

## 경상남도 남해지역의 진주층에 분포하는 막대기형 스트로마톨라이트

이성주\* · 공달용  
경북대학교 지질학과

### 요 약

경상남도 남해의 육성퇴적층인 진주층에서 일반적으로 널리 알려진 스트로마톨라이트(판상형, 주상형, 반구형)를 비롯하여 전 세계적으로 드물게 보고 되는 막대기형 스트로마톨라이트가 다수 발견되었다. 막대기형 스트로마톨라이트는 나무줄기 표면에 서식하던 착생 미세조류에 의해 나무줄기의 표면에 동심원 구조의 탄산염광물이 침전되어 형성된 구조이다. 길게 신장되어 발견되는 막대기형 구조는 식물의 가지가 보존된 상태로 발견되기도 하며, 스트로마톨라이트의 내부에 잔류 식물조직이 관찰되어 이를 증명한다. 또한 내부에서 관찰되는 엽층리구조는 불규칙적으로 구불구불한 유기 엽층과 퇴적물 엽층이 반복적으로 교호되는 전형적인 스트로마톨라이트의 미세엽층리구조를 보인다. 유기 엽층에서는 다양한 사상체 화석이 발견되는데, 이들은 짙은 갈색의 마이크로이트 벽을 가진, 내부는 스파라이트로 채워진 석회화된 미세관의 형태로 관찰된다. 사상체의 직경은  $1\text{--}44\ \mu\text{m}$  이다. 이들은 사상체의 직경, 분지의 유무 및 생태적 역할에 의해 크게 두 그룹으로 분류되었다. 이 중 직경이  $6\text{--}8\ \mu\text{m}$ 인 사상체 화석은 남조세균으로 추정되며 막대기형 스트로마톨라이트를 형성하는 주요 생물군이다. 반면, 직경이  $26\text{--}29\ \mu\text{m}$  사이인 사상체 화석은 녹조류로 판단되며, 스트로마톨라이트의 형성에 보조적 역할을 했던 것으로 추정된다.

**주요어:** 남조세균, 남해, 막대기형 스트로마톨라이트, 미세엽층리, 사상체 화석, 진주층

**Seong-Joo Lee and Dalyong Kong, 2004, Rod-shaped stromatolites from the Jinju Formation, Namhae, Gyeongsangnam-do, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 40, no. 1, p. 13-26**

**ABSTRACT:** The sedimentary sequence of the non-marine Cretaceous Jinju Formation from Namhae, Korea contains a great number of rod-shaped stromatolites(RSS) characterized by concentric lamination, together with stratiform, domal and columnar stromatolites. The original, branched gross morphology of the ancient plant twigs is often preserved, and remains of plant tissues are well preserved in the central parts of the RSS that is now filled with siliciclastic sediments following degradation of the original plant materials. They are, therefore, interpreted as stromatolitic algal and microbial encrustations over dead or living plant twigs, which formed through concentric carbonate precipitation by epiphytic algal photosynthesis. Varied filamentous fossils were found in the organic-rich layers, which are calcified tiny tubes characterized by brown micritic walls and light central parts composed of sparite. Size of filament diameter ranges from 1 to  $44\ \mu\text{m}$ . Based on size of diameter, absence or presence of branching pattern, and/or their ecological roles in the formation of stromatolites, the filaments were classified into two groups: cyanobacteria ( $6\text{--}8\ \mu\text{m}$ ) and green algae ( $26\text{--}29\ \mu\text{m}$ ). The cyanobacterial fossils played a key role in the formation of rod-shaped stromatolites, while green algal filaments were auxiliary stromatolite-builders.

**Key words:** Cyanobacteria, Namhae, rod-shaped stromatolites, fine lamination, filamentous fossils, Jinju Formation

(Seong-Joo Lee, Dal Yong Kong, Department of Geology, Kyungpook National University Sangyok-dong 1370, Buk-gu, Daegu, Korea)

\* Corresponding author: Tel. +82-53-950-5354, E-mail. sjl@knu.ac.kr

## 1. 서 언

“스트로마톨라이트”란 생물체(박테리아 및 미세조류)의 활동에 의해 형성되어지는 다양한 형태의 유기퇴적구조(organo-sedimentary structure)로 정의된다(e.g., Kalkowsky, 1908; Walter, 1976; Golubic, 1991). 이들은 전 지질학적 시간(선캠브리아 이언~현생)에 걸쳐, 모든 수성 퇴적환경(담수 및 해수)에서 나타나며, 스트로마톨라이트를 형성하는 생물군 및 환경(천해, 심해, 조간대 및 담수)의 차이에 따라 형태를 달리하여 산출된다. 때문에 스트로마톨라이트는 다양한 지질학적 가치를 지니며, 특히 환경을 지시하는 도구로 널리 사용되어져 왔다(Walter *et al.*, 1992; Grotzinger, 1994).

이들의 외부형태는 반구형(domal stromatolite)이나 기둥모양(columnar stromatolite) 또는 편평한 층상(stratiform stromatolite)의 형태가 대부분이며, 일반적으로 이러한 외부형태는 스트로마톨라이트가 형성되는 환경의 차이에서 기인한다(Walter *et al.*, 1992). 반면, 스트로마톨라이트의 가장 중요한 요소인 미세엽층리 구조는 환경적 영향보다는 스트로마톨라이트를 형성하는 생물군의 차이 때문인 것으로 알려져 있다(Golubic, 1976). 때문에 일반적인 스트로마톨라이트의 연구는 외부 형태 및 미세엽층리 구조 등의 퇴적학적 연구와, 이들을 형성하는 화석(박테리아 및 미세조류 화석)에 대한 고생물학적 연구가 병행적으로 진행된다(Horodyski and Vonder Haar, 1975; Knoll and Golubic, 1979, 1992).

백악기 육성 퇴적층인 경상분지에는 스트로마톨라이트가 다량 분포하고, 형태의 다양성, 미세조류 화석의 산출 및 보존상태가 우수하여, 국내 스트로마톨라이트 연구에 중점이 되는 지역이다(Lee *et al.*, 1991; Lee and Woo, 1996). 특히 진주층은 다양한 스트로마톨라이트의 산출로 연구 가치가 매우 높다. 진주층에서는 전 세계적으로 널리 알려진 일반적인 형태의 스트로마톨라이트(층상형, 주상형 및 반구형)외에 막대기 모양의 스트로마톨라이트가 다량 분포하여, 이들에 대한 연구 가치가 특히 높은 지역이다. 막대기 형태의

스트로마톨라이트는 다른 형태의 스트로마톨라이트에 비해 전 세계적으로 극히 미약하게 산출되고 있다. 이러한 모양의 스트로마톨라이트는 유럽(e.g., Pedley, 1994; Neuweiler *et al.*, 1997)과 북미(e.g., Herman and Hubbard, 1990)의 호성 또는 하성 환경에서 주로 보고 되고 있으며, 해성 환경에서의 산출은 극히 드물다(Monty, 1972; Braithwaite *et al.*, 1989). 또한 막대기형 스트로마톨라이트는 모두가 중생대와 신생대(현생 포함) 이후의 지층에서만 발견되었고 스트로마톨라이트의 대부분이 산출되는 선캠브리아 지층에서는 보고 된 적이 없다.

본 논문은 경상남도 남해지역의 진주층에서 발견되는 막대기형 스트로마톨라이트를 보고하고 이들의 생성 과정을 유추하며, 막대기형 스트로마톨라이트 형성에 있어서의 생명체(박테리아를 포함한 미세조류 화석)의 역할을 규명하는데 좋은 자료를 제공하리라 여겨진다. 뿐만 아니라 남해지역의 백악기 당시의 호수 환경을 밝히는데 커다란 역할을 할 것으로 기대된다.

## 2. 지질개요

연구 지역인 남해도(이하 남해)는 행정구역상으로 경상남도 남해군에 속하며, 70개의 크고 작은 섬으로 이루어진 우리나라에서 4번째로 큰 섬이다. 남해는 경상분지의 최남단에 위치하며 선캠브리아 변성암류의 기반암위에 경상누층군의 지층들이 퇴적되어 있고, 이들 지층들은 불국사 관입암류에 의해 관입되어 있다(그림 1). 연구 지역에서는 경상누층군의 신동층군(하산동층, 진주층)과 하양층군(칠곡층, 신라역암, 함안층, 진동층) 그리고 유천층군의 지층들이 모두 분포하나 스트로마톨라이트는 신동층군의 진주층에서만 산출된다. 이 지역의 하산동층은 고현면 갈화리에서 수원능 등대에 이르는 북서 상단에서 조금 관찰될 뿐, 진주층이 하위의 하산동층과 정합 관계를 가지며 일정한 층후(800~1,000 m)를 유지한 채 넓게 분포하고 있다. 스트로마톨라이트가 산출되는 진주층은 담회색 내지 회색 사암, 암회색 내지 흑색 셰일, 암회색 이암, 역질 사암, 역암 등으로 구성

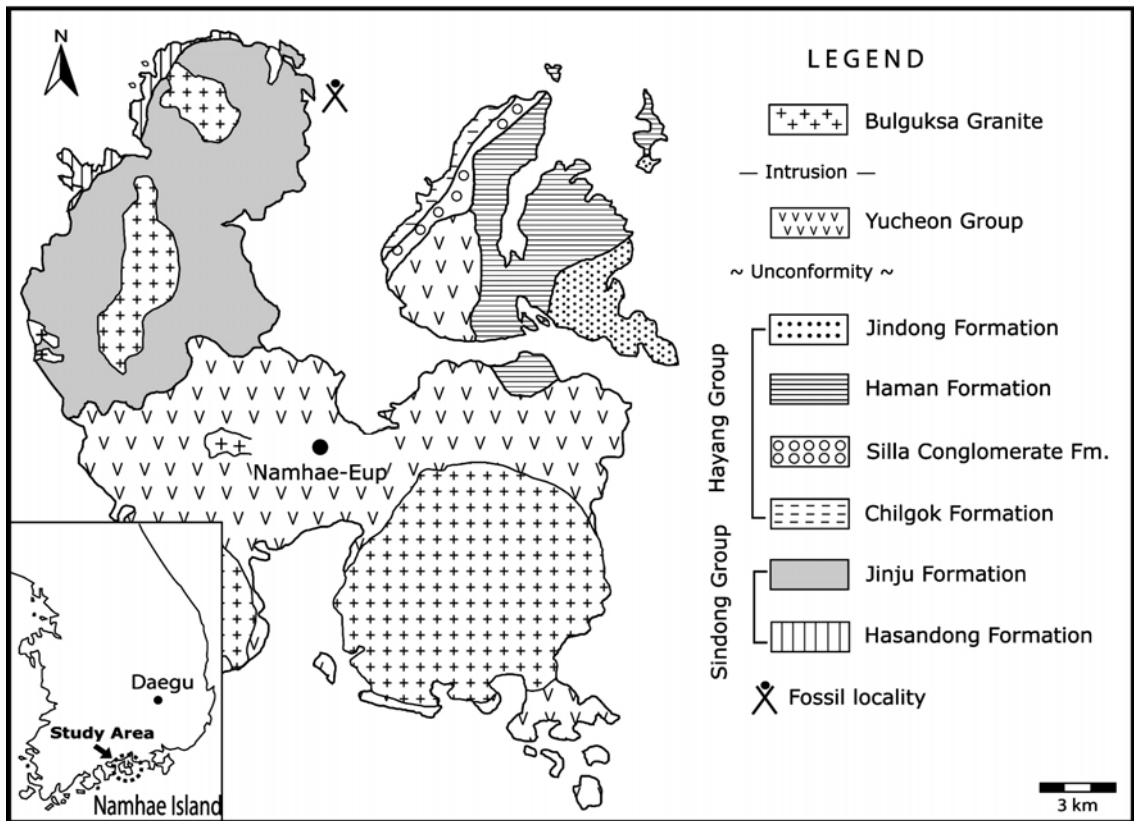


Fig. 1. Geologic map of Namhae Island, Gyeongsangnam-do, Korea and fossil locality of rod-shaped stromatolites.

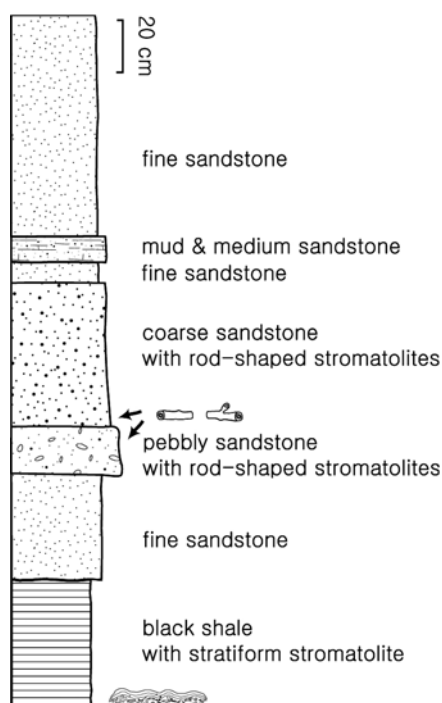
되어 있으나, 전반적으로 조립내지 중립의 암회색 사암과 암회색 이암 및 세일이 호층을 이루고 있다. 사암과 이암의 호층 내에서 간혹 석회질 단구가 발견되기도 한다. 전반적인 주향과 경사는 각각  $N60-80^{\circ}E$ ,  $10-20^{\circ}SE$  방향을 나타낸다. 사암과 세일에는 사층리, 연흔 및 빗방울자국 등의 퇴적구조들과 함께 복족류, 개형충 및 식물줄기 화석 등이 관찰되고 있다.

남해의 진주층에서는, 막대기형 스트로마톨라이트와 더불어, 작은 반구형, 주상형 및 기저물질을 얇게 피복하며 산출되는 층상형 스트로마톨라이트가 산출된다. 대부분의 이러한 스트로마톨라이트는 암회색 내지 흑색 세일층에 약 20 cm의 층을 이루며 협재되어 나타나며, 스트로마톨라이트 층의 횡적 연장성은 그리 좋지 않다(50 cm 내외). 이와는 달리 막대기형 스트로마톨라이트는 역질 사암 및 조립질 사암에서 발견된다(그림 2, 3A). 일반적으로 막대기형 스트로마톨라이트

트는 층리면 위에 독립적으로 떨어져서 분포하거나, 무덤 형태의 군집을 이루며 산출된다(그림 3). 독립적으로 떨어져서 산출되는 경우 막대기 구조의 장축이 층리면에 수평으로 배열되어 있지만 층리면에 따른 장축의 특정한 방향성은 보이지 않는다. 반면 군집으로 산출되는 경우에는 막대기형 스트로마톨라이트가 층리면에 불규칙하게 경사를 이루며 무질서하게 배열되어 있다.

### 3. 막대기형 스트로마톨라이트

막대기형 스트로마톨라이트란 전 세계적으로도 드물게 보고 되는 스트로마톨라이트의 유형으로, 외형적으로 수 cm의 직경과 길이의 다양한 크기를 보이는 길게 신장된 모양의 스트로마톨라이트를 일컫는다(Monty, 1972; Freytet and Plaziat, 1982; Herman and Hubbard, 1990; Neuweiler *et al.*, 1997). 내부구조는 광물성분과 구조의 차



**Fig. 2.** Stratigraphic column of a fossil locality containing both stratiform and rod-shaped stromatolites. Note that rod-shaped stromatolites are found within coarse and/or pebbly sandstones, while stratiform ones within shales.

이에 의해 두 부분으로 나뉜다. 중심부분은 엽층리구조가 나타나지 않으며 일반적으로 쇄설성 퇴적물로 채워져 있다. 반면, 중심부분을 둘러싸고 있는 부분은 석회질 성분으로 구성되어 있으며 미세엽층리구조가 동심원상으로 발달된 전형적인 스트로마톨라이트 엽층리구조를 보인다.

### 3.1 산출 양상 및 형태

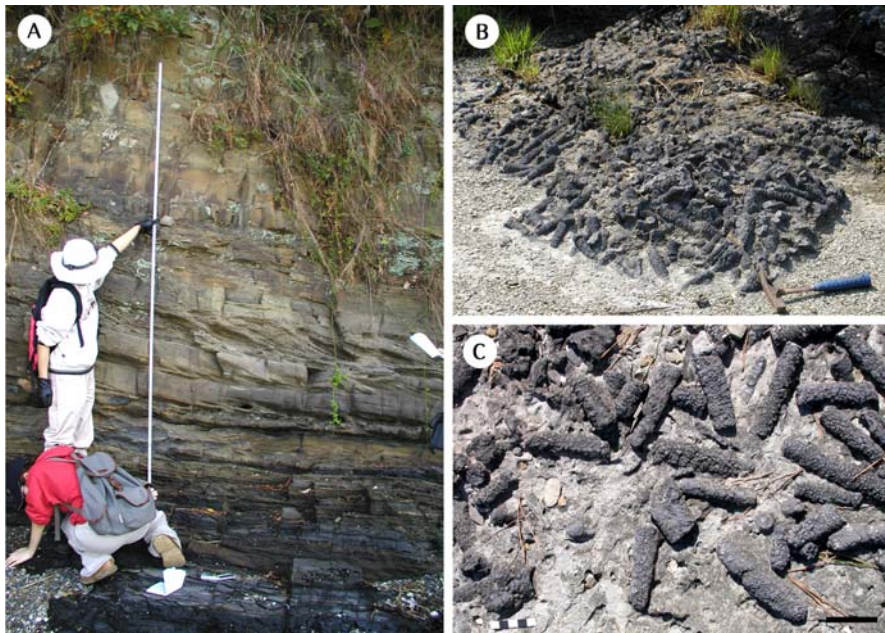
남해에서 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트는 하나의 개체가 독립적으로 따로 떨어져서 산출되는 형태(그림 3C)와 층리면 위에 집합적(그림 3B)으로 나타나는 형태로 크게 나뉜다. 독립적으로 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트는 역질 사암 및 조립질 사암 내에서 발견되며, 이들은 사암 내에서 일정한 방향성을 보이지 않으며 불규칙하게 분포되어 있다. 반면, 군집을 이루며 산출되는 스트로마톨라이트는 주로 암회색 셰일의 층리면 위에서 작은 무덤의 형태를 보이며

나타난다. 모양이 같은 막대기형 스트로마톨라이트가 다른 암질에서 산출되는 양상은 아마도 생성환경의 차이나, 생성된 후 이동되어 퇴적되었음을 시사한다.

막대기형 스트로마톨라이트는 대부분 5-10 cm의 크기를 가지며, 15 cm 정도의 다소 큰 것들로 발견된다. 단면의 직경은 4 cm를 초과하지 않는다(그림 4). 이들의 크기와 직경은 손가락 모양과 같이 길이와 단면을 약간씩 달리하여 산출되고 있으며, 일부는 그 끝이 좁아지는 경향을 보인다. 대다수의 막대기형 스트로마톨라이트는 곧은 형태를 보이나 간혹 나뭇가지처럼 분지하는 형태를 보존하고 있는 것들도 관찰된다(그림 4C, 5A, 5B, 5C). 가지형태는 두 갈래 내지 세 갈래의 형태를 보이며 분지하는 가지는 일반적으로 원가지 보다 두께가 얇다. 또한 휘어져서 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트와 압력에 의해 납작하게 눌린 것들도 발견된다(그림 4D, 5B).

본 연구지역에서 관찰되는 막대기형 스트로마톨라이트의 대부분은 내부가 쇄설성 퇴적물로 채워져 있으나(그림 4D), 간혹 내부가 비어있는 것들도 관찰된다(그림 4B, E). 내부가 비어있는 막대기형 스트로마톨라이트도 지표면에 노출되지 않은 부분은 쇄설성 퇴적물로 채워진 것으로 미루어, 본래는 쇄설성 퇴적물로 채워져 있었다가 나중에 내부의 쇄설성 물질들이 빠져나가 비어있게 된 것으로 추정된다. 중심부분에는 간혹 후기에 형성되어진 석회질의 시멘트 물질도 존재한다. 특히, 쇄설성 퇴적물로 채워진 내부의 중심부분과 미세엽층리구조를 보이는 동심원의 스트로마톨라이트가 인접하는 공간에는 공간충전물질(original void-filling)인 석회질 물질로 채워져 있다(그림 5A, 화살표 부분).

내부를 채우고 있는 쇄설성 퇴적물은 막대기형 스트로마톨라이트를 둘러싸고 있는 암질(사암 또는 셰일)과 동일하다(그림 4D). 이는 남해지역에서 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트들이 그 자리(in situ)에서 만들어진 현지성 요소(autochthonous elements)가 아닌 다른 곳에서 형성된 후 재퇴적된 타지성 요소(allochthonous elements)임을 의미한다. 특히 조립질 사암의 퇴적환경은 스트로



**Fig. 3.** Cretaceous rod-shaped stromatolites from the Jinju Formation, Namhae. (A) Stratigraphic section containing rod-shaped stromatolites within coarse and/or pebbly sandstones; (B) Aggregated, tomb-like assemblage of rod-shaped stromatolites; (C) Bedding plane view of rod-shaped stromatolites. Note that long axes of the rod-shaped stromatolites are randomly distributed.



**Fig. 4.** Various rod-shaped stromatolites. (A) Rod-shaped stromatolites showing different length and width; (B) Rod-shaped stromatolites were broken parallel to long axis. Remnants of original plant materials were visible in the center of a left specimen; (C) Branched twig is still remained; (D) Central part of rod-shaped stromatolites is filled with siliciclastic sediments identical to those surrounding; (E) Clastic sediments are missing. Scale bar in (E) represents 1 cm for (E) and (D), 3 cm for (C).

마톨라이트의 주구성광물인 탄산염암의 생성 및 스트로마톨라이트를 성장시키는 미세조류의 서식지로 매우 부적절하다. 따라서 스트로마톨라이트 형태를 띠는 막대기가 다른 지역에서 생성되어 이동한 후, 내부가 현재 발견되는 지역의 쇄설성 퇴적물로 채워진 것으로 추정된다.

### 3.2 미세엽층리구조

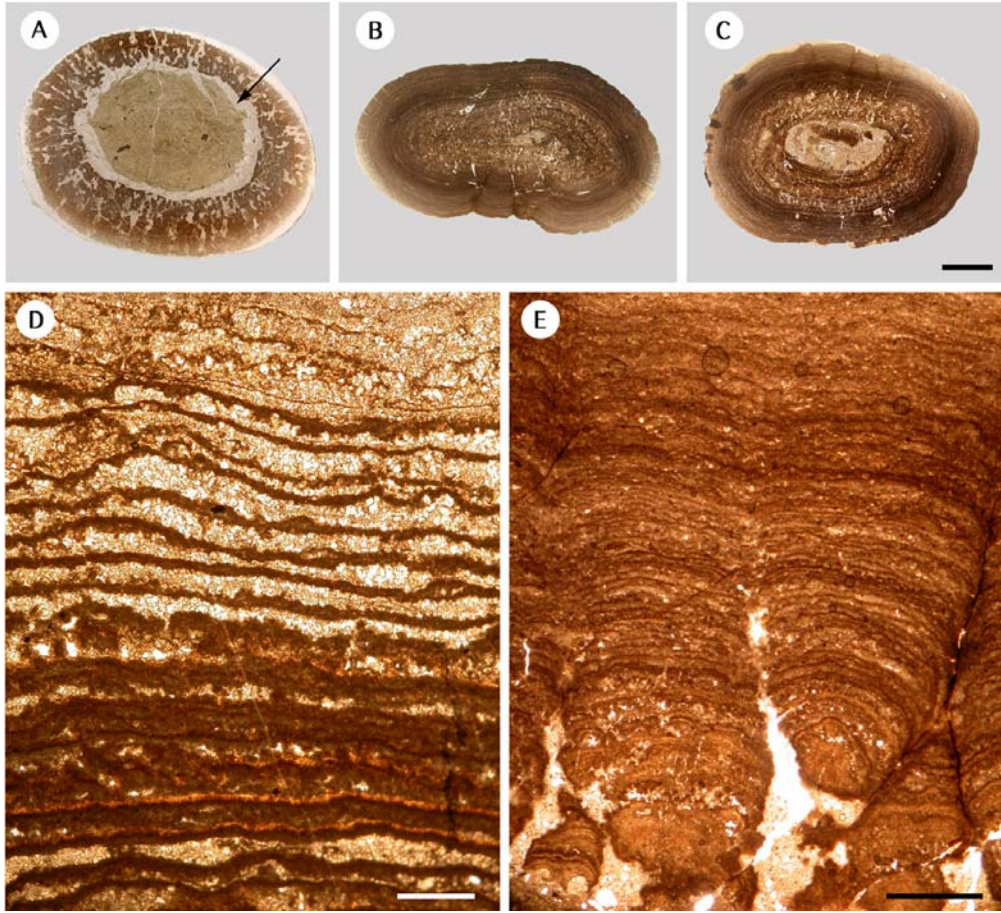
미세엽층리구조는 스트로마톨라이트의 핵심 구성요소이다(e.g., Semikhatov *et al.*, 1979). 따라서 외부 형태에 관계없이 모든 스트로마톨라이트는 내부에 잘 발달된 미세엽층리구조를 보인다. 생성조건이나 외형은 같으나 미세엽층리구조가 발달되지 않은 구조는 스트로마톨라이트와는 달리 쓰롬볼라이트(thrombolite)라 부른다(Aitken, 1967, Ferris *et al.*, 1997). 이러한 미세엽층리구조는 크게 2가지 차이에 의해서 암석표면이나 박편상에서 엽층리구조를 띠게 되는데, 광물의 차이(예, 방해석, 돌로마이트)와 스트로마톨라이트를 형성하는 생물의 많고 적음의 차이(organic-rich, sediment-rich) 때문이다(Seong-Joo and Golubic, 2000; Seong-Joo *et al.*, 2000). 결과적으로 각각의 엽층은 색깔이나 두께가 차이에 의해 선명한 미세엽층리구조를 나타내게 된다.

남해지역에서 발견되는 막대기형 스트로마톨라이트에서도 전형적인 스트로마톨라이트의 미세엽층리구조를 보인다(그림 5). 짙은 갈색의 유기질이 많은 엽층(organic-rich layer, 이하 유기엽층)과 밝은 색의 석회질 퇴적물이 많은 엽층(sediment-rich layer, 이하 퇴적물엽층)이 반복적으로 교호되어 특징적인 스트로마톨라이트의 미세엽층리구조를 나타낸다(그림 5D, E). 유기엽층은 미크라이트 성분으로 되어있으며, 엽리 내부에 이들을 형성하는 미세조류 화석들이 관찰된다. 보존상태가 좋은 경우에는 유기엽층의 대부분이 미세조류화석으로만 이루어진 경우도 있다. 미세조류 화석의 대부분은 사상체 화석(filamentous fossils)들로 이루어져 있으며 구상 화석(cocoid fossils)은 발견되지 않는다. 이러한 사상체 화석은 엽층리면에 수직으로 배열되어 있다. 이와 달리 퇴적물엽층은 스파라이트 방해석으로 주로 구성되어 있

으며, 유기물질이나 화석이 거의 존재하지 않아 밝은 색을 띤다. 간혹 퇴적물 엽층에서도 사상체 화석이 발견되기도 하나, 그 수는 현저히 적다.

이러한 미세엽층리구조는 물리화학적 작용에 의해서 형성되는 엽층리구조(e.g., varve structure)와 달리, 불규칙한 파상엽층리(wavy lamination)의 특징을 보인다. 엽층의 횡적 연장성은 일반적으로 양호하나, 물리화학적 엽층에 비해 우수하지는 않다. 이는 엽층을 형성하는 미세조류의 분포와 성장이 국지적으로 차이가 있기 때문이다(Hofmann, 1969; Knoll and Semikhatov, 1998). 또한 엽층의 수직적 연속성장(inheritance of convexity)도 물리화학적 엽층에 비해 매우 불규칙하다. 이러한 불규칙성은 물리화학적 작용에 의해 형성되는 엽층과는 달리 스트로마톨라이트의 엽층은 퇴적면 위에 서식하는 생물의 영향에 의해서 형성되기 때문이다(Riding, 1994).

유기 엽층은 막대기형 스트로마톨라이트가 성장하기 시작하는 부분에서 두껍고 선명하게 발달하며 스트로마톨라이트의 성장이 계속되면서 유기엽층 및 전반적인 미세엽층리구조도 희미해지는 경향을 보인다(그림 5D). 유기엽층의 두께는 가늘어지는 반면, 퇴적물엽층은 상대적으로 두껍게 발달한다. 또한 스트로마톨라이트가 형성되기 시작하는 초기에는 대체적으로 반구형이나 작은 주상형태의 엽층이 발달하며 각각의 기둥 사이에 쇄설성 물질들이 퇴적된다(그림 5E). 이러한 기둥들은 성장하면서 윗부분(stromatolitic head)이 커지고 이웃하는 주상의 엽리들이 만나 각각의 기둥들은 연결되어 편평하고(planar) 꾸불꾸불한(wavy) 형태의 전형적인 막대기형 스트로마톨라이트의 엽층리를 형성한다. 간혹, 스트로마톨라이트의 성장후기에 방사상 패턴을 보이면서 독립적으로 발달된 덩불(bush) 형태의 엽층리가 관찰되는데, 덩불 내에서 발달하는 내부엽층리(internal lamination)는 전형적인 스트로마톨라이트의 경우처럼 퇴적물엽층과 유기엽층의 반복으로 나타나지 않고, 유기 엽층의 색깔의 차이에 의해 나타난다. 이러한 현상은 덩불내부의 엽층이 하나의 미세조류 종(e.g., *Rivularia*, *Calothrix*)의 성장에 의해 형성되는 엽층이기 때문이다. 방사상의



**Fig. 5.** Thin sections cut perpendicular to long axis and stromatolitic fine lamination of rod-shaped stromatolites. (A) A central part filled with clastic sediments and an outer part composed of stromatolitic limestones is clearly divided by light area (arrow) that is composed of later diagenetic cements; (B) Compacted rod-shaped stromatolites; (C) Stromatolitic concentric lamination is clearly visible; (D) Characteristic lamination of rod-shaped stromatolites showing alteration of brown coloured organic-rich layers and light sediment-rich layers; (E) Stromatolitic columns are fused together forming planar lamination in the course of stromatolitic growth. Scale bar in (C) is 1 cm for (A), (B), and (C), scale bar in (D) and (E) represents 200  $\mu\text{m}$ .

로 성장하는 사상체의 불연속적인 성장에 의해 형성되는 것으로서, 옅은 갈색으로 보이는 부분은 빠른 성장기, 짙은 갈색으로 보이는 부분은 사상체의 느린 성장기를 나타낸다(Monty, 1976).

#### 4. 스트로마톨라이트를 형성하는 화석

남조세균(cyanobacteria or blue-green algae), 녹조류(green algae), 규조류(diatoms) 및 균류(fungi)를 포함하여 많은 생물들이 스트로마톨라이트

를 형성하는 것으로 알려져 있으나, 남조세균이 그 중 가장 우세하다(e.g., Freytet and Verrecchia, 1998; Golubic *et al.*, 2000). 이러한 생명체들은 끈끈한 점액질 물질(extra polysaccharide materials)을 분비하기 때문에 작은 쇄설성 입자들을 이러한 생명체들이 서식하는 퇴적면 위에 점착하여 스트로마톨라이트를 형성하는 것으로 알려져 있다(e.g., trapping and binding, Awramik *et al.*, 1976). 하지만 이러한 현상은 현생 스트로마톨라이트(e.g., Shark Bay, Australia)의 관찰에 의한 설명으로

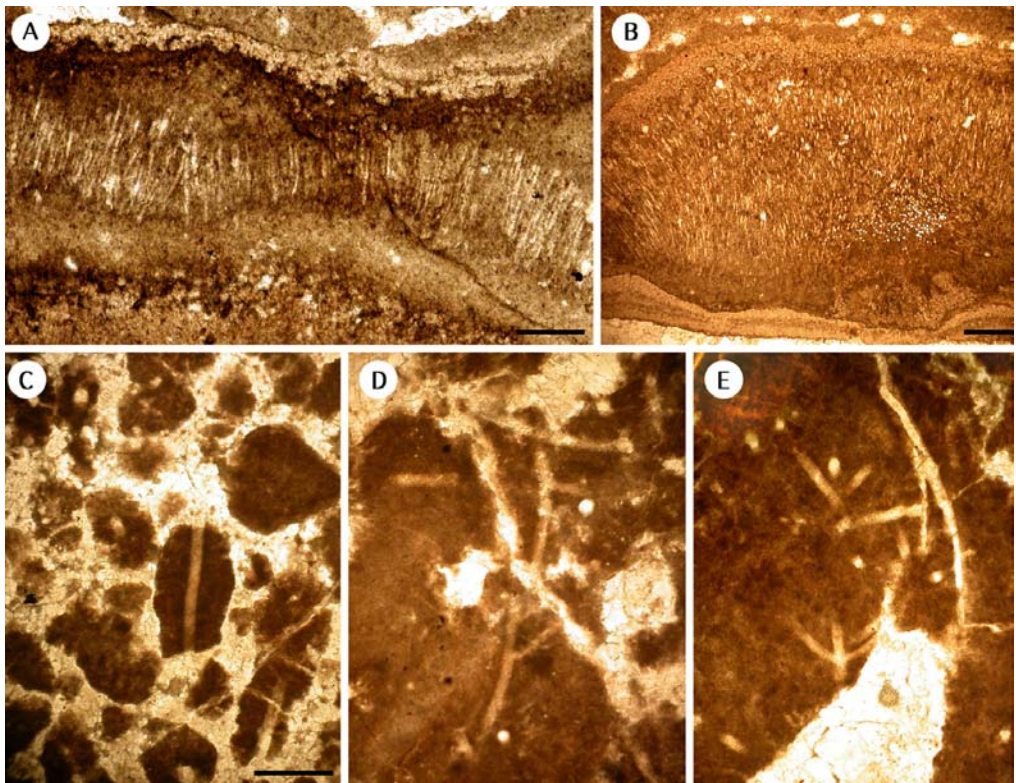
대부분이 석회질광물질로 이루어진 화석 스트로마톨라이트에서는 적용이 어렵다. 반면 거의 모든 스트로마톨라이트 화석은 생명체들의 광합성 작용에 의한 주변 수성환경의 수소이온농도(pH)를 변화시켜, 탄산염광물의 침전을 촉진시켜서(또는 생명체 자신을 탄산염 광물질로 피복하여), 스트로마톨라이트를 형성하는 것으로 알려져 있다(Golubic, 1973; Krumbein and Giele, 1979; Pentecost, 1990; Merz-Preib, 2000). 따라서 보존이 양호한 스트로마톨라이트에는 이들의 형성을 주도한 생명체들이 석회화된 형태로 보존되어 나타난다.

일반적으로 스트로마톨라이트를 형성하는 생명체는 사상체(filaments)와 구상체(coccolids)의 두 가지 형태로 구분되는데(Golubic, 1976; Knoll and Golubic, 1992), 남해에서 발견되는 막대기형 스트로마톨라이트에서는 사상체 화석만이 발견된다.

발견된 사상체 화석은 미크라이트 막을 가진 긴 원통의 모양을 하고 있으며, 원통의 내부는 스파라이트 물질로 채워져 밝게 보인다(그림 6). 남해의 막대기형 스트로마톨라이트를 형성하는 사상체 화석은 크게 두 그룹으로 분류가 되는데, 이들은 각각 사상체의 형태 및 직경, 그리고 스트로마톨라이트 형성에 있어서의 생태적 역할(e.g., main mat-builder or auxiliary mat-builder) 등에서 차이가 난다(그림 7; 표 1).

#### 4.1 사상체 남조세균 화석

사상체 박테리아 화석은 주로 막대기형 스트로마톨라이트 엽층리의 아래 부분에서 관찰되는, 머리카락처럼 긴 튜브 모양의 화석이다. 이들의 외부는 짙은 갈색의 미크라이트로 피복되어 있고, 내부는 투명한 스파라이트로 채워져 있어서 식별



**Fig. 6.** Calcified filamentous microfossils. (A, B) Cyanobacterial filaments are erected perpendicular to lamination forming organic-rich layers; (C, D, E) Green algal filaments showing unbranched(C), dichotomously(D), and trichotomously(E) branched fossils. Scale bar in (A), (B), and (C) represents 150  $\mu$ m, and scale bar in (C) applies to (D) and (E).

**Table 1.** Characteristics of filamentous microfossils found from rod-shaped stromatolites of the Jinju Formation, Namhae.

| filamentous fossils      | number of cells | diameter ( $\mu\text{m}$ )<br>mean $\pm$ sd(n) | filament branch | comments              |
|--------------------------|-----------------|------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Cyanobacterial filaments | 106             | 7.361 $\pm$ 1.101(106)                         | absent          | main mat-builder      |
| Green algal filaments    | 60              | 28.094 $\pm$ 5.499(60)                         | present         | auxiliary mat-builder |

하는데 어렵지 않다. 이러한 원통형 화석은 세포 외 물질인 피포(sheath)안에 있던 사상체의 조사(trichome)가 이동하였거나, 조사가 분해된 후 남아있는 빈 공간을 공간충전 물질(e.g., sparite)이 채워져서 형성된 것이다. 간혹 피포 안에 조사가 남아있는 경우도 발견되나, 남해지역의 스트로마톨라이트에서는 관찰되지 않았다.

사상체 화석의 직경은  $1\mu\text{m}$ - $15\mu\text{m}$  사이이며, 대부분은  $6\mu\text{m}$ - $8\mu\text{m}$  정도의 직경을 보인다(그림 6A, B; 표 1). 우점종으로 나타나는 직경  $6\mu\text{m}$ - $8\mu\text{m}$  사이의 사상체는 현생 스트로마톨라이트를 형성하는 남조세균(e.g., *Lyngbya*, *Phormidium*)과 형태, 역할 및 환경에 있어서 매우 유사하다. 따라서 직경  $6\mu\text{m}$ - $8\mu\text{m}$  사이의 사상체 화석들을 현생 남조세균의 화석종(e.g., *Lyngbya* vs. *Palaeolyngbya*)으로 분류하기도 하지만(Schopf, 1968; Knoll *et al.*, 1991; Seong-Joo and Golubic, 1999), 다른 특징의 결여로 남해 지역의 화석에 대한 속(genus) 수준의 분류는 불가능하다. 직경이  $6\mu\text{m}$  보다 작거나,  $8\mu\text{m}$  보다 큰 사상체 화석도  $6\mu\text{m}$ - $8\mu\text{m}$  직경의 사상체 화석 군집에서 함께 발견되지만, 이들은 아마도 속성작용에 의한 변형 때문인 것으로 추정된다.

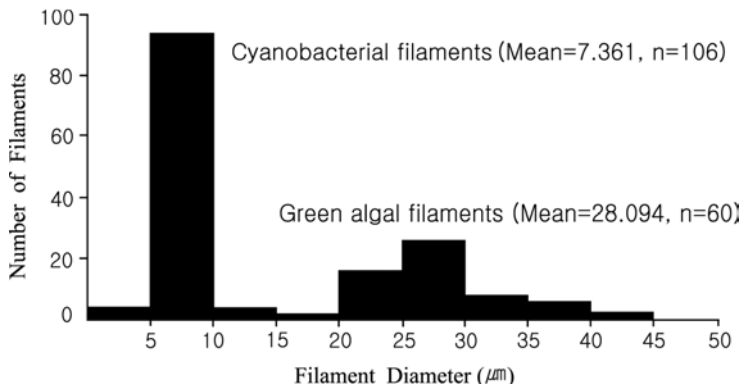
이러한 박테리아 화석은 남해지역에서 발견되는 모든 막대기형 스트로마톨라이트의 아래 부분 엽층리(스트로마톨라이트 형성 초기)에서 집중적으로 관찰되며, 엽층리에 수직인 방향으로 촘촘히 나열되어 있어서, 전체적으로 하나의 커다란 유기엽층을 이룬다(그림 6A). 이들은 스트로마톨라이트의 유기엽층을 따라서 반복적으로 관찰되기 때문에 막대기형 스트로마톨라이트를 형성하는 주요 생물군(main mat-builder)으로 생각된다. 하지만 관찰되는 박테리아 사상체 화석의 수는 엽층의 상부로 갈수록 다소 적어지는 경향이

있는데, 이는 아마도 속성작용에 의한 유기물의 분해 때문인 것으로 생각된다(Knoll *et al.*, 1988).

#### 4.2 녹조류(Green Algae)

남조세균 사상체 화석과 더불어 본 연구지역에서는 녹조류로 여겨지는 사상체 화석들도 다수 관찰된다(그림 6C, D, E). 남조세균 화석들과는 달리 대부분의 녹조류 화석은 독립적으로 떨어져서 관찰되며, 간혹 군집을 이루며 분포하기도 한다. 하지만 어떠한 경우도 유기엽층을 형성할 정도의 군집을 이루며 발견되지는 않는다. 따라서 녹조류 화석은 스트로마톨라이트를 형성하는데 주도적 역할을 한 것이 아니라, 남조세균의 서식지에 더불어 살아가며, 스트로마톨라이트 형성에 보조적 역할을 한 것으로 여겨진다. 이와 같이 녹조류 화석은 스트로마톨라이트의 형성에 직접적으로 관여 하지 않고 스트로마톨라이트의 형성이 어느 정도 완성된 이후에 남조세균과 더불어 살아가는 보조자(mat-dweller)의 역할을 한 것으로 여겨진다(Knoll *et al.*, 1991).

녹조류 사상체의 직경은 대부분이  $26\mu\text{m}$ - $29\mu\text{m}$  정도로 남조세균 사상체 화석의 직경 보다 약 3 배 이상 크지만(그림 7), 사상체의 직경만을 가지고 화석을 분류하는 것은 불가능하다. 하지만 이러한 크기의 직경을 가진 남조세균은 드물고, 직경이 큰 사상체 화석은 많은 경우 가지처럼 분지하는 형태로 발견되는데(그림 6D, E), 이는 스트로마톨라이트를 형성하는 현생 생물 중 *Cladophora* 과 *Vaucheria* 등 녹조류의 특징이다(Riding, 1979; Freytag and Verrecchia, 1998). 이들은 대부분이 약  $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$ 의 각도로서 이분지 하는데(그림 6D), 간혹 삼분지하는 경우도 발견된다(그림 6E). 이처럼 분지하는 것과 분지하지 않는 화석, 또는 서로 다른 형태로 분지하는 사상체들은 서로 다른



**Fig. 7.** Size frequency distribution of calcified filamentous microfossils found from rod-shaped stromatolites of the Jinju Formation, Namhae. It shows a distinct bimodality indicating that at least two filamentous groups (cyanobacteria and green algae) were responsible for the formation of rod-shaped stromatolites.

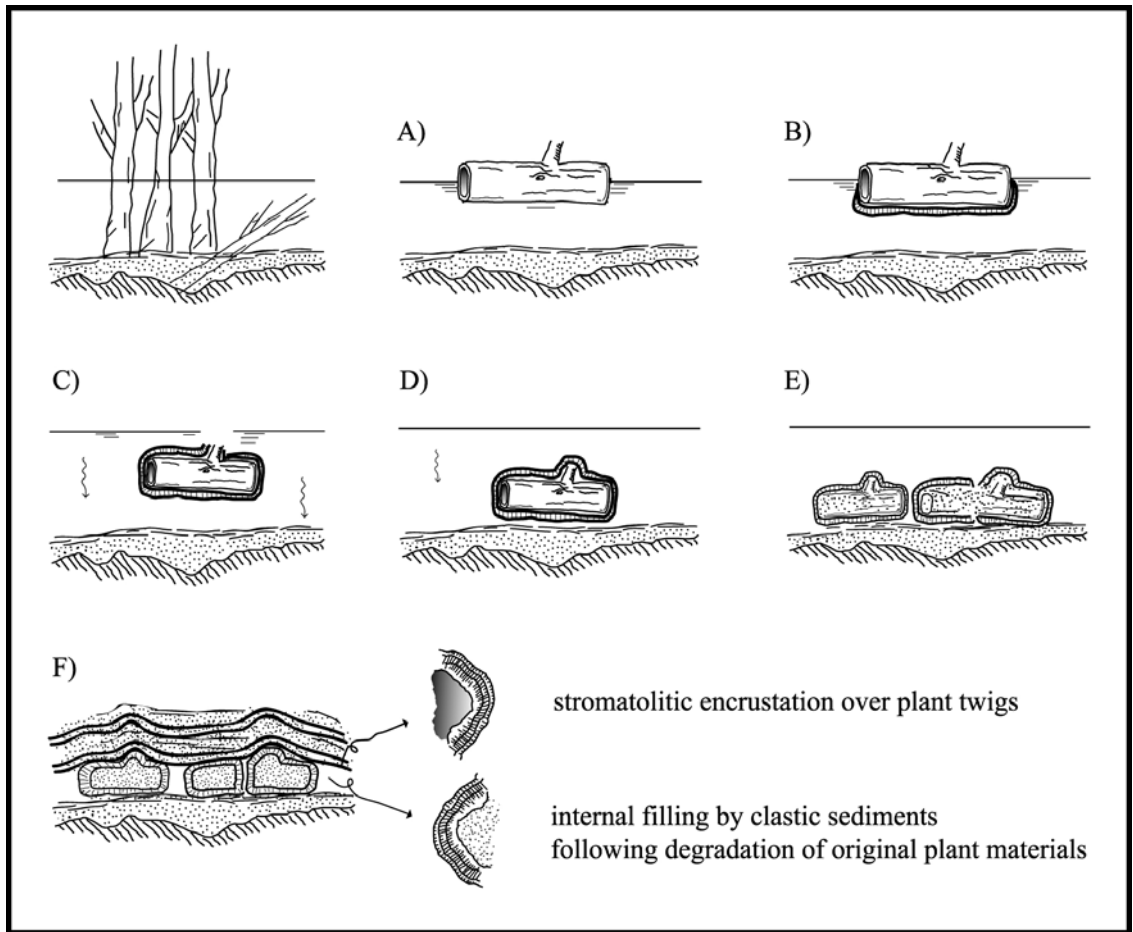
종을 의미하며 또한, 분지하는 각도에 따라 그리고 사상체의 가늘어지는 형태(tapering)의 유무에 따라 종이나 속을 구분할 수 있는데, 남해지역의 경우 이러한 구분은 쉽지 않다. 하지만 남해지역에서는 적어도 2종류(branching vs. non-branching) 이상의 녹조류 화석이 스트로마톨라이트 형성에 영향을 주었던 것으로 판단된다.

##### 5. 막대기형 스트로마톨라이트의 해석 및 형성 모델

막대기형 스트로마톨라이트는 호수나 강 주위의 얇은 물에서 자라고 있는 나무줄기나, 물위에 떠있는 부러진 줄기 등에 탄산염광물이 동심원상으로 피복되어 화석화된 것이다(Marker, 1988; Davies *et al.*, 1989; Pedley, 1994; Ford and Pedley, 1996). 그림 8은 이를 모식적으로 나타낸 것이다. 나무의 표면은 박테리아를 포함한 미생조류의 적합한 서식지이기 때문에 대부분의 나무줄기는 다양한 생명체들의 군집에 의해 얇은 막의 형태를 띠며(microbial mat or bacterial film) 피복된다. 광합성을 하는 생명체(특히 남조세균)에 의해 피복될 경우, 이러한 피복 생명체들은 주변의 수소이온농도(pH)를 높여서, 탄산염 이온의 낮은 농도에도 불구하고 박테리아 화석 자체는 물론, 나무줄기의 표면에 탄산염광물을 침전시켜 스트로마

톨라이트의 성장이 시작된다(Pentecost and Riding, 1986; Merz and Zankle, 1993; Pedley, 1990, 1992). 많은 나뭇가지들이 쓰러져 얇은 호수 주변으로 쓸려 나가기도 하고, 호수에서 발생하는 파랑은 주기적으로 나뭇가지 표면에 수분과 영양분을 공급하며, 이러한 수분의 공급은 미생물의 활동을 왕성하게 하여 스트로마톨라이트의 성장을 촉진시켰을 것이다. 나뭇가지에서의 스트로마톨라이트의 성장은 일정기간 계속되다 어느 순간 성장한 계에 도달하게 되면 성장을 멈춘다. 또한 주기적으로 발생하는 홍수와 범람(결과적으로 다량의 쇄설성 퇴적물의 공급) 역시 스트로마톨라이트의 성장을 멈추게 한 요인으로 작용하였다. 이렇게 형성된 막대기형 스트로마톨라이트들은 계절적으로 발생하는 폭풍이나 홍수, 범람 등에 의해 하도에서 떨어진 곳으로 쓸려 내려가 퇴적하게 된다. 이때 일부 막대기형 스트로마톨라이트들은 작은 크기로 깨져서 중심의 기저 식물체가 빠져 나가거나 분해 되어 없어진 빈 공간에 주변의 쇄설성 퇴적물에 의해 채워지게 된다(그림 8 참조).

이러한 현상은 탄산염광물의 포화도가 높고 광합성 미생조류들이 서식하는 현생의 호수 등지에서(e.g., Giannini, 1990), 또는 유사한 환경의 중생대 및 신생대 지층에서도 발견된다(e.g., Macker, 1997). 이러한 나무줄기를 피복한 스트로마톨라이트가 선캠브리아이언의 지층을 비롯한 전기 고생



**Fig. 8.** Model of rod-shaped stromatolite formation in the Jinju Formation, Namhae. (A) Cyanobacteria and other algal organisms live on the surfaces of plant stems forming biofilms or microbial mats; (B) Calcification is initiated by photosynthesis of epibiotic microorganisms, from which plant twigs are encrusted by concentrically laminated limestones; (C, D) Encrusted, heavy plant twigs sink to sediment surface of lake; (E) Encrusted plant twigs are often broken and original plant materials in the center are either washed out or degraded, leaving empty spaces in the center of the encrusted structures; (F) The empty, central spaces are filled with clastic sediments surrounding the encrusted structures, and buried.

대 지층에서 발견되지 않는 이유는 아직 관속 식물 이 지구상에 나타나지 않았기 때문이다. 즉, 남해지역에서 발견되는 석회질 성분의 막대기형 구조는 나무줄기에 서식하는 미세조류의 신진대사에 의하여 탄산염광물이 동심원상으로 피복되어 화석화된 것이다. 막대기 형태의 중심 부분에 아직 분해되지 않고 남아있는 잔류 식물조직이나 (그림 4B), 나무줄기의 외형을 보존하고 있는 분지형 막대기(그림 4C)도 이를 증명한다.

한국에서는 이러한 구조를 막대기형 스트로마

톨라이트(rod-shaped stromatolites), 일명 RSS라 부른다(e.g., Lee *et al.*, 1991; Lee and Woo, 1996). 하지만 스트로마톨라이트는 정의에 의하여 퇴적면에 붙어서 수직으로 성장하는 구조를 일컫는다(Semikhatov *et al.*, 1979; Krumbein, 1983; Riding, 1990). 반면, 퇴적면에서 떨어져서 독립적으로 성장하는 구조는 온코이드(oncoid)라 부른다(Peryt, 1983). 온코이드는 성장이 계속되면 퇴적면에 붙어서 수직적인 성장만을 하게 되어 스트로마톨라이트로 자라게 된다. 때문에 스트로

마톨라이트의 수직단면에서는 동심원상 엽층리가 나타나지 않는 반면 온코이드의 수직단면은 남해 지역의 막대기 구조처럼 언제나 동심원상의 엽층리를 보인다. 이처럼 동심원상의 엽층리를 보이는 이유는 이들의 성장이 모든 방향에서 균일하게 이뤄지기 때문이다.

이러한 이유로 남해지역에서 발견되는 막대기형 구조는 엄밀한 의미에서 스트로마톨라이트라 부를 수 없다. 몇몇 측면에서 볼 때(동심원상 엽층리 그리고 퇴적면과 떨어져서 독립적으로 성장) 이러한 구조는 온코이드라 할 수도 있으나, 길게 막대기 모양으로 신장된 구조에 대하여 온코이드라 부른 예는 없다. 하지만, 막대기 구조에 나타나는 미세엽리 구조의 형태나(그림 5), 이들을 형성하는 미세조류 화석(그림 6) 그리고 형성 메카니즘(그림 8) 등에 비추어 넓은 의미의 스트로마톨라이트에 포함시킬 수 있다. 다만, 남해지역에서 발견되는 막대기 구조를 “막대기형 스트로마톨라이트”라 명명함에 있어서, 이들의 형성 메카니즘과 기원(나무줄기에 탄산염광물의 동심원상 피복)의 이해를 요구한다.

## 6. 결론

남해지역의 진주층에서는 얇고 길게 신장된 막대기형의 구조가 다량 발견되었다. 이러한 구조의 쇄설성 퇴적물로 채워진 중심부분과 동심원상 엽층리구조를 보이는 외부구조로 구성되어 있다. 외부의 미세엽층리는 유기물이 풍부한 엽층(organic-rich layer)과 유기물이 결여된 엽층(sediment-rich layer)이 반복적으로 교호되는 전형적인 미세엽층리구조를 띤다. 대부분의 유기엽층은 사상체 미세조류 화석에 의해서 형성이 되었는데, 특히 남조세균으로 추정되는 사상체 화석이 이러한 구조를 형성하는데 주도적 역할을 한 것으로 추정된다. 그 외에도 녹조류로 추정되는 직경이 크며 분지하는 사상체와, 저서성 동물 화석(개형충 및 이매패류)들도 동심원상의 엽층리 구조에서 발견된다.

막대기형 구조는 호수 주변에서 서식하던 식물의 줄기나, 홍수 등에 의해 이동되어온 부러진

나무줄기에 탄산염광물이 동심원상으로 피복되어 형성되어진 것이다. 나무줄기의 표면에 서식했던 광합성 미세조류 생명체(특히 남조세균)들이 물속에 용존되어 있던 이산화탄소를 섭취하여, 주변의 pH를 상승시키고, 이로 말미암아 석회암의 침전을 야기시켜, 궁극적으로 나무줄기의 주변에 동심원상의 구조를 형성하였다. 내부의 나무줄기는 이동되는 과정이나 퇴적 과정에서 빠져나가거나 분해되어, 주변의 쇄설성 퇴적물들로 채워졌다.

## 사 사

야외조사과정에 많은 도움을 준 경북대학교 대학원 학생(배준우, 이봉진)과 유익한 조언을 주신 이광춘, 허민 교수님에게 깊은 감사를 드린다. 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었다(KRF-2002-003-C00131).

## 참고문헌

- Aitken, J.D., 1967, Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37, 1163-1178.
- Awramik, S.M., Margulis, L. and Barghoorn, E.S., 1976, Evolutionary processes in the formation of stromatolites. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 149-162.
- Braithwaite, C.J.R., Casanova, J., Frevert, T. and Whitton, B.A., 1989, Recent stromatolites in landlocked pools on Aldabra, western Indian ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 69, 145-165.
- Davies, J.S., Rands, D.G. and Hein, M.K., 1989, Biota of the tufa deposit of Falling Spring, Illinois, U.S.A. *Transaction of American Microscopical Society*, 108, 403-409.
- Ferris, F.G., Thompson, J.B. and Beveridge, T.J., 1997, Modern freshwater microbialites from Kelly Lake, British Columbia, Canada. *Palaaios*, 12, 213-219.
- Ford, T.D. and Pedley, H.M., 1996, A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, 41, 117-175.
- Freytet, P. and Plaziat, J.-C., 1982, Continental carbonate sedimentation and pedogenesis-Late Cretaceous and

- Early Tertiary of southern France. Nagele u. Obermiller, Stuttgart, 213 p.
- Freytet, P. and Verrecchia, E.P. 1998. Freshwater organisms that build stromatolites: a synopsis of biocrystallization by prokaryotic and eukaryotic algae. *Sedimentology*, 45, 535-563.
- Giannini, W.F., 1990, A commercial marl deposit near Winchester, Virginia. In: Herman, J.S. and Hubbard, D.A. (eds.), *Travertine-Marl: Stream Deposits in Virginia*. Virginia Division of Mineral Resources Publication 101, 93-99.
- Golubic, S., 1973, The relationship between blue-green algae and carbonate deposits. In: Carr, N.G. and Whitton, B.A. (eds.), *The Biology of Blue-green Algae*. Blackwell, Oxford, 434-472.
- Golubic, S., 1976, Organisms that build stromatolites. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 113-148.
- Golubic, S., 1991, Modern stromatolite - a review. In: Riding, R. (ed.), *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, Berlin, 541-561.
- Golubic, S., Seong-Joo, L. and Browne, K., 2000, Cyanobacteria: architects of sedimentary structures. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 57-67.
- Grotzinger, J.P., 1994, Trends in Precambrian carbonate sediments and their implication for understanding evolution. In: Bengtson, S. (ed.), *Early Life on Earth*. Columbia University Press, New York, 245-258.
- Herman, J.S. and Hubbard, D.A., 1990, Travertine - marl: stream deposits in Virginia. *Commonwealth of Virginia, Virginia*, 184 p.
- Hofmann, H.J., 1969, Attributes of stromatolites. *Geological Survey of Canada Paper*, 39, 58-69.
- Horodyski, R.J. and Vonder Haar, S., 1975, Recent calcareous stromatolites from Laguna Mormona (Baja California), Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 894-906.
- Kalkowsky, E., 1908, Oolith und stromatolith im norddeutschen untsandstein. *Deutsche Geologische Gesellschaft, Zeitschrift*, 60, 68-125.
- Knoll, A.H. and Golubic, S., 1979, Anatomy and taphonomy of a Precambrian stromatolite. *Precambrian Research*, 10, 115-151.
- Knoll, A.H. and Golubic, S., 1992, Modern and ancient cyanobacteria. In: Schidlowski, M., Golubic, S., Kimberley, M.M., McKirdy, D.M. and Trundinger, P.A. (eds.), *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Springer, Berlin, 450-462.
- Knoll, A.H. and Semikhatov, M.A., 1998, The genesis, diagenesis and time distribution of two distinctive Proterozoic stromatolite microstructures. *Palaaios*, 13, 407-421.
- Knoll, A.H., Swett, K. and Mark, J., 1991, Paleobiology of a Neoproterozoic tidal flat/lagoon complex: The Draken conglomerate Formation, Spitsbergen. *Journal of Paleontology*, 65, 531-570.
- Knoll, A.H., Strother, P.K. and Rossi, S., 1988, Distribution and diagenesis of microfossils from the Lower Proterozoic Duck Creek Dolomite, Western Australia. *Precambrian Research*, 38, 257-279.
- Krumbein, W.E., 1983, Stromatolites - the challenge of a term in space and time. *Precambrian Research*, 20, 493-531.
- Krumbein, W.E. and Giele, C., 1979, Calcification in a coccoid cyanobacterium with the formation of desert stromatolites. *Sedimentology*, 26, 593-604.
- Lee, K.C. and Woo, K.S., 1996, Lacustrine stromatolites and diagenetic history of carbonate rocks of Chinju Formation in Kunwi area, Kyongsangbukdo, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 32, 351-365.
- Lee, K.C., Woo, K.S., Paik, K.H. and Choi, S.J., 1991, Depositional environments and diagenetic history of the Panyawol, Hwasan, and Shinyangdong Formations, Kyongsang Supergroup, Korea - with emphasis on carbonate rocks. *Journal of Geological Society of Korea*, 27, 471-492.
- Macker, H., 1997, Upper Cretaceous and Lower Tertiary brackish to freshwater oncoids and stromatolites of the Garumnian facies in the Ager Basin (Central southern Pyrenees/Spain). *Facies*, 36, 246-249.
- Marker, M.E., 1988, Tufa deposits of southern Africa: a review. In: Heine, K. (ed.), *Palaecology of Africa and the Surrounding Islands*. Balkema, Rotterdam, 377-389.
- Merz, M.U.E. and Zankle, H., 1993, The influence of culture conditions on growth and sheath development of calcifying cyanobacteria. *Facies*, 29, 75-80.
- Merz-Preib, M., 2000, Calcification in cyanobacteria. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 50-56.
- Monty, C.L.V., 1972, Recent algal stromatolitic deposits, Andros Island, Bahamas. Preliminary report. *Sonderdruck aus der Geologischen Rundschau*, 61, 742-783.
- Monty, C.L.V., 1976, The origin and development of cryptalgal fabrics. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 193-250.
- Neuweiler, F., Reitner, J. and Monty, C.L.V., 1997, Biosedimentology of microbial buildups. *Facies*, 36, 195-284.
- Pedley, H.M., 1990, Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sedimentary Geology*, 68, 143-154.

- Pedley, H.M., 1992, Freshwater (phytoherm) reefs: the role of biofilms and their bearing on marine reef cementation. *Sedimentary Geology*, 79, 255-274.
- Pedley, H.M., 1994, Prokaryote-microphyte biofilms and tufas: a sedimentological perspective. *Kaupia*, 45-60.
- Pentecost, A., 1990, Calcification processes in algae and cyanobacteria. In: Riding, R. (ed.), *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, Berlin, 3-20.
- Pentecost, A. and Riding, R., 1986, Calcification in cyanobacteria. In: Riding, R. and Leadbetter, B. (eds.), *Biomimiclarization in Lower Plants and Animals*. Special Volume of Systematics Association, 73-90.
- Peryt, T.M., 1983, Oncoids: comments to recent developments. In: Peryt, T.M. (ed.), *Coated Grains*. Springer-Verlag, Berlin, 273-275.
- Riding, R., 1979, Origin and diagenesis of lacustrine algal bioherms at the margin of the Reis crater, Upper Miocene, southern Germany. *Sedimentology*, 26, 645-680.
- Riding, R., 1990, Calcification of microbial carbonates. In: Riding, R. (ed.), *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, Berlin, 21-51.
- Riding, R., 1994, Stromatolite survival and change: the significance of Shark Bay and Lee Stocking Island subtidal columns. In: Krumbein, W.E., Paterson, D.M. and Stal, L.J. (eds.), *Biostabilization of sediments*. BIS, Oldenberg, 183-202.
- Schopf, J.W., 1968, Microflora of the Bitter Springs Formation, Late Precambrian, central Australia. *Journal of Paleontology*, 42, 651-588.
- Semikhatov, M.A., Gebelein, G.D., Cloud, P., Awramik, S.M. and Benmore, W.C., 1979, Stromatolite morphogenesis-progress and problems. *Canadian Journal of Earth Science*, 16, 992-1015.
- Seong-Joo, L. and Golubic, S., 1999, Microfossil populations in the context of synsedimentary micrite deposition and acicular carbonate precipitation: Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation, China. *Precambrian Research*, 96, 183-208.
- Seong-Joo, L. and Golubic, S., 2000, Biological and mineralogical components of an ancient stromatolite: Gaoyuzhuang Formation, Mesoproterozoic of China. *SEPM Special Publication*, 67, 91-102.
- Seong-Joo, L., Browne, K. and Golubic, S., 2000, On stromatolite lamination. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 16-24.
- Walter, M.R., 1976, Introduction. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 87-112.
- Walter, M.R., Grotzinger, J.P. and Schopf, J.W., 1992, Proterozoic stromatolites. In: Schopf, J.W. and Klein, C. (eds.), *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, 253-260.

---

투 고 일 : 2003년 12월 22일

심 사 일 : 2003년 12월 29일

심사완료일 : 2004년 2월 4일