures are tiny holes (0.1-1.2mm) developed most exclusively on scallop fossils. They are interpreted as apertures of ichnofossil *Entobia*, traces of boring sponge belonging to the family Clionaidae. SEM investigation using resin-cast made by alcohol-series embedding techniques reveals beautifully preserved internal networks of *Entobia*, which is characterized by spherical to polygonal shaped *Entobia* balls connected each other by intercameral canals, finally forming a complicated *Entobia* networks inside the shells. The *Entobia* fossils are ornamented by a raspberry-like bumpy surface, probably carved structure generated by mechanical scooping of sponge chips. Two ichospecies were identified: *Entobia ovula* and *Entobia megastoma*. *E. ovula* is characterized by more or less spherical balls connected linearly to next ones by short tunnels, finally forming directional arrangement of *Entobia* balls within the shells. Such a directionality of *E. ovula* is also identifiable on shell surfaces, linear distribution of tiny holes (i.e., aperture). *E. megastoma*, on the other hand, is

* A thesis submitted to the Council of the Graduate School of Kyungpook National University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in June 2015

characterized by flat and polygonal to irregular *Entobia* balls connected randomly without clearly definable intercameral canals. Consequently, *E. megastoma* produces more complicated networks within scallop shells than *E. ovula*, and no directional distribution of surface holes are visible in traces of *E. megastoma*. The facts that most holes are found on external surfaces of scallops (a few on internal surface of shells), and that size of holes become smaller toward the margin of shells strongly indicate that the Seogwipo scallops were attacked by boring sponge animals while they were alive. An occurrence of *Entobia* boring structures almost exclusively on scallops may be related with scallops' life style, which could have supported more suitable habitats for boring sponges than other mollusk shells found in the Seogwipo Formation. This is the first report of *Entobia* in Korea.