

경상남도 사천시 진주층에서 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트

최 종 겐*

삼육대학교 교양교직과, 139-742 서울시 노원구 공릉 2동 26-21

Rod-shaped Stromatolites from the Jinju Formation, Sacheon, Gyeongsangnam-do, Korea

Chong Geol Choi*

Department of General Studies and Education, Samyook University, Seoul 139-742, Korea

Abstract: The sedimentary sequence of the non-marine Cretaceous Jinju Formation from Sacheon, Korea, contains a number of rod-shaped stromatolites (RSS) characterized by concentric lamination with curd-shaped, stratiform, and small columnar stromatolites. Unlike the world trend, a massive distribution of rod-shaped stromatolite was discovered in the region. The mineral composition, diagenetic alteration, and weathering process of the kind were analyzed by EPMA. The gross morphology of RSS is almost identical to broken plant twigs or stems formed by microbial activity onto which it grew. RSSs are interpreted as stromatolitic algae over plant twigs, which formed through concentric carbonate precipitation by epiphytic algal photosynthesis. The distribution of localities and horizons of the stromatolite imply that RSS is allochthonous and autochthonous. Two types of cyanobacterial filaments and one type of green algal filament were discovered. The size frequency distribution of calcified filamentous microfossils found in stromatolite was 2.2 μm and 7.8 μm in mean diameter of the former, 32.3 μm in mean diameter of the latter. The cyanobacterial fossils played a key role in the formation of stromatolite, while the green algal filament was auxiliary stromatolite-builder stromatolites. The filamentous microfossils including trichome were found within the stromatolitic laminae.

Keywords: Stromatolite, Jinju Formation, Cyanobacteria, Sacheon, carbonates

요 약: 경상남도 사천시의 백악기 육성퇴적층인 진주층에서는 다양한 종류(막대기형, 명울형, 층형, 작은 기둥형)의 스트로마톨라이트(stromatolite)가 산출된다. 세계적 산출 경향과는 달리 막대기형 스트로마톨라이트가 대량으로 발견되었다. 이는 나뭇가지에 부착·서식하던 미세조류에 의하여 탄산염 광물이 침전하여 동심원 모양의 엽층리를 형성하여 생성된 구조이다. EPMA를 이용하여 구성광물, 속성작용, 풍화과정의 진행을 확인했다. 일반적인 스트로마톨라이트는 내지성 화석이지만 막대기형 스트로마톨라이트는 외지성 화석으로도 산출될 수 있다는 점에서 특이하다. 전형적인 스트로마톨라이트의 미세 엽층리는 막대기의 포위 부분에 있으며, 여기서 최소 두 종류의 사상체 남조세균(평균 2.2 μm 와 7.8 μm)과 녹조류(평균 32.3 μm)를 발견하였으며, 이 때 남조세균은 피막 건설자이고, 녹조류는 피막 보조자로 판단되었다. 일부 박테리아에서는 세포사를 발견할 수 있었다.

주요어: 스트로마톨라이트, 진주층, 남조세균, 사천, 탄산염광물

서 론

스트로마톨라이트는 지구 역사와 고환경 연구에 중요하며, 일반적인 연구 과정은 산출 양상과 층준 해

석, 퇴적 당시의 방향, 분포 양상, 외부 형태, 미세 엽층리의 구조, 속성작용 등 퇴적학적 연구와 형성한 생물체(남조세균, 녹조류, 이끼류 등)에 대한 고생물학적 연구가 동시에 수행된다(Knoll and Golubic, 1992). 우리나라에서는 스트로마톨라이트의 분포 지역이 광범위하고, 전 지질시대에 걸쳐 있다. 특히 중생대 경상누층군에는 세계적으로 희귀한 하호 환경에서 생성된 스트로마톨라이트가 산출된다. 그럼에도

*Corresponding author: choicg@syu.ac.kr
Tel: 82-2-3399-1872
Fax: 82-2-3399-3311

지질 개요

불구하고 우리나라의 스트로마톨라이트에 대한 연구 역사는 1990년대부터 소수의 학자들에 의해 연구가 시작되었으며, 현재 활발한 연구가 진행되고 있다 (Lee et al., 1991; Kim and Kim, 1999; Seong-Joo et al., 2003; 최종걸, 2004).

경상분지 내의 스트로마톨라이트 산출지는 여러 층 중에서 산출되며, 다양하고 독특한 모양, 발달된 미세 구조 및 내부의 미세 조류, 양호한 보존 상태 등으로 국내의 관심이 집중되는 지역이다(Choi et al., 2001). 하호성층에서의 산출은 유럽(e.g., Neuweiler et al., 1997)과 북미(e.g., Herman and Hubbard, 1990) 지역에서 보고되고 있다. 사천시 일대의 하호성 진주층은 세계적으로 알려진 층형, 주상 및 반구형 외에도 막대기형 스트로마톨라이트를 포함하고 있다.

본 논문의 연구 목적은 사천시 일대에서 산출되는 스트로마톨라이트 산지의 분포도를 작성하고, 이를 형성하는 화석(박테리아 화석 및 미세조류 화석)을 기재하며, 미화석 및 광물학적 연구를 병행하여, 고환경의 해석 및 호수에서의 생명의 다양성을 이해하여 지질학적 연구에 기초 자료를 제공하고자 한다.

본 연구 지역은 경상남도 사천시 일대로 동경 127°57'00"~128°03'00", 북위 34°56'00"~35°08'00" (WGS-84)에 해당한다. 본 역의 지질은 중생대 백악기 육성 퇴적층으로 경상누층군의 퇴적암류와 이를 관입 또는 분출하는 화성암류로 구성되어 있다(Fig. 1).

본 역의 경상누층군은 하산동층, 진주층, 칠곡층, 신라역암층이 정합으로 북서에서 남동 방향으로 분포하며, 화성암류의 구성은 안산암, 화강섬록암, 석영반암 등으로 되어 있다. 퇴적암류 사이로 산성 및 염기성 암맥이 관입한다. 층 내에 적색층을 포함하지 않는 것을 주요 특징으로 하는 진주층의 암질은 역질 사암, 사암, 암회색 내지 흑색의 이암으로 구성되며, 석회질 이암과 10 cm 내외의 탄질 셰일이 협재한다. 층후는 900~1,100 m이며, 일반적인 주향은 N20°~50°E, 경사는 10°~15°SE이다.

퇴적구조로는 소규모 사층리, 썩기형 사층리, 건열, 연흔, 미끄럼 구조, 하도 퇴적물, 깔고 메우기 구조, 물튀김 자국, 파상 엽층리, 하중흔, 셰일 압편, 점토

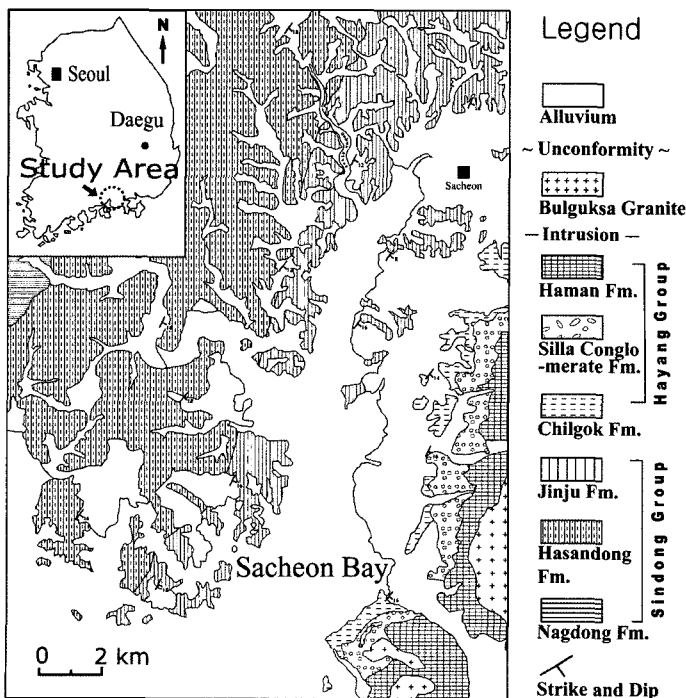


Fig. 1. Geologic map of the study area, Sacheon-si, Gyeongsangnam-do, Korea.

구 및 석회질 결핵체 등이 있다(백인성과 이용일, 1994; 안귀영과 백인성, 2004).

막대기형 스트로마톨라이트는 진주층이 발달한 해안가나 강가에서 산출되었으며, 그 외 공룡의 뼈, 알, 이빨, 보행열(임성규와 최종결, 2004), 분화석, 연체동물, 에스테리아(서승조, 1993; Park and Chang, 1998), 식물화석, 배갑화석, 어류(양승영 외, 2003), 곤충화석, 화분화석(Choi and Park, 1987), 생흔화석(Kim et al., 2005) 등이 있다.

막대기형 스트로마톨라이트

막대기형 스트로마톨라이트는 긴 원통 모양을 하며, 크기는 길이 1~35 cm 직경 1~15 cm이나 주로 길이 4~12 cm, 직경 2~4 cm가 산출된다. 단면은 중심 부분과 포위 부분으로 구분되며, 중심 부분은 쇄설성 퇴적물로 채워져 있으며, 이를 둘러싼 포위 부분은 석회질 성분이며, 동심원상의 미세엽층리가 잘 발달한 전형적인 스트로마톨라이트이다.

산출 지역과 지질

사천 서부지역의 진주층에서 막대기형 스트로마톨라이트가 암회색 이암에서 주로 산출된다(Fig. 2). 진주층의 쇄설성 퇴적암의 구성은 사암과 이암이 수 cm에서 수 m의 두께로 반복되며, 사암의 입도는 중립질이며, 분급은 양호하다. 사암과 이암의 접촉면에서 침식의 흔적을 발견하지 못하는 것은 얇은 호수의 가장자리에서 급격한 퇴적 환경의 변화를 암시하며, 스트로마톨라이트가 암회색 이암 내에 분포하는 것은 조용한 환경의 호수에서 침전된 것으로 판단된다. 또 연흔과 건열이 빈번히 나타나고, 수평 및 수직 방향의 생흔화석, 용각류 공룡의 보행열의 산출은 호수 주변에서 볼 수 있는 전형적인 퇴적 양상이다.

산출 양상

막대기형 스트로마톨라이트의 산출 양상은 거대 규모(1 cm~1 m)에서 산재상, 층상 및 괴상으로 구분된다. 산재상은 독립상으로 하나씩 나타나는 것으로 크기(길이 20~25 cm 직경 5~8 cm)가 비교적 컸다. 층상의 분포는 층리면에 평행하고, 분포 방향에서 규칙성은 찾을 수 없었다. 괴상은 비슷한 크기로 이루어진 무더기는 흔하고, 차이가 큰 무더기는 드물다. 이는 스트로마톨라이트가 형성 과정 중에 유수와 풍향

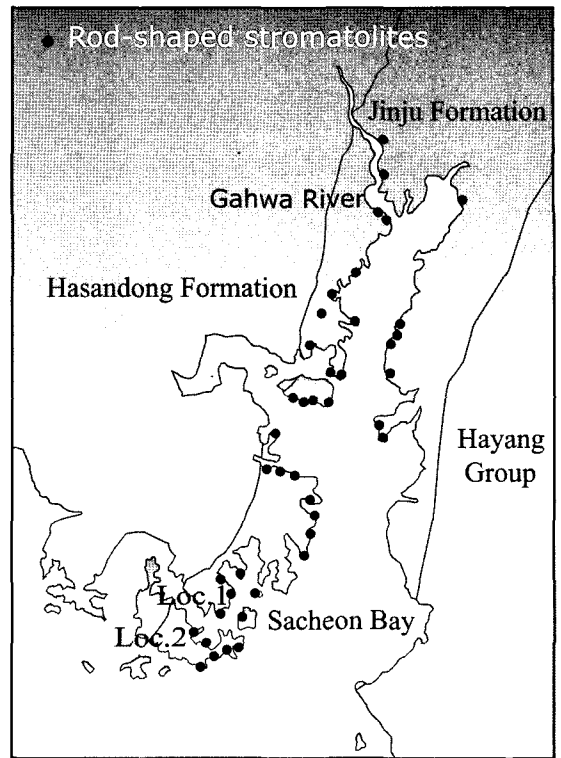


Fig. 2. Location map of the rod-shaped stromatolite fossils from the Jinju Formation.

등의 영향으로 분급된 후 퇴적물에 매몰된 결과로 추정된다. 서포면 비토리리 선전리 등에서는 동일 층군에서도 온전한 막대기형과 파편화된 막대기형이 공존하며, 단속적이며 방향성 없이 분포한다.

사천시 서포면 선전리 목섬(Fig. 2, Loc. 1)에서는 총 8개 층군에서 산출되며, 아래에서 5번째 층군에서는 거대 규모의 막대기형 스트로마톨라이트(Fig. 4-a)가 산출된다(Fig. 3). 규모는 길이 11 m, 폭 150~240 cm, 최대 두께 60 cm이며, 바닥은 층군에 평행하며, 양끝에서 가운데로 갈수록 두꺼워지는 형태이다. 막대기형 스트로마톨라이트의 크기는 길이 4~10 cm, 직경 3 cm 이내이며, 모양은 양끝에서 단절된 것이 70%이며 한쪽 끝은 단절되고 나머지 끝이 둥근 것은 30%이다.

사천시 서포면 비토리리 빈탕계 제방 가까운 곳(Loc. 2)에 위치한 스트로마톨라이트의 산지에서 분지된 나무 모양의 스트로마톨라이트(Fig. 4-b, c)가 관찰된다. 이는 막대기형 스트로마톨라이트가 나뭇가지를 기원으로 하며, 스트로마톨라이트의 다양한 형태는 나무

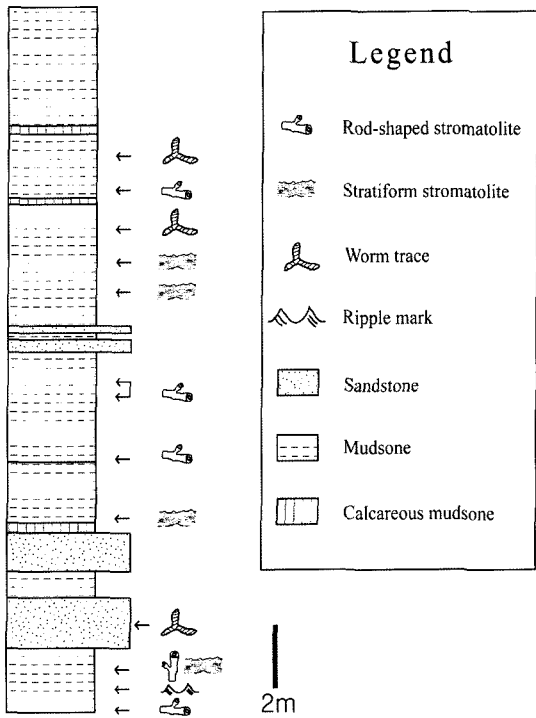


Fig. 3. Detailed columnar section of locality 1.

줄기의 잔해임을 증명하여 준다.

이와 같이 사천시 일대의 진주층에서 산출되는 산재상, 층상, 피상 스트로마톨라이트의 화석상은 수류나 바람에 의해 나뭇가지 등이 다른 곳으로 이동되면서 분급이 양호하게 형성된 외지성(allochthonous) 화석으로 판단된다.

모양

막대기형 스트로마톨라이트의 겉모양은 한쪽은 둥글고 반대쪽은 절단된 모양(Fig. 4-d), 양쪽이 모두 절단된 모양(Fig. 4-e)이 있다. 또 끝으로 가면서 가늘어지는 형태와 굵기가 같은 형태가 있다. 대부분은 곧은 막대 모습이나 간혹 휘어진 모습도 발견된다. 막대의 종단면의 모습에서는 중심 부분과 포위 부분은 동심원상의 엽층리로 이루어진다(Fig. 4-f, g). 중심 부분의 모양은 대부분 원형이지만 소수는 변형된 것도 있으며, 중앙부에 핵이 위치하며, 핵의 비율은 38%정도이며, 속성과정 중에 파쇄 되거나 풍화과정 중에 침식된 양상을 보인다.

중심 부분의 구성 물질은 암녹색 내지 암회색 석회질 이암으로 채워진 쇄설성 퇴적물이 되며, 포위

부분에서 탄산염 성분의 동심원 엽층리가 발달한 스트로마톨라이트가 된다. 중심 부분과 포위 부분 사이에 즉 쇄설물층과 탄산염층 사이에는 방해석의 교결 물질인 흰색의 둥근띠가 1~2 mm 두께로 분포하며, 이는 속성작용 과정 중에 생성된 것으로 EPMA 분석값에 의하여 판단된다. 중심 부분은 지표에 노출되면서 풍화·침식의 영향으로 빈 공간을 생성한 것으로 판단된다.

내부 구조

막대기형 스트로마톨라이트의 성장은 크게 세 단계로 구분할 수 있다(Fig. 4-h). 초기 단계는 기질(대개 나무의 막대 등)에 조류들이 부착되고 인근의 퇴적물을 포획·속박하면서 스트로마톨라이트로 성장을 시작하여 주상이 대규모로 발전되기 전까지의 단계이다. 이 단계에서는 유기물 엽층의 발달이 현저하여 진한 갈색 엽층은 두껍고 연한 갈색의 엽층은 얇은 시기이다. 스트로마톨라이트의 형태는 주로 횡적으로 연결된 반구형, 작은 주상 및 층형 등이 공존하는 단계이다.

중기 단계는 주상의 발달이 윤택한 시기이다. 주상의 성장 형태는 본래의 기둥에서 분지하는 기둥은 가늘어지며 분지하는 가지의 수는 13개이며, 수지(樹枝)모양으로 성장하고 분지(分枝)의 방향은 수직으로 나란하거나 또는 약간의 각으로 비스듬하며, 주상 사이에는 빈 공간(original void)을 많이 생성하며 성장하는 단계이다. 빈 공간의 형태는 불규칙하며 빈 공간은 쇄설물, 우이드, 피복입자, 개형층 등으로 채워진 후 속성과정 중에 석회질 물질로 채워진다. 주상은 성장하면서 머리 부분(stromatolitic head)이 점점 확대된다.

후기 단계는 층형의 미세엽층리만이 발달하는 단계로서 초기 단계와는 달리 연한 갈색의 퇴적물 엽층이 우세하다. 곧이어 퇴적물로 덮이면서 성장이 종식되는 단계이다. 후기에서는 중심 부분을 형성했던 동일한 쇄설물로 피복되면서 스트로마톨라이트의 성장은 정지된다.

사천시 일대에서 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트 내의 미세엽층은 어두운 색의 엽층과 밝은 색의 엽층이 교호되면서 발달한다. 전자는 짙은 갈색을, 후자는 옅은 갈색을 띠어 색깔의 농담으로 미세엽층리 구조를 형성한다. 전자는 유기물질이 풍부한 유기물 엽층(organic-rich layer)이고 후자는 퇴적물이 우

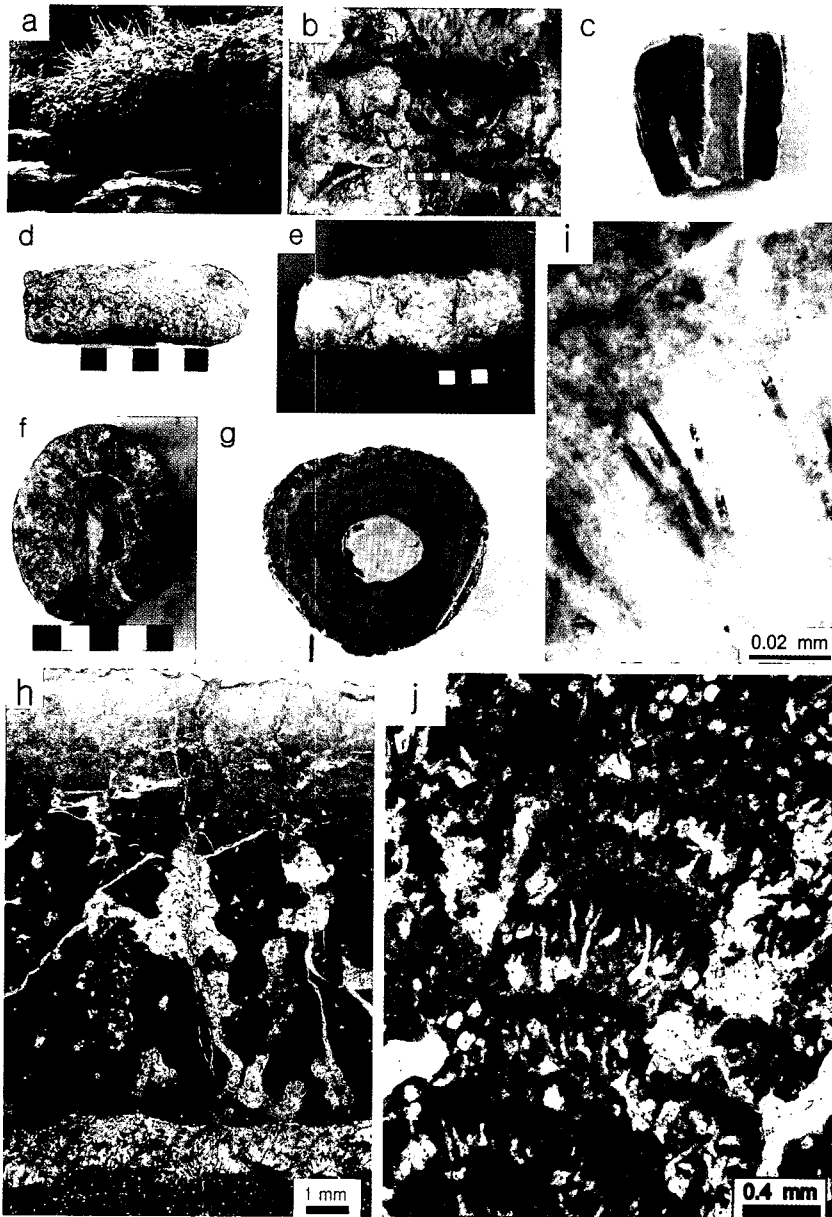


Fig. 4. Pictures of rod-shaped stromatolites taken from different views. (a) Close view of the beds, random distribution is clearly recognized. (b) Branched morphology of rod-shaped stromatolites is still preserved. (c) Polished slab cut parallel to long axis of rod-shaped stromatolite. A small branched twig is beautifully preserved in left lower part. (d) This is characterized by rounded end of one side (longitudinal view). (e) Longitudinal view of rod-shaped stromatolites cut by both sides. This specimen was found from Mokseom Island, Seopo-myeon, Sacheon. (f) A rod-shaped stromatolite showing central clastic part and calcareous outer stromatolitic part. (g) Concentric, fine lamination is well developed, characterized by a couplet of light, thin and dark, thick laminae. (h) Photograph of thin section of rod-shaped stromatolite. Lower part below white band of diagenetic sparry calcite is periphery of the central area which is now filled with siliciclastic sediments. The uppermost part of sparry calcite represents original plant surface on which algal filaments grew. Central area was filled with siliciclastic sediments from surroundings. Stromatolitic fine lamination is not clearly developed in this specimen. (i) Close view of filaments preserved together with trichome remnants. Note that vestige of filaments is also observed. They are calcified empty sheaths after trichome glided away from the sheaths. (j) Nicely preserved green algal filaments with 23 μm in average diameter. They are characterized by tapering ends.

세한 퇴적물 엽층(sediment-rich layer)이다. 유기물 엽층에 존재하는 박테리아의 신진대사 작용의 영향을 받아 퇴적물 엽층에 나타나는 광물의 구조와 성분을 좌우하는 것으로 알려지고 있다. 특히, 현생 박테리아의 연구는 박테리아의 종(e.g., *Scytonema* spp. versus *Stigonema* spp., Merz, 1992) 차이에 따른 것으로 밝혀, 이를 근거로 생물학적 기원이 입증된다.

한편 유기적 기원의 미세엽층과 무기적 기원의 미세엽층과 모양에서도 큰 차이가 있다. 전자는 후자보다 상대적으로 불규칙하고 평평한(planar) 파상(wavy)의 엽층리를 이루나 횡적 연장성은 불량하다. 이는 미세조류를 이루는 생명체는 생명체가 갖는 규칙성도 있지만 조류의 종류와 분포 지역, 국지적인 환경의 차이에 기인하여 성장에 차이를 보이기 때문이다 (Golubic, 1976; Walter et al., 1992; Seong-Joo and Golubic, 1999; 이성주와 공달용, 2004).

이와는 달리 막대기형 스트로마톨라이트 성장 단계의 중기에서 방사상 덩불형 엽층이 몇몇 경우에서 관찰된다. 덩불(bush)은 사상체의 다발로 보이는 엽상체(thallus) 식물이다. 덩불 내에 발달하는 내부 엽층리(internal lamination)는 전형적인 스트로마톨라이트와는 다른 엽층리 구조를 이룬다. 덩불형 내의 엽층리는 미세조류 중의 한 종(e.g., *Rivularia*, *Calothrix*)이 성장하면서 형성되는 것으로 성장 속도의 차이가 미세엽층리를 형성하는 것으로 나타난다. 느린 성장기에는 진한 갈색으로, 빠른 성장기에는 옅은 갈색의 엽층을 생성하여 전체적으로는 방사상으로 성장하는 덩불 내에서 미세엽층리가 색깔의 차이로 형성되었다 (Monty, 1972).

사천시 일대의 진주층에서 산출되는 막대기형 스트로마톨라이트의 미세엽층은 사상체 박테리아가 탄산염 광물질을 침전한 결과 형성된 것으로, 무기 엽층은 그 후 속성과정 중 생성 발달한 것으로 추정된다.

구성 광물과 화학 분석

Fig. 5는 막대기형 스트로마톨라이트의 단면을 현미경 아래에서 스케치한 것이다. 그림의 아래 부분은 스트로마톨라이트의 성장이 시작되는 부분이며, 사상체 남조세균이 쇄설성 물질을 기층으로 삼아 수직 방향으로 성장하며 얇은 피막(d)을 이룬다. 석영이 조금 포함된 석회질 이질물은 중심 부분(a,b)에 많으며, 이차 물질인 스파라이트로 교결되어 있다. 수축

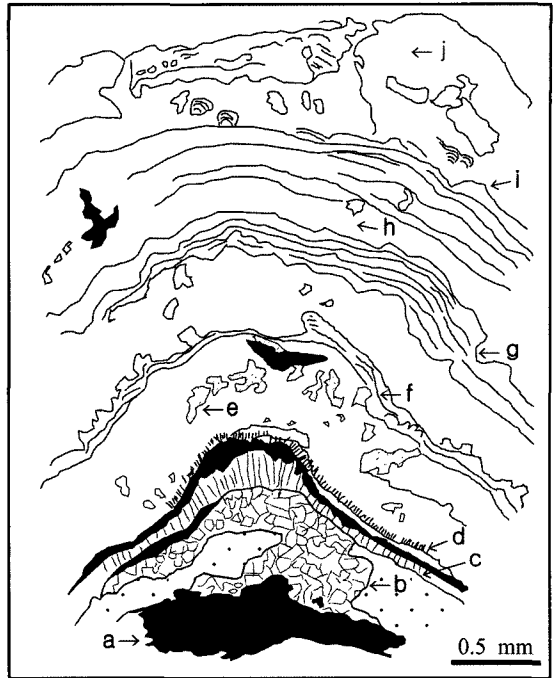


Fig. 5. Sketch of a cross section of the rod-shaped stromatolite (a, clastic sediments; b, original void filled with later diagenetic sparite; c, fibrous calcite; d, filamentous cyanobacterial mat; e, fenestrae filled with micrite and microsparite; f, g, i, organic-rich layer; h, sediment-rich layer).

으로 생성된 아래 부분의 빈 공간은 주상 방해석(c)으로 채워진다.

스트로마톨라이트의 단면에서 진한 엽층(organic layer)은 네 겹(d, f, g, i)이 보이며, 각 진한 엽층은 4~5개의 미세엽층을 보인다. 아래에서부터 첫째 엽층과 둘째 엽층 사이에는 용식 구조로 보이는 공동(e)이 방해석으로 채워진다.

막대기형 스트로마톨라이트의 단면에서 방해석이 백운석으로 속성과정 중에 교대하고 있는 모습이다 (Fig. 6). 포위 부분의 바깥으로 갈수록 교대가 많이 진행되며 본 표본에서의 교대는 50% 정도이다. 우측 상단에서는 반달 모양의 잔류(relic) 조직을 볼 수 있다. 흔히 교대 작용은 가장자리에서 중심 부분으로 진행된다.

또한 막대기형 스트로마톨라이트의 포위 부분의 바깥으로 탄산염 광물이 실리카(SiO₂)의 침투를 받고 있다(Fig. 7). 이는 속성과정 중에 외부의 쇄설물이 녹아 탄산염의 틈새를 따라서 교대하며 내부로 점차 영향을 확대해 나가는 것으로 해석된다.

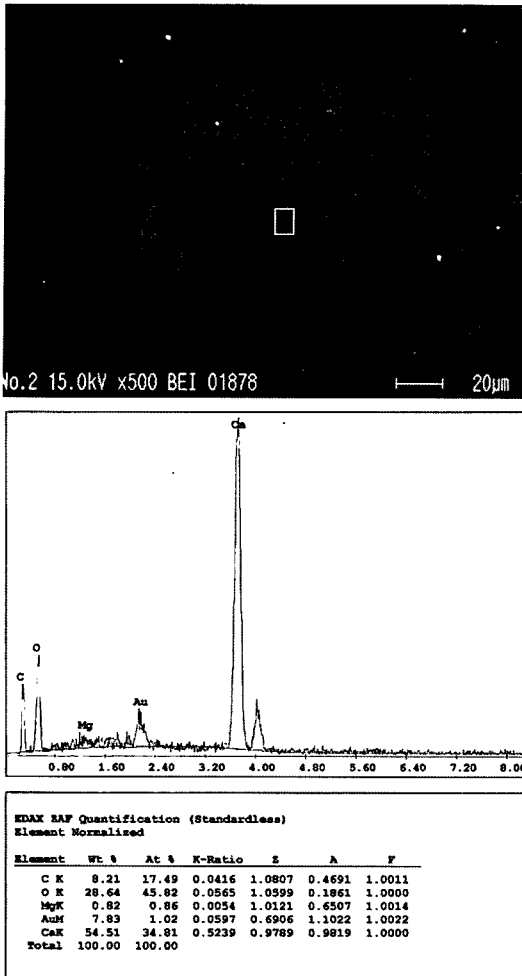


Fig. 6. Backscattered electron (BSE) image of point g in Fig. 5 (grey: calcite, black square area indicates dolomitic composition, white dot: pyrite). Energy dispersive spectrum (EDS) pattern indicates dolomitic composition.

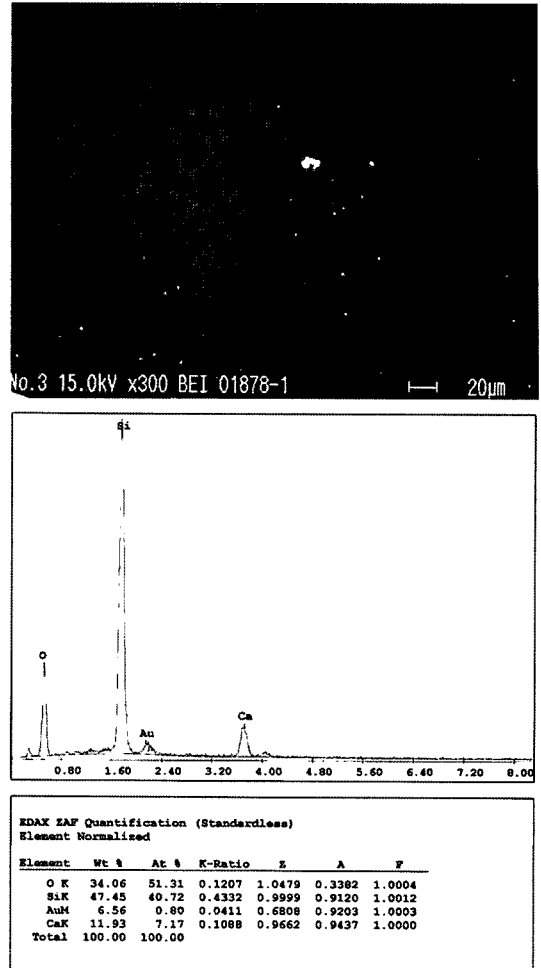


Fig. 7. BSE (upper) image of point j in Fig. 5 (grey: calcite, black: silica, white dot: pyrite) and EDS (below) pattern of arrowed area above image.

스트로마톨라이트를 형성하는 생명체

남조세균

본 연구 지역의 스트로마톨라이트는 엽층리 구조를 잘 보존하고 있었지만, 퇴적 후 속성작용의 영향으로 이를 형성한 생명체의 흔적이 사라졌다. 다만 일부에서 미세 조류 화석이 발견되어 스트로마톨라이트의 형성에 관한 정보를 제공한다. 사상체 남조세균 (filamentous cyanobacteria) 화석이 스트로마톨라이트가 성장하기 시작되는 곳에 유기 피막으로 분포하며, 퇴적층이나 유기물층(주로 나무)을 기질로 부착한 후 밀착하여 수직 방향으로 성장하면서, 얇은 유기물 엽

층을 형성한다. 사상체 박테리아 화석의 외부는 짙은 갈색의 미크라이트로 피복되어 있고, 내부는 투명한 스파라이트로 채워져 있다.

본 연구에서 세포사(trichome)를 발견할 수 있었다. 세포사는 점질초(mucilaginous sheath)를 가진 사상체에서 점질초를 제외한 부분이며, 대부분의 스트로마톨라이트에서 세포사를 발견할 수 없는 이유는 속성 과정 중의 변질의 결과로, 또는 퇴적되기 전 환경의 악화로 이미 탈출한 결과로 추정된다. 세포사가 없는 사상체의 빈 공간은 공간 충전 물질(e.g., sparite)로 채워져 있으며, 일부 표본에서 검은색의 세포열이 관찰된다(Fig. 4-i).

사천시 일대의 진주층에서는 적어도 두 종류 이상의

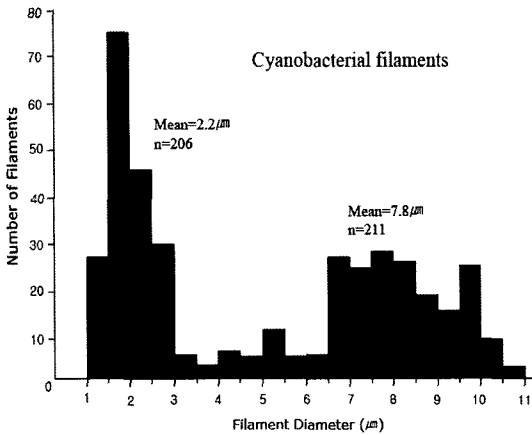


Fig. 8. Size frequency distribution of calcified filamentous microfossils from rod-shaped stromatolites of Jinju Formation, Sacheon. It shows a distinct bi-modality indicating that at least two filamentous groups were responsible for the formation of rod-shaped stromatolites.

사상체 남조세균이 막대기형 스트로마톨라이트를 형성한다(Fig. 8). 한 집단은 사상체의 직경이 1.0~3.5 μm (평균 2.2 μm)이며, 다른 집단은 사상체의 직경이 5.0~11.0 μm(평균 7.8 μm)이다. 화석에서의 분류는 주로 직경의 크기에 근거하여 현생 남조류의 화석종으로 분류한다(Schopf, 1968; Knoll et al., 1991; Seong-Joo et al., 1999). 크기와 모양으로 보아 전자는 *Eomycetopsis*이며, 후자는 *Siphonophycus*로 추정된다.

이러한 박테리아 화석의 분포는 스트로마톨라이트가 시작되는 곳에 집중되며, 최대 세 겹까지 나타난다. 대부분의 표본에서 기질 위에 최초의 사상체 엽층은 1겹 정도 발견되었으며, 2-3겹은 소수의 표본에서만 발견할 수 있었다. 중간 부분에서는 밀도가 떨어진 사상체가 반복적으로 분포하며, 혹 다른 종류의 녹조류와 공조하는 경우도 있다(Fig. 4-j). 마지막 단계의 표면 가까이 가면, 박테리아 화석이 관찰되지 않는데 이는 숙성과정 중의 유기물의 분해로 인한 결과로 추정된다.

녹조류

본 연구 지역에서 녹조류(Chlorophycean algae)로 판단되는 화석이 막대기형 스트로마톨라이트 내에서 산출되었다. 사상체 박테리아 화석은 스트로마톨라이트의 성장을 시작하는 부분과 성장 과정 중에서 나타난다. 사상체 녹조류는 남조 세균과는 달리 스트로

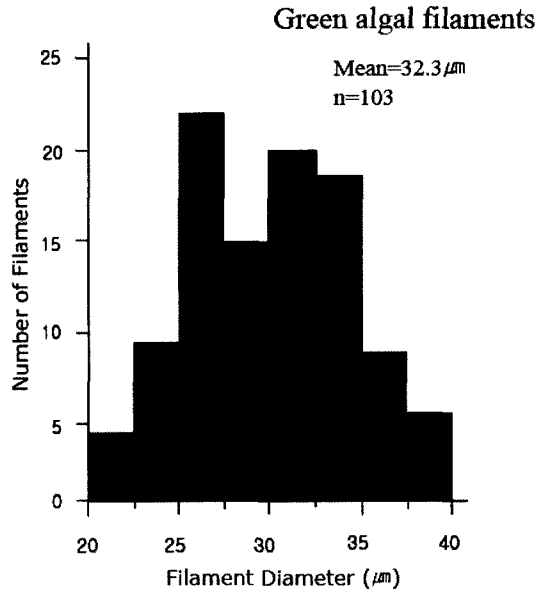


Fig. 9. Size frequency distribution of calcified filamentous microfossils from rod-shaped stromatolites of Jinju Formation, Sacheon. It shows a distinct modality indicating that at least one filamentous group was responsible for the formation of rod-shaped stromatolites.

마톨라이트가 시작되는 곳에서는 발견되지 않는다. 스트로마톨라이트의 성장 과정 중에 진한 갈색의 엽층 사이에 밝은 색의 엽층에서 층리면과 수직으로 균집을 이루며 사상체 남조류 사이에 분포한다. 이는 스트로마톨라이트의 형성 초기에는 사상체 남조류가 스트로마톨라이트를 형성하기 시작하고, 성장 과정 중에는 녹조류와 사상체 남조류가 공존하며 보조자로 스트로마톨라이트를 형성하는 것으로 해석된다.

녹조류 사상체의 직경은 20~40 μm(평균 32.3 μm)이다. 이는 본 지역에서 발견되는 사상체 남조세균에 비하여 평균 직경은 4~15배 크기에 해당한다. 또한 분지하지 않으며, 끝으로 갈수록 가늘어지는 형태(tapering)로 층리면에 수직으로 성장한다. 외부는 진한 갈색이고 내부는 흰 부분으로 되어있으며, 이는 진한 갈색은 마이크로라이트로, 흰 부분은 마이크로스파라이트로 구성되기 때문이다. 적어도 한 종류 이상의 사상체 녹조류가 막대기형 스트로마톨라이트를 형성하는데 관여하였거나 거주자로 분포한다(Fig. 9). 현생의 소포자목(Microsporales)처럼 비분지성 사상체 녹조강에 속할 가능성이 있으나(Knoll et al., 1991) 더 이상 종이나 속으로 구분하는 데는 한계가 있다.

결 론

막대기형 스트로마톨라이트는 진주층의 전 지역에서 세 형태(산재상, 층상, 괴상)로 다량 산출되며, 이는 나뭇가지가 생존 상태에서 혹은 사후에 조류에 의해 피복되어 생성된 외지성 화석이며, 크기는 대개 길이 4~12 cm, 직경 2~4 cm이다. 막대기형 스트로마톨라이트의 단면상에서 중심 부분과 포위 부분으로 분리되며 전자는 쇄설성 퇴적물층이고 후자는 스트로마톨라이트로 미세엽층의 교호로 형성된다. 바깥으로 가면서 속성작용으로 대개 파쇄 되고 변형된다.

스트로마톨라이트를 형성한 생물은 최소 2 종류의 남조세균(평균 직경 2.2 μm 와 7.8 μm)과 1 종류의 녹조류(평균 직경 32.3 μm)이며, 생태적 역할은 남조세균이 피막 건설자(mat-builder)이고, 녹조류는 피막 보조자(mat-dweller)이다. 일부 박테리아 화석에서 세포사가 발견되며, 이의 모양과 크기에서 남조세균은 *Eomycetopsis*, *Siphonophycus*로 추정된다.

스트로마톨라이트의 분포, 종류, 산출 양상 등에서, 진주층의 퇴적 환경은 호안선이 수시로 전진과 후퇴를 반복하는 얇은 호수의 가장자리로 추정되며, 폭풍, 폭우 등의 높은 에너지가 발생한 것으로 해석된다.

사 사

본 논문의 작성 중 조언을 주신 경북대학교의 이성주 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 심사과정을 통하여 세심한 비평과 건설적인 의견을 주신 상지대학교의 이광춘 교수님, 한국교원대학교의 김정률 교수님 그리고 공주대학교의 김종현 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 백인성, 이용일, 1994, 진주부근 백악기 하산동층의 범람원 호수 퇴적층 내 고기후의 기록. 지질학회지, 30(4), 410-424.
- 서승조, 1993, 진주지역 진주층산 엽지개 화석. 과학교육연구, 19, 57-63.
- 안귀영, 백인성, 2004, 경상남도 사천시 부근의 백악기 진주층에 발달한 특이 균열구조의 산상과 성인. 지질학회지, 40(1), 93-102.
- 양승영, 윤철수, 김태완, 2003, 한국화석도감. 아카데미 서적, 서울, 419 p.
- 이성주, 공달용, 2004, 경상남도 남해지역의 진주층에서 분포하는 막대기형 스트로마톨라이트. 지질학회지, 40, 13-26.
- 임성규, 최종결, 2004, 경남 사천시 비토리의 진주층에서 산출되는 대형 용각류의 아치형 보행열. 한국고생물학회 20차 학술발표회, p 24.
- 최종결, 2004, 경상남도 사천시 일대의 진주층에서 산출되는 백악기 비해성 스트로마톨라이트. 경북대학교 대학원 박사학위 논문, 187 p.
- Choi, C.G., Seong-Joo, L., and Lee, K.C., 2001, Stromatolitic algal encrustation on plant from the Cretaceous Jinju Formation, Sacheon City. The Geological Society of Korea, Abstracts, p. 23.
- Choi, D.K. and Park, J.B., 1987, Palynology of the Jinju Formation (Lower Cretaceous), Waegwan-Daegu and Jinju Areas, Korea. Journal of Paleontological Society of Korea, 1, 28-43.
- Golubic, S., 1976, Organisms that build stromatolites. In Walter, M.R. (ed.), Stromatolites. Elsevier, Amsterdam, 113-148.
- Hermann, J.S. and Hubbard, D.A., 1990, Travertine- marl: stream deposits in Virginia. Commonwealth of Virginia, Virginia, 184 p.
- Kim, J.Y., Keighley, D.G., Pickerill, R.K., Hwang, W., and Kim, K-S., 2005, Trace fossils from marginal lacustrine deposits of the Cretaceous Jinju Formation, southern coast of Korea. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 218, 105-124.
- Kim, J.Y. and Kim, T.S., 1999, Occurrence and geological significance of stromatolites from the Precambrian strata in the Socheong Island, Incheon, Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 20 (1), 111-125.
- 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., Swett, K., and Mark, J., 1991, Paleobiology of a Neoproterozoic tidal flat/lagoonal complex: The Draken conglomerate Formation, Spitsbergen. Journal of Paleontology, 65, 531-570.
- Lee, K.C., Woo, K.S., Paik, K.H., and Choi, S.J., 1991, Depositional environments and diagenetic history of the Panyawol, Hwasan, Shinyangdong formations, Kyeongsang Supergroup, Korea, Journal of Geological Society of Korea, 27, 471-492.
- Merz, M.U.E., 1992, The biology of carbonate precipitation by cyanobacteria. Facies, 26, 81-102.
- Monty, C.L.V., 1972, Recent algal stromatolitic deposits, Andros island, Bahamas, Preliminary report. Sonderdruck aus der Geologischen Rundschau, 61, 742-783.
- Neuweiler, F., Reitner, J., and Monty, C.L.V., 1997, Biosedimentology of microbial buildups. Facies, 36, 195-284.

- Park, S.O. and Chang, K.H., 1998, Some Cretaceous Conchostracans of Kyongsang Basin. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 14, 179-199.
- Schopf, J.W., 1968, Microflora of the Bitter Springs Formation, Late Precambrian, central Australia. *Journal of Paleontology*, 42, 651-588.
- 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., Kim, J.Y., and Lee, K.C., 2003, Bacterial microfossils from Precambrian sedimentary rocks, Socheong Island, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 171-182.
- 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.

2006년 12월 1일 접수
2006년 12월 26일 수정원고 접수
2007년 1월 9일 채택