

## 천연기념물 제413호 영월 문곡리 스트로마톨라이트에 대한 고찰

공달용<sup>1</sup> · 이성주<sup>2,\*</sup><sup>1</sup>문화재청 국립문화재연구소<sup>2</sup>경북대학교 지질학과

## 요 약

강원도 영월군 북면 문곡리 남교 하천변의 절벽에 분포하는 소위 “문곡리 스트로마톨라이트”는 2000년 3월 천연기념물 제413호(영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트)로 지정되었으나 외부 및 내부 형태가 일반적인 스트로마톨라이트와는 상이하여 스트로마톨라이트의 진위에 대한 논란이 일고 있다. 문곡리 스트로마톨라이트는 반구형 스트로마톨라이트가 연속되어 나열된 LLH 형태의 스트로마톨라이트(laterally-linked hemispheroid)와 일면 유사하나, 돔 구조의 연속성이 하부까지 관찰되지 않고 스트로마톨라이트의 핵심 구성 요소인 미세엽층리(fine lamination) 구조가 야외 및 박편상에서도 관찰되지 않기 때문에 스트로마톨라이트로 볼 수 없다. 또한 문곡리 스트로마톨라이트의 매끈한 표면 구조와 돔 사이의 불규칙하게 갈라진 틈(crack) 구조도 일반적인 스트로마톨라이트와는 차이가 많다. 이러한 차이점은 문곡리 스트로마톨라이트가 알려진 것과 달리 스트로마톨라이트가 아닌 다른 형태의 퇴적구조임을 시사하며, 관찰된 특징들로 미루어 머드마운드(mud mound)로 해석된다. 따라서 기존의 스트로마톨라이트라는 명칭에 대한 재검토가 요구된다.

**주요어:** 천연기념물, 문곡리 스트로마톨라이트, 머드마운드, 미세엽층리

**Dal-Yong Kong and Seong-Joo Lee, 2009, Reconsideration of the Natural Monument No. 413 Mungokri Stromatolite, Yeongwol, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 45, no. 6, p. 711-723**

**ABSTRACT:** The so-called "Mungokri Stromatolite" distributed along the cliff of a creek in the vicinity of Namgyo, Mungokri, Yeongwol, Gangwondo was designated as Natural Monument No. 413 in March, 2000. The Mungokri Stromatolite resembles LLH (laterally-linked hemispheroid) stromatolite, each dome of which is laterally connected forming a stromatolite bed. The Mungokri Stromatolite, however, cannot be regarded as stromatolite because domal structure and fine lamination (the most diagnostic character) cannot be observed both in the field and through petrological thin sections. The smooth surface structure and very thin, irregular cracks characterized in the surface of the Mungokri Stromatolite also differs from those of a normal stromatolite. Such differences strongly suggest that the Mungokri Stromatolite is not a stromatolite but a mud mound. Consequently, renaming of the Mungokri Stromatolite, Natural Monument No. 413, is necessary.

**Key words:** Natural Monument, Mungokri Stromatolite, mud mound, fine lamination

(Dal-Yong Kong, National Research Institute of Cultural Heritage, Cultural Heritage Administration, Daejeon 302-834, Korea; Seong-Joo Lee, Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

## 1. 서 론

문화재란 인위적이거나 자연적으로 형성된 국가적·민족적·세계적 유산으로서 역사적·예술적·학술적·경관적 가치가 큰 것을 말한다(문화재청,

2008). 여기에는 유형문화재(예, 건조물, 고문서, 회화 등), 무형문화재(예, 연극, 음악, 공예기술 등), 민속자료(예, 의식주, 신앙 등) 및 기념물(예, 사적지, 자연문화재 등)이 포함되어 있으며, 지질분야의 자료는 기념물 중 천연기념물로 분류된다. 지질분야는

\* Corresponding author: +82-53-950-5355, E-mail: sjl@knu.ac.kr

1962년 12월 3일 “상주 운평리 구상화강암(천연기념물 제69호)”과 “칠곡 금무봉 나무고사리 화석산지(천연기념물 제146호)”가 천연기념물로 지정된 이후 2000년 이전까지 30건이 지정되었으며 2000년 이후 28건이 추가로 지정되어 총 58건이 지정·관리되고 있다. 지정 건수의 증가율은 2000년 이전까지 매년 0.8건의 증가율을 보였으나 2000년 이후 매년 3건으로 지정 건수가 빠르게 증가하고 있으며 이러한 추세는 당분간 지속될 것으로 예상된다(공달용 외, 2008). 지질분야 천연기념물은 크게 화석, 천연동굴, 암석 및 이들에 포함되지 않는 지형·지질분야로 세분화되며, 이 중 화석분야가 19건(33%)으로 지질분야의 1/3을 차지할 정도로 비중이 높다. 화석분야의 대부분은 거화석(총 18건: 고생대 1건, 중생대 15건, 신생대 2건)과 관련된 것이고 미화석과 관련된 천연기념물은 단 1건만이 지정되어 있다(이성주, 2008).

강원도 영월군 북면 문곡리 하천변에 분포하고 있는 일명 “문곡리 스트로마톨라이트”는 작은 반구형의 돌들이 연결된 형태와 유사하고 보존상태가 우수하며 멀리서도 관찰될 만큼 규모가 크다. 또한 인접한 지층에는 넓게 발달한 건열이 잘 보존되어 있어서 2000년 3월에 천연기념물 제413호로 지정되었

다(천연기념물 제413호 영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트). 이는 우리나라에서 산출되는 스트로마톨라이트(예, 선캄브리아이언의 소청도 스트로마톨라이트, 고생대의 태백 스트로마톨라이트, 중생대의 하양 스트로마톨라이트) 중에서 유일하게 천연기념물로 지정된 것으로 보존상태, 외부형태 및 접근성 등이 다른 지역의 스트로마톨라이트에 비해 우수하다. 하지만 문곡리 스트로마톨라이트에 대하여 학술적으로 연구가 수행된 적은 없으며 외부 및 내부 형태 또한 전형적인 스트로마톨라이트와는 다소 다른 형태를 갖고 있어 스트로마톨라이트의 진위에 대한 논란이 일고 있다. 본 논문은 천연기념물 제413호로 지정된 소위 “문곡리 스트로마톨라이트”의 성인을 규명하고 명칭에 대한 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 지질개요

“문곡리 스트로마톨라이트”가 분포하는 영월군 문곡리는 영월형 조선누층군(영월층군: Choi, 1998)의 최상부 층인 영홍층에 해당한다(그림 1). 영월형 조선누층군은 우리나라의 대표적인 하부 고생대 지층의 하나로 영월군 영월읍 일대와 북면의 문곡리-

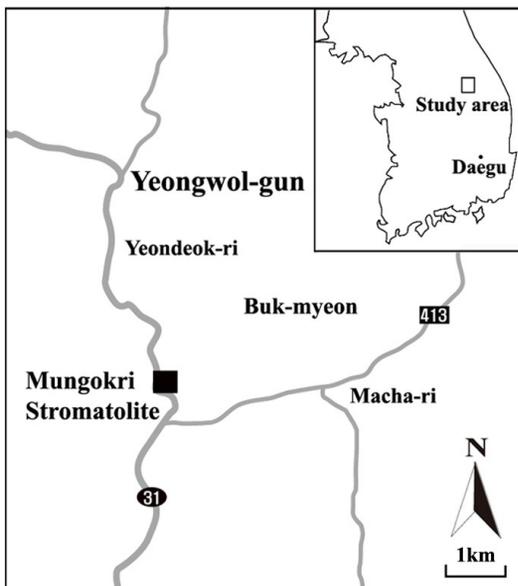


Fig. 1. Locality map of Natural Monument No. 413 and information board for the Mungokri Stromatolite standing on local road no. 31.

마차리-공기리 지역에 넓게 분포하며 남쪽으로는 충청북도 단양의 서쪽까지 연장되어 있다. 이 지역의 조선누층군은 Yosimura(1940)에 의하여 최초로 연구된 이래 많은 학자(예, 김옥준 외, 1973; 정창희 외, 1979)들에 의하여 층서가 정립되었으며 하부로부터 삼방산층, 마차리층, 와곡층, 문곡층, 영흥층 등 5개의 암층서 단위로 구분된다. 각각의 지층들은 모두 정합의 관계이며 최상부층인 영흥층은 상부고생대 평안누층군의 최하부층인 흥점층에 의하여 부정합으로 덮여 있다. 반면 Choi(1998)는 “두위봉형 조선누층군”과 같은 용어 사용의 불합리한 점을 지적하며 태백지역의 조선누층군을 태백층군이라 부를 것을 제안하는 등, 영월지역의 영월형 조선누층군을 영월층군으로 부를 것을 제안하였다.

영월지역의 문곡층(Chung, 2007)과 영흥층(Paik *et al.*, 1991)에서는 스트로마톨라이트가 간헐적으로 보고되었으나 태백지역에 비하여 산출지와 개체수가 적고, 스트로마톨라이트도 일정한 층준에서 발견된 것이 아니라 독립적인 개체들로 보고되었다. 특히 Paik *et al.*(1991)은 영월군 북면 영흥교 1.5 km 북쪽에 위치한 연덕리 마을의 문곡층 중부 층준에서 독립적으로 발견된 가지형(digitate) 스트로마톨라이트를 보고하고 이를 근거로 그 층준을 조간대 환경으로 해석하였다. 하지만 문곡층에서 발견된 스트로마톨라이트는 동일한 지역에서 다시 찾기 어려울 정도로 개체수가 극히 적고 스트로마톨라이트의 횡적 연장성도 매우 제한적이기 때문에 문곡층의 스트로마톨라이트는 문곡층이 퇴적될 당시의 주요 퇴적상은 아닌 것으로 판단된다.

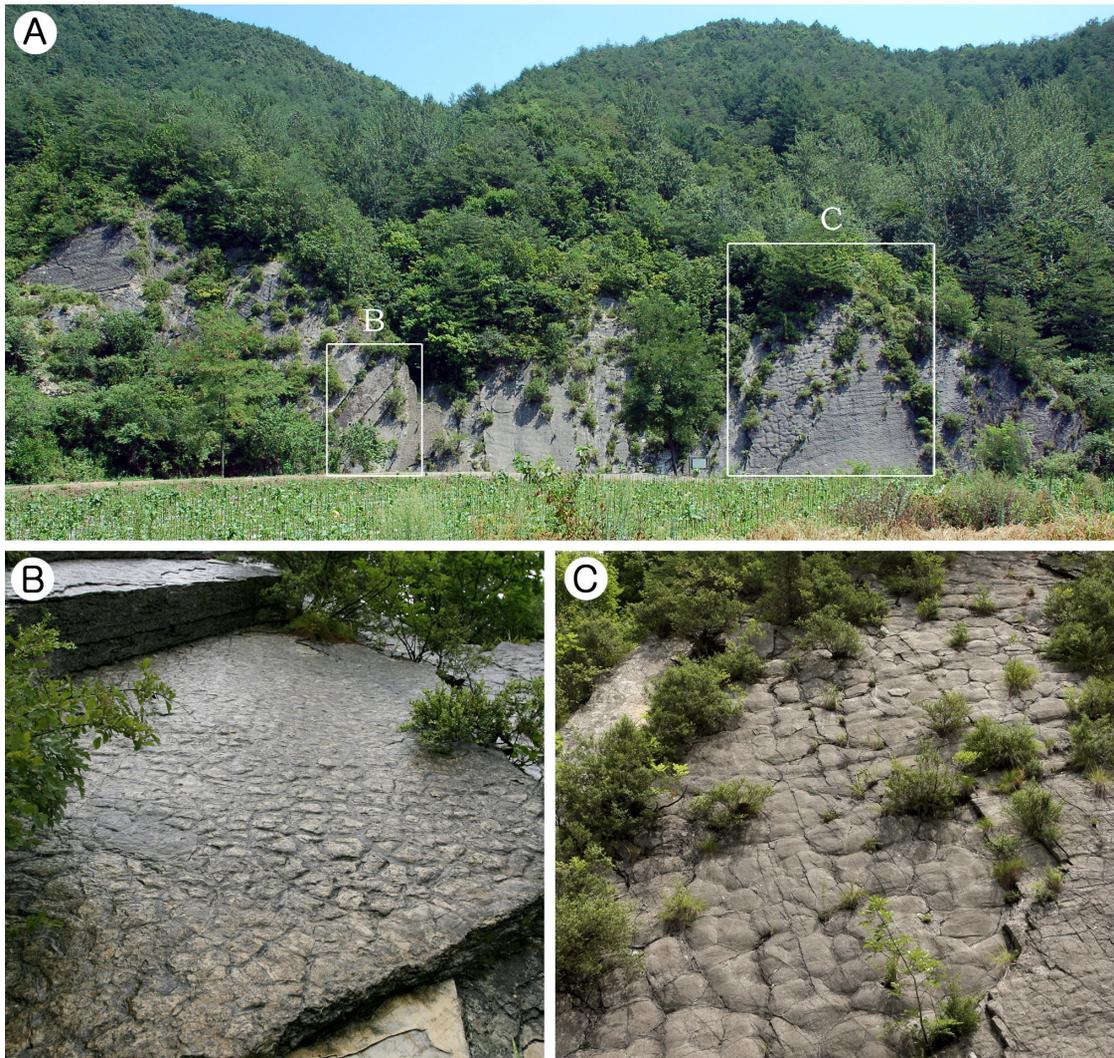
영흥층의 천연기념물 제413호 스트로마톨라이트 화석은 영월군 북면 문곡리의 남교 하천변의 절벽에서 관찰된다(그림 2). 영월형 조선누층군의 최상부에 속하는 본 층은 삼방산 북쪽, 도마치, 삼옥리와 거운리 일대에 넓게 분포하며 하부와 중부에는 돌로마이트질 석회암과 돌로마이트가 우세하나 상부로 갈수록 석회암이 우세해지는 양상을 보인다(Yoo and Lee, 1997). 스트로마톨라이트 화석이 발견된 남교 부근은 영흥층의 중부 층준으로 천해성 환경이었음을 나타내는 퇴적구조(예, 건열 및 연흔)와 스트로마토포이드를 비롯한 화석들이 간간히 보고되었다(이동진, 유찬민, 1993). 천연기념물 제 413호 스트로마톨라이트 화석이 분포하는 인접한 층준에서도 커

다란 규모의 건열과 연흔을 쉽게 관찰할 수 있어 이러한 해석을 뒷받침한다.

### 3. 스트로마톨라이트

스트로마톨라이트는 일반적으로 남조세균(cyanobacteria)에 의해 형성된 생물퇴적구조로 알려져 있으나, 스트로마톨라이트를 간단하게 정의하기란 쉽지 않다. 이러한 이유 중 가장 큰 원인은 스트로마톨라이트의 형태와 산출환경 및 스트로마톨라이트를 형성하는 생물체의 다양성에 기인한다. 일반적으로 스트로마톨라이트는 크게 판상형(stratiform), 주상형(columnar) 및 반구형(hemispherical)의 미세엽층리(fine lamination) 구조를 가진 것으로 구분되나(그림 3), 기본 구조에서 파생된 형태가 너무나 다양하여 그 형태를 단언적으로 정의하기는 어렵다(Hofmann, 1976; Krylov, 1976; Semikhatov and Raaben, 2000). 스트로마톨라이트의 산출환경 또한 매우 다양하여 해수, 담수, 기수 및 심지어는 북극의 호수(Parker *et al.*, 1981; Parker and Warton, 1985)와 고온의 온천(Castenholz, 1984; Ward *et al.*, 1989) 및 사막(Campbell, 1979; Krumbein and Giele, 1979)에서도 형성되며, 원핵생물인 남조세균을 비롯하여 진핵생물인 녹조류(Awramik and Riding, 1988)와 구조류(Winsborough and Golubic, 1987) 및 균류(lichen stromatolite, Klappa, 1979) 등도 스트로마톨라이트를 형성하는데 주요 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

이러한 다양성과 더불어 유사한 구조를 가지는 무기기원의 퇴적구조(calcrete(Wright, 1989), speleothem(Thraillkill, 1976), geysirite(Jones *et al.*, 1997)) 및 유기퇴적구조[tufa(Pedly, 2000, travertine(Ford and Pedly, 1996), sinter(Jones *et al.*, 1998))]들이 너무나 많고, 이러한 유사 구조들의 형성 메커니즘 또한 스트로마톨라이트의 형성기작과 별 다른 차이가 없기 때문에 스트로마톨라이트를 이러한 유사 구조들과 명확히 구분하여 정의하는 것은 어렵다(Krumbein, 1983; Burne and Moore, 1987). 이러한 복잡성 때문에 Burne and Moore(1987)는 유사 구조들을 통칭하는 새로운 용어인 “microbialite”를 제안하기도 하였다. 하지만 microbialite의 정의 또한 스트로마톨라이트와 매우 유사하여 스트로마톨라이트를 대신하여 사용되진 않는다.



**Fig. 2** Natural Monument No. 413. developed on the cliff in the vicinity of Namgyo. A) panoramic view; B) close view of a mud crack bed exposed in the left of A (small box); C) close view of a stromatolite bed developed in the right of A (large box).

가장 널리 알려진 스트로마톨라이트의 정의는 “미생물의 활동(주로 남조세균)으로 퇴적물이 포획 또는 침전(trapping, binding and/or precipitation) 되어 형성된 생퇴적구조(organo-sedimentary structure)” 이다(from Awramik and Margulis in Walter, 1976, p. 1). 국내에서 인용되는 대부분의 스트로마톨라이트 정의도 이 정의를 사용한다(이광춘, 1992; 김태숙, 1998). 하지만 이러한 정의는 생성기원(현생 스트로마톨라이트의 관점에서)에 초점을 둔 것으로 스트로마톨라이트의 형태에 대하여는 설명하지 않

는다(Golubic, 1991). 때문에 화석을 연구하는 학자들은 이러한 정의를 외면하는 반면 일반적으로 Semikhatov *et al.*(1979)이 제안한 형태적 정의를 따른다. Semikhatov *et al.*(1979)은 생성기원과 환경 및 형태의 다양성이 너무나 크다는 것을 인식하고, 이러한 요인에 대하여 언급하는 대신 - Although characteristically of microbial origin and calcareous composition, it may be of any origin, composition, shape, size or age (Semikhatov *et al.*, 1979, p. 993) - 화석으로 산출되는 스트로마톨라이트

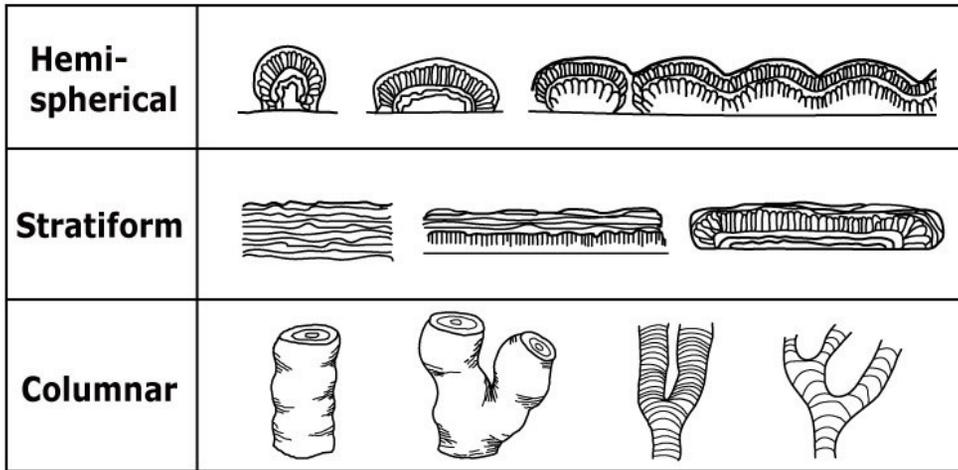


Fig. 3. Generalized diagrammatic illustrations of the most commonly encountered stromatolite morphotypes. Note that all stromatolites are characterized by fine lamination (modified from Preiss, 1976).

트의 형태에 초점을 두고 정의한다. 즉, 스트로마톨라이트를 "퇴적면에서 상부로 성장하여(accretionary away from a point or limited surface of initiation) 고화된(lithified) 엽층리(laminated)를 가진 퇴적성장구조(sedimentary growth structure)"로 간단히 정의한다. 대부분의 고생물학자들이 이들의 정의를 따르는 이유는 이들의 정의가 야외에서 관찰되는 스트로마톨라이트 화석을 기본으로 한 것이며, 화석의 경우에는 현생 스트로마톨라이트와 달리 스트로마톨라이트의 형성 기작과 이들을 형성했던 생물체의 증거가 대부분 보존되어 있지 않기 때문이다.

야외에서 스트로마톨라이트 화석을 인지하는 가장 중요한 요소는 다양한 형태의 미세엽층리 구조이다. 스트로마톨라이트의 핵심요소인 미세엽층리 구조는 스트로마톨라이트를 형성하는 남조세균의 차이에 의하여 다양성을 띠는 것으로 알려져 있으며 (e.g., Golubic, 1976), 일반적으로 구형의 박테리아(cocoid cyanobacteria)는 엽층리를 만들지 못하여 쓰름볼라이트(thrombolite, Aitken, 1967)를 형성하는 대신 대부분의 엽층리 구조는 사상체 박테리아(filamentous cyanobacteria)에 의해 형성하는 것으로 알려져 있다. 스트로마톨라이트는 성장 초기에 판상형 형태를 이루다가 엽층리의 지속적인 축적에 의하여 반구형이나 주상형 등의 스트로마톨라이트로 성장하게 된다. 일반적인 스트로마톨라이트는 이러한 3가지의 서로 다른 성장 메커니즘이 복합적으로

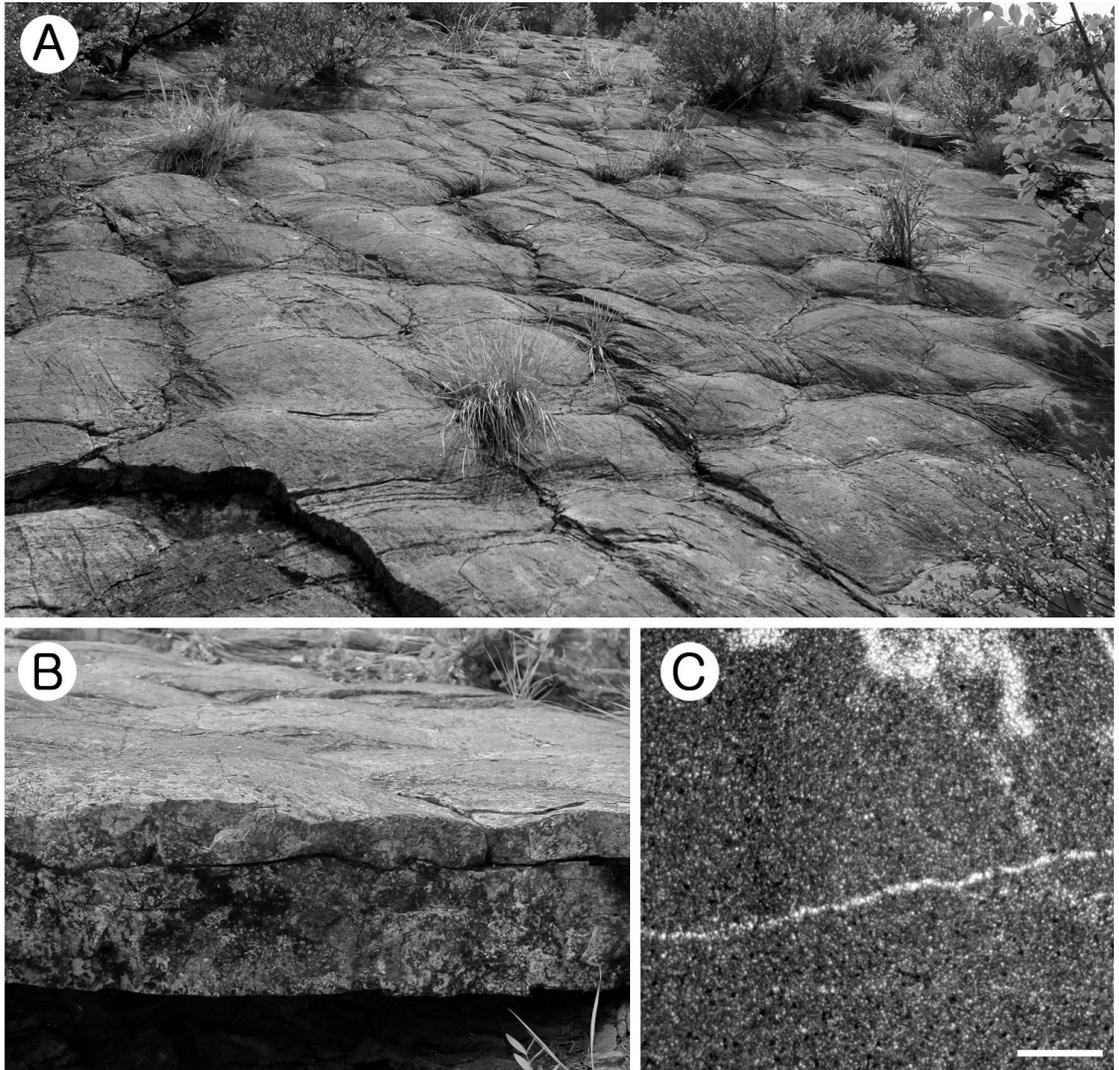
로 작용하여 형태의 다양성을 띠게 된다(Petrov, 1996; Seong-Joo et al., 2000).

#### 4. 천연기념물 제413호 영월 문곡리 스트로마톨라이트

"영월 문곡리 스트로마톨라이트"는 국내에서 가장 널리 알려진 스트로마톨라이트 화석산지인 강원도 영월군 북면 문곡삼거리 부근 31번 국도변에 위치한 연덕천의 절벽에 발달해 있다. 스트로마톨라이트와 동일 지층 또는 인접한 지층에서 건열구조가 함께 발견되고 멀리서도 관찰할 수 있을 정도로 규모가 커서 이 지역은 2000년 3월 16일에 천연기념물 제413호(영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트)로 지정되어 관리되고 있으나, 스트로마톨라이트의 진위와 관련된 성인에 대한 논란이 계속되고 있다. 특히, 스트로마톨라이트 화석을 야외에서 판단할 수 있는 가장 중요한 핵심요소인 외부 형태와 미세엽층리 구조가 관찰되지 않는 점이 이러한 논란의 핵심이다.

##### 4.1 산출양상 및 외부형태

일명 "문곡리 스트로마톨라이트"는 높이 13.5 m, 폭 16 m 정도의 노두에서 관찰되며 멀리서 본 모습은 불규칙한 크기의 덩들이 도톰하게 돌아있는 형태이다(그림 4A). 일면 이러한 구조는 층리면에서 관



**Fig. 4.** Structural characteristics of the so-called Mungokri Stromatolite. (A) surface structure characterized by laterally linked hemispheroidal domes; (B) cross sectional view of the stromatolite domes showing non-laminated, massive structure; (C) petrological thin section perpendicular to a bedding plane characterized by homogeneous micrite materials without any vestige of laminated structure. Scale bar in (C) represents 1 mm.

찰할 경우 반구형 스트로마톨라이트가 연속되어 나열된 LLH 스트로마톨라이트(laterally-linked hemispheroid, Logan *et al.*, 1964)와 유사하나, 전형적인 스트로마톨라이트의 모습과는 차이가 많다.

일반적인 스트로마톨라이트의 경우 층리면에서 관찰되는 돔 구조를 동일한 단면에서 관찰할 경우 반구형의 모습이 하부로 연장되는 구조가 관찰되고 하부로 갈수록 이러한 돔 구조의 불룩한 정도가 감소되는 모습을 보이는데, 문곡리 스트로마톨라이트

의 경우 돔 구조의 연장성뿐만 아니라 어떠한 구조도 관찰되지 않는다(그림 4B). 단순히 퇴적물이 솟아 있는 마운드(mound)의 형태만을 띠고 있다. 반구형 돔들은 일정한 방향성이 없이 서로 불규칙하게 연결되어 있으며, 동일한 층리면에 있는 돔들의 크기(직경 약 20~80 cm) 또한 불규칙하다. 일반적으로 문곡리 스트로마톨라이트와 같이 반구형 돔들이 인접하여 스트로마톨라이트 층을 이루는 경우는 동일한 수심의 퇴적면(water/sediment interface)위에서 성

장하기 때문에 돔의 크기는 비슷해지고 외부 형태는 조류나 파도의 방향에 의하여 결정되기 때문에 돔들은 일정한 방향성을 가지게 된다(Hoffman, 1976; Walter *et al.*, 1992).

또한 대부분의 스트로마톨라이트에서는 고유의 표면구조(wavy, mammilate or concentric structure)가 관찰되는데 문곡리 스트로마톨라이트의 표면에는 어떠한 구조도 관찰되지 않으며 표면은 매끄러운 상태로 보존되어 있다(그림 5A). 일반적으로 수심이 얇은 환경에서 형성되는 반구형 스트로마톨라이트는 파도나 조류의 방향과 평행하게 돔들이 배열되고, 표면에도 이러한 구조가 반영된 구불구불한 선적 구조(wavy ridges)가 나타난다. 이러한 구조는 우리나라 경상분지에 발달한 스트로마톨라이트 돔에서도 쉽게 관찰된다(그림 5B). 반면 파도나 조류의 영향을 적게 받는 석호나 호수 환경에서 성장하는 스트로마톨라이트의 표면에는 구불구불한 구조 대신에 울퉁불퉁한 구조(mammilate structure)가 형성되는데(그림 5C), 이는 안정적인 환경의 돔 표면에서는 일반적으로 아주 작은 돔(micro-dome)의 형태로 반구형 돔이 성장하기 때문이다(Southgate, 1989; Clough and Goldhammer, 2000). 두 경우 모두 풍화에 의하여 표면구조가 삭박되면 돔 구조를 형성하는 미세엽층리가 노출되기 때문에 동심원 구조가 선명하게 나타난다(그림 5D).

문곡리 스트로마톨라이트의 돔과 돔이 연결된 곳에서는 건열과 유사한 갈라진 틈이 발달되어 있는데(그림 6A, C), 이러한 구조 또한 스트로마톨라이트에서 관찰되기 매우 어렵다. 스트로마톨라이트는 퇴적면에서 상부로 성장하는 석회질 물질로 구성되어 있다. 따라서 인접한 스트로마톨라이트 돔이 성장하여 서로 연결되어 스트로마톨라이트 층을 이루게 되면 이미 단단한 구조가 되기 때문에 쇄설성 퇴적물과 같은 수분 증발에 의한 갈라짐 현상(예, 건열)은 일어나지 않는다. 호주 남부의 쿠롱 석호(Coorong Lagoon)에 발달한 스트로마톨라이트와 같이 아주 극심한 건조 환경에서 스트로마톨라이트 표면이 공기 중에 노출될 경우 표면이 갈라지는 현상이 관찰되기도 하는데(von der Borch, 1976), 이러한 경우에도 문곡리 스트로마톨라이트에서 관찰되는 것과 달리 표면의 갈라진 틈은 돔 내부까지 연결되어 나타나지는 않는다.

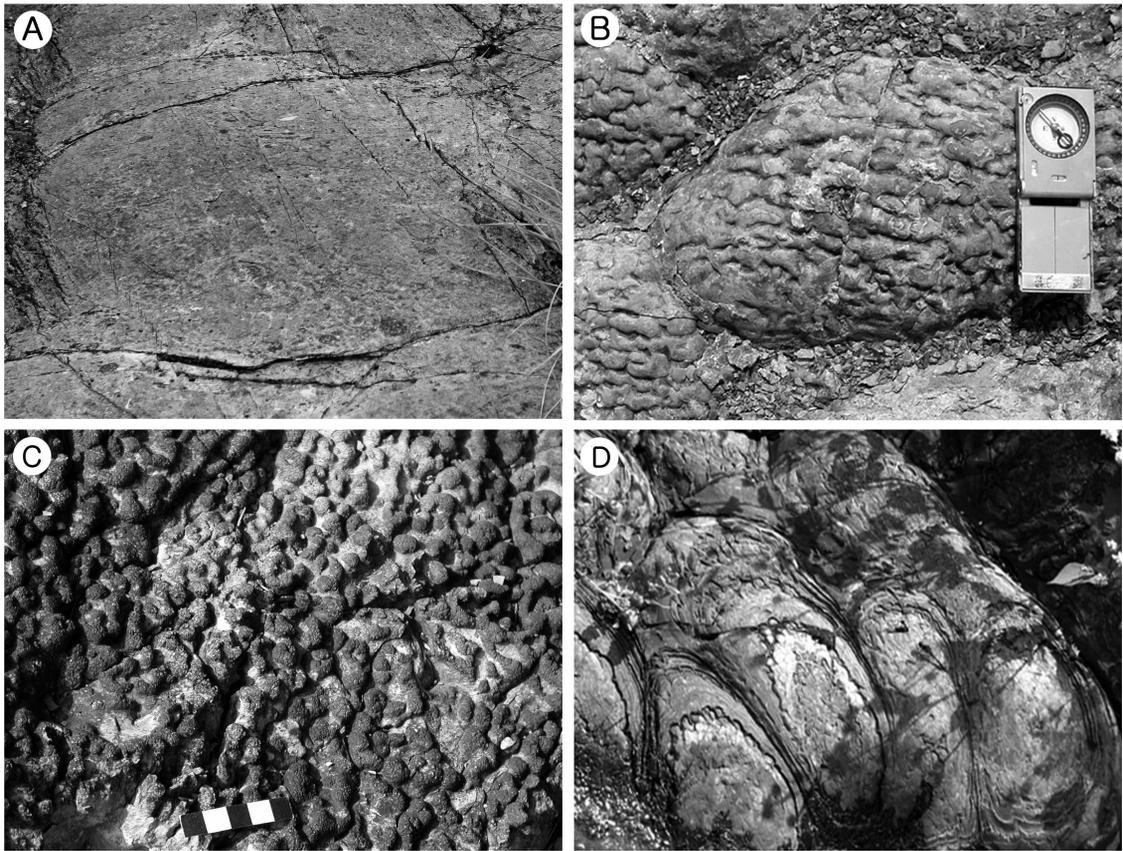
## 4.2 미세엽층리

미세엽층리는 스트로마톨라이트의 핵심 구성 요소이다(Park, 1976; Semikhatov *et al.*, 1979; Seong-Joo *et al.*, 2000). 따라서 미세엽층리가 나타나지 않는 어떠한 구조도 스트로마톨라이트로 불릴 수 없으며 모든 스트로마톨라이트는 외부 형태에 관계없이 내부에 잘 발달된 미세엽층리 구조를 보인다. 스트로마톨라이트의 미세엽층리 구조는 스트로마톨라이트를 형성하는 생물의 차이(coccoliths vs. filaments), 생물의 많고 적음(organic-rich layer vs. sediment-rich layer) 및 광물 성분의 차이(micrite vs. calcite)에 의해 암석의 단면이나 박편상에서 인지된다(Seong-Joo *et al.*, 2000).

야외에서 관찰한 문곡리 스트로마톨라이트에서는 스트로마톨라이트의 가장 중요한 특징인 미세엽층리 구조를 비롯해서 어떠한 내부 구조도 관찰되지 않으며, 단면은 마치 석회질이암(calcareous mud or marl)과 같은 괴상의 구조를 보인다(그림 4B). 또한 스트로마톨라이트가 산출되는 층준과 인접한 층준 어느 곳에서도 스트로마톨라이트의 유사 엽층리라고 판단될 수 있는 mm 크기의 구불구불한 엽층리인 cryptogalaminite 층도 관찰되지 않는다. 수직 단면의 박편관찰 결과 역시 미세엽층리의 어떠한 흔적도 관찰할 수 없으며 대부분은 세립의 미크라이트(micrite)와 미크로스파라이트(microsparite)로 이루어져 있고, 스타일로라이트(stylolite) 구조와 석영 맥 및 철산화물이 간혹 관찰될 뿐이다(그림 4C).

## 5. 토의: 문곡리 스트로마톨라이트의 해석

천연기념물 제413호인 “문곡리 스트로마톨라이트”의 외부 형태는 인접한 돔들이 연결되어 형성된 LLH 스트로마톨라이트와 유사하다. 하지만 스트로마톨라이트의 핵심요소인 미세엽층리 구조가 관찰되지 않고, 외부 형태 또한 일반적인 스트로마톨라이트의 모습과는 거리가 멀다. 문곡리 스트로마톨라이트의 이러한 특징(미세엽층리 구조와 돔의 연장성 결여, 매끈한 표면구조 및 표면에 발달한 틈 구조 등)들은 이곳의 스트로마톨라이트가 알려진 것과는 달리 스트로마톨라이트가 아닌 다른 형태의 퇴적구조임을 시사한다. 따라서 “문곡리 스트로마톨라이트”의 명칭에 대한 재검토가 요구된다.



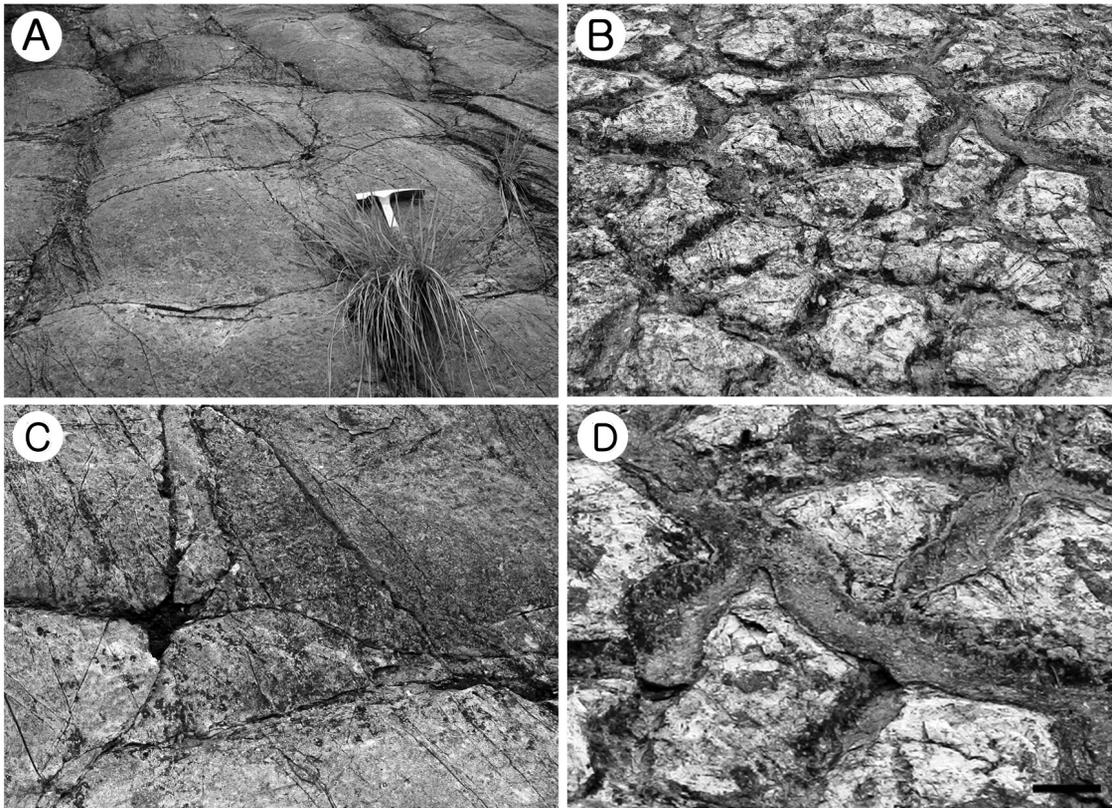
**Fig. 5.** Comparison of a surface structure between Mungokri Stromatolite and most domal stromatolites. Surfaces of normal stromatolites are characterized by wavy ridges (B) and micro-domes (C), while the surface of Mungokri Stromatolite (A) is smooth. B, C and D are pictures from Gyeongsang Basin stromatolites.

문곡리 스트로마톨라이트와 같이 미세엽층리가 관찰되지 않으면서 수평으로 연결된 돔의 형태와 유사한 구조로는 쓰롬볼라이트(thrombolite), 건열(desiccation crack), 바이오협(bioherm), 슈도모프 팬(pseudomorph fan), 알갈마운드(algal mound) 또는 머드마운드(mud mound) 등이 있다.

### 5.1 쓰롬볼라이트(Thrombolite)

스트로마톨라이트와 동일한 생성기작과 외부 형태를 띠고 있지만 미세엽층리가 발달되지 않은 구조를 쓰롬볼라이트라 부른다(Aitken, 1967). 스트로마톨라이트의 경우 미세엽층리 구조는 스트로마톨라이트를 형성하는 박테리아에 의해 결정된다. 즉, 미세엽층리 구조는 스트로마톨라이트를 실질적으로 성장시키는 유기매트(algal or microbial mat)

에 사상체 박테리아와 구형 박테리아가 교호되면서 성장하는 경우에, 또는 광합성에 의한 사상체 박테리아의 석회광물 침전의 정도가 다르거나 사상체 박테리아의 분포(prostrate vs. vertical)가 다른 경우에 형성된다(Seong-Joo and Golubic, 1999; Seong-Joo *et al.*, 2000). 반면 구형 박테리아만이 스트로마톨라이트를 형성할 경우 돔의 구조는 유지되지만 미세엽층리는 형성되지 않고 대신 구형 박테리아의 혼적인 "반점 구조(clotted structure)"가 불규칙하게 형성된다(Kennard and James, 1986; Riding, 1991). 간혹 이러한 반점 구조를 생물체(endopsammic fauna)의 생교란 작용으로 미세엽층리 구조가 교란되어져서 형성된 것으로 해석하여, 쓰롬볼라이트를 스트로마톨라이트의 변형으로 보는 학자들도 있다(Hofmann, 1973; Walter and



**Fig. 6.** Mungokri Stromatolite and mud cracks of the Natural Monument No. 413. Both stromatolite domes (A) and mud cracks (B) are similar in having polygonal cracks, but differ from each other in infilling sediments. (C) and (D) are close views of (A) and (B), respectively. Scale bar in (D) is 5 cm.

Heys, 1985).

문곡리 스트로마톨라이트에서는 야외와 박편상에서 어떠한 반점 구조도 관찰되지 않는다. 따라서 미세엽층리 구조 없이 돔의 형태를 띠는 것이 쓰롬볼라이트와 매우 유사하더라도 문곡리 스트로마톨라이트를 쓰롬볼라이트로 해석할 수는 없다.

## 5.2 건열(desiccation crack)

문곡리 스트로마톨라이트의 돔과 돔 사이에서는 건열과 유사한 다각형 구조의 틈이 발달되어 있으며 전체적인 모습 또한 건열과 유사하고 매우 근접한 층준에서 건열 구조가 넓게 분포하고 있어 문곡리 스트로마톨라이트를 건열로 해석할 수도 있다(그림 6). 하지만 일반적으로 쇄설성 퇴적암에서 나타나는 건열 구조는 쇄설물이 수축하면서 갈라진 다각형의 모서리들이 들어 올려 지기 때문에 사발(bowl)이나 평평한 형태(속하작용에 의한 압력의 영향으로)

보존되는 것이 일반적인 현상이다. 이 지역에서 나타나는 건열들도 이러한 형태를 띠는(그림 6B, D) 반면 문곡리 스트로마톨라이트는 볼록한 형태로 보존되어 있기 때문에 다각형의 틈이 있음에도 불구하고 건열로 해석하기는 어렵다.

건열의 경우는 퇴적물이 고화되기 전에 수축되어 다소 규칙적인 다각형의 모습으로 갈라진다. 시간이 지나면 다각형의 틈 사이를 성분이 다른 퇴적물이 채우게 되어 이 지역의 건열과 같이 다각형의 틈이 퇴적물로 채워지는(그림 6B, D) 반면 문곡리 스트로마톨라이트에 발달된 틈에서는 퇴적물이 관찰되지 않고 갈라진 다각형도 매우 불규칙하다(그림 6 A, C). 문곡리 스트로마톨라이트에 발달된 갈라진 틈들 또한 마치 면도칼로 그어놓은 것과 같이 얇고 불규칙하게 발달되어 수축에 의한 갈라짐으로 해석할 수는 없다.

### 5.3 바이오협(bioherm)

바이오협은 패각을 가진 저서성 고착생물(예, 산호, 스트로마토포로이드, 석회조류 등)들이 인접한 지역보다 많고 성장이 빨라 돔처럼 부풀어 올라 형성되는 구조를 포괄적으로 나타내는 명칭이다(Cummings, 1930). 따라서 대부분의 바이오협을 야외 및 박편에서 관찰하면 이러한 생물의 흔적이 화석으로 남아 있다. 그러나 문곡리 스트로마톨라이트의 야외 관찰 결과와 박편에서는 어떠한 화석의 구조나 흔적도 발견되지 않기 때문에 문곡리 스트로마톨라이트를 바이오협이라 부르기에는 적합하지 않다.

### 5.4 슈도모프팬(pseudomorph fan)

슈도모프팬은 석회질 광물(특히 아라고나이트)이 층리면에서 위쪽으로 성장하면서 내부에 부채모양의 방사상 구조(fan)가 나타나고 성장이 지속되어 규모가 커지면서 반구형 돔의 형태를 이루는 것을 나타내는 용어이다(Seong-Joo and Golubic, 1999; Sumner and Grotzinger, 2000; Winefield, 2000). 석회암이 침전되는 환경에서 결정핵을 중심으로 아라고나이트 결정들이 방사상으로 자라 팬을 형성하게 된다. 성장을 지속하면서 팬은 스트로마톨라이트와 유사한 형태의 반구형 돔을 만들고 인접한 팬들과 연결되어 팬으로 이루어진 하나의 층을 형성하게 되어 문곡리 스트로마톨라이트와 유사한 형태를 띠게 된다. 특히 남아프리카의 Transvaal 누층군에 넓게 분포하는 슈도모프팬(Sumner and Grotzinger, 2000)은 외부 형태가 문곡리 스트로마톨라이트와 매우 흡사하여 동일 구조로 해석하기 쉽다. 하지만 Transvaal 누층군의 경우처럼 슈도모프 팬의 단면에서는 언제나 방사상 구조가 특징적으로 나타나는데 문곡리 스트로마톨라이트의 단면에서는 미세엽 층리 구조뿐만 아니라 어떠한 방사상 구조도 발견되지 않는다(그림 4B). 따라서 형태는 슈도모프 팬과 유사하지만 문곡리 스트로마톨라이트를 슈도모프 팬으로 해석할 수는 없다.

### 5.5 머드마운드(mud mound)

머드마운드는 평평한 층리면위에 불룩하게 솟아 있는 돔의 구조로서 대부분이 석회질 이암(calcareous or lime mud) 또는 미크라이트로 이루어져 있고 층리가 발달되지 않은 구조를 지칭하는 용어이다(Cuffey,

1985). 하지만 이 용어는 외부 형태인 “mound”와 내부 성분인 “mud”만을 서술하기 때문에 다양한 구조에 다소 포괄적으로 사용되며 엄밀하게 적용되지는 않는다. 예를 들어 Pratt(1995)는 다양한 화석이 발견된 생물초(reef)를 머드마운드로 설명하였고, Roylance(1990)은 화석은 적게 산출되었지만 매우 비슷한 구조를 알갈마운드(algal mound)로 명칭하였으며, 때로는 바이오협과도 혼용되어 사용되기도 한다[algal mound(Roylance, 1990) vs. algal bioherm(Riding, 1979)].

일반적으로 마운드 구조는 패각을 가진 다양한 생물체에 의하여 형성되기 때문에 마운드 형태의 구조에서 다양한 화석이 발견된다면 바이오협 또는 생물초라 부르는 것이 보다 합리적이고(마운드를 사용해도 되지만), 석회질 조류 화석이 우세하게 발견된다면 알갈바이오협 또는 알갈마운드로 부르는 것이 타당하다. 화석의 산출이 극히 드문 경우에는(속성 작용에 의하여 마운드를 형성했던 생물체의 흔적이 지워졌다 하더라도) 알갈(algal)이나, 초(reef), 바이오협 등의 어떠한 용어도 사용할 수 없으며 단지 “머드마운드”만이 사용되어야 한다. 마운드의 형태를 띤 “문곡리 스트로마톨라이트”는 층리가 발달되어 있지 않고 미크라이트가 주요 구성 성분이며 어떠한 화석도 관찰되지 않는다(그림 4). 따라서 문곡리 스트로마톨라이트는 “머드마운드”로 해석하는 것이 가장 타당하다.

얇은 바다나 고여 있는 물의 퇴적면 위에는 얇은 막 형태의 매트(algal or microbial mat) 또는 바이오필름(biofilm)이라고 불리는 유기층이 형성된다(eg., Stolz, 2000). 시간이 흐르면 매트들은 성장하여 다른 곳보다 다소 부풀어 오른 모양을 갖게 되며 부풀어 오른 매트들은 끈적끈적한 점액질을 가지고 있기 때문에 매트위에 떨어지는 쇄설성 입자들을 부착하거나 석회질 광물질의 침전을 촉진시켜 돔을 키우게 된다. 특히, 퇴적물의 공급이 대단히 적은 석호나 작은 웅덩이(supratidal pool) 같은 환경에서 매트가 형성되고 매트를 구성하는 생물체들이 석회질 조류가 아닌 광합성 박테리아일 경우에는 석회질 이암으로 구성된 돔 구조를 만들게 된다. 매트를 구성하는 박테리아는 광합성을 하면서 성장하여 매트를 키우게 되고, 이 결과 매트위의 물은 pH가 상승하여 미크라이트의 원인 물질인 와이팅(whiting: float-

ing patches of lime mud)이 만들어진다(Bathurst, 1971; Boardman and Carney, 1991). 물속에서 순간적으로 형성된 와이팅은 매트위에 떨어져서 부착되어 매트와 돔 구조를 키우게 되며 결과적으로 미세엽층리 없이 마이크로이트로만 구성된(화석도 발견되지 않고) 문곡리 스트로마톨라이트와 같은 괴상의 돔 구조를 만들게 된다.

또한 매트위에 퇴적물이 덮여 적당한 시간이 흐르면 매몰된 박테리아 유기물은 부패하여(따라서 화석으로 관찰되지 않는다) 다량의 가스를 만들게 된다(Ward *et al.*, 1984). 형성된 가스들은 압력에 의하여 덮고 있는 퇴적층을 들어 올리면서 배출되게 되는데, 이때 돔의 모양을 좀 더 완성 시키게 되고(Gerdes *et al.*, 2000) 가스를 배출하는 과정에서 돔 사이에 문곡리 스트로마톨라이트와 같이 아주 얇은 틈(그림 4 A, C)이 형성되고 이 틈 사이로 가스가 배출된다. 이러한 틈 구조는 일면 건열과 유사하나 틈의 사이가 매우 적고 이미 고화된 암석이기 때문에 건열의 경우처럼 틈사이로 퇴적물이 채워지지는 않는다. 또한 가스가 만들어낸 틈들의 다각형 구조는 건열과 달리 문곡리 스트로마톨라이트처럼 불규칙하다.

## 6. 결론

1. 영월군 북면 문곡리 남교 하천변 절벽에 분포하는 소위 “영월 문곡리 스트로마톨라이트”는 보존상태가 양호하고 멀리서도 관찰할 수 있을 정도로 규모가 커서 2000년 3월에 천연기념물 제413호로 지정되어 관리되고 있다(천연기념물 제413호 영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트).
2. 천연기념물 제413호는 반구형 스트로마톨라이트가 연속되어 나열된 LLH 형태의 스트로마톨라이트(laterally-linked hemispheroid)와 유사하나, 돔 구조의 연속성이 관찰되지 않고 표면구조와 갈라진 틈의 형태가 일반적인 스트로마톨라이트와 다르며, 특히 스트로마톨라이트의 핵심 구성 요소인 미세엽층리 구조가 관찰되지 않기 때문에 스트로마톨라이트로 볼 수 없다.
3. 문곡리 스트로마톨라이트의 형태적 특징과 내부 구조는 이곳의 스트로마톨라이트가 알려진 것과 달리 스트로마톨라이트가 아닌 다른 형태의 퇴적

구조임을 지시하고 있고, 관찰된 특징들로 미루어 머드마운드로 해석된다.

4. 따라서 기존의 스트로마톨라이트라는 명칭에 대한 재검토가 요구된다. 하지만 문곡리 스트로마톨라이트가 천연기념물 제413호에서 배제되어야함을 의미하지는 않는다. 천연기념물 제413호는 명칭과 관계없이 규모가 크고 보존상태가 매우 우수하여 보존되어야할 가치가 충분하기 때문이다.

## 사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소의 「2008년 고생대 미화석산지 연구」 및 「2009 천연기념물 화석산지 연구(NRICH-0910-A09F-1)」에 의해 수행되었다. 이 연구를 수행하는 과정에서 많은 도움을 준 국립문화재연구소의 최돈원박사와 김태형 연구원, 그리고 심사과정에서 세심한 검토와 지적으로 논문의 질을 높여주신 서대문 자연사박물관의 이의형 박사와 익명의 심사자에게 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 공달용, 김태형, 남상찬, 임종덕, 2008, 천연기념물 화석산지 모니터링 Data sheet 개발, 고생물학회지, 24, 21-33.
- 김옥준, 이하영, 이대성, 윤석규, 1973, 남한 대석회암통의 층서와 지질구조. 광산지질, 6, 81-114.
- 김태숙, 1998, 소청도의 상원계에서 산출되는 스트로마톨라이트에 관한 연구. 한국국원대학교 석사학위, 85 p.
- 문화재청, 2008, 문화재관계법령집. 541 p.
- 이광춘, 1992, 백악기 경성분지 내 반야월층, 화산층 및 신앙동층에서 산출되는 스트로마톨라이트와 탄산염암의 속성작용. 고려대학교 박사학위 논문, 124 p.
- 이동진, 유찬민, 1993, 영흥층에서 산출된 스트로마토포로이드 화석. 고생물학회지, 9, 131-142.
- 이성주, 2008, 고생대 미화석산지 연구 보고서. 국립문화재연구소, 146 p.
- 정창희, 이돈명, 유양수, 강기우, 1979, 한국지질도 1:50,000 평창, 영월 도폭. 자원개발연구소, 19 p.
- 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. and Riding, R., 1988, Role of algal eukaryotes in subtidal columnar stromatolite formation. Proceeding of National Academy Science of USA, 85, 1327-1329.

- Bathurst, R.G.C., 1971, Carbonate Sediments and Their Diagenesis: Developments in Sedimentology 12, New York, Elsevier, 658 p.
- Burne, R.V. and Moore, L.S., 1987, Microbialites: organo-sedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios*, 2, 241-254.
- Campbell, S.E., 1979, Soil stabilization by a prokaryotic desert crust: implications for Precambrian land biota. *Origins Life*, 9, 335-348.
- Castenholz, R.W., 1984, Composition of hot spring microbial mats: a summary. In: Cohen, Y, Castenholz, R.W. and Halvorson, H.O. (eds.), *Microbial Mats: Stromatolites*. Alan R. Liss, INC., New York, 101-119.
- Choi, D.K., 1998, The Yongwol Group (Cambrian-Ordovician) redefined a proposal for the stratigraphic nomenclature of the Choson Supergroup. *Geosciences Journal*, 2, 220-234.
- Chung, G.S., 2007, The Upper Cambrian Wagok Formation and the Lower Ordovician Mungok Formation in Buk-myon, Yeongwol, Korea. In: Lee, C.Z. *et al.* (eds.), *Fieldtrip guidebook for the first international earth science olympiad*. Korean Earth Science Society, Seoul, Korea, 19-30.
- Clough, J.G. and Goldhammer, R.K., 2000, Evolution of the Neoproterozoic Katakaturuk Dolomite ramp complex, northeastern Brooks Ranges, Alaska. In: Grotzinger, J.P. and James, N.P. (eds.), *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian Worlds*, *SEPM*, 67, 209-241.
- Cuffey, R.J., 1985, Expanded reef-rock textural classification and the geologic history of bryozoan reefs. *Geology*, 13, 307-310.
- Cumings, E.R., 1930, List of species from the New Corydon, Kokomo and Kenneth formations of Indiana, and from reefs in the Mississinewa and Lisron Creek formations. *Indiana Academy of Science Proceedings*, 39, 204-211.
- Ford, T.D. and Pedly, H.M., 1996, A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Sciences of Review*, 41, 117-175.
- Gerdes, G., Krumbein, W.E. and Noffke, N., 2000, Evaporite microbial sediments. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 198-208.
- 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.
- Hoffman, P., 1976, Stromatolite morphogenesis in Shark Bay, Western Australia. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 261-271.
- Hofmann, H.J., 1973, Stromatolites: characteristics and utility. *Earth Science Reviews*, 9, 339-373.
- Hofmann, H.J., 1976, Stromatoid morphometrics. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 45-54.
- Jones, B., Renaut, R.W. and Rosen, M.R., 1997, Biogenecity of silica precipitation around geysers and hot spring vents, North Island, New Zealand. *Journal of Sedimentary Research*, 67, 88-104.
- Jones, B., Renaut, R.W. and Rosen, M.R., 1998, Microbial biofacies in hot spring sinters: a model based on Ahaaki Pool, North Island, New Zealand. *Journal of Sedimentary Research*, 68, 413-434.
- Kennard, J.M. and James, N.P., 1986, Thrombolites and stromatolites: two distinct types of microbial structures. *Palaios*, 1, 492-503.
- Klappa, C.F., 1979, Lichen stromatolites: criterion for sub-aerial exposure and a mechanism for the formation of laminar calcretes (caliche). *Journal of Sedimentary Petrology*, 49, 387-400.
- 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 coc-coid cyanobacterium associated with the formation of desert stromatolites. *Sedimentology*, 26, 593-604.
- Krylov, I.N., 1976, Approaches to the classification of stromatolites. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 31-43.
- Logan, B.W., Rezak, R. and Ginsburg, R.N., 1964, Classification and environmental significance of and stromatolites. *Journal of Geology*, 72, 68-83.
- Park, R.K., 1976, A note on the significance of lamination in stromatolites. *Sedimentology* 24, 379-393.
- Paik, I.S., Woo, K.S. and Chung, G.S., 1991, Stratigraphic, sedimentologic and paleontologic investigation of the Paleozoic sedimentary rocks in Yeongweol and Gabsan areas: depositional environments of the Lower Ordovician Mungok Formation in the vicinity of Yeongweol. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 357-370.
- Parker B.C., Simmons, G.M.Jr., Love, F.G., Seaburg, K.G. and Wharton, R.A.Jr., 1981, Modern stromatolites in Antarctic Dry Valley lakes. *Bioscience*, 31, 656-661.
- Parker B.C. and Wharton, R.A.Jr., 1985, Physiological ecology of bluegreen algal mats (modern stromatolites) in Antarctic oasis lakes. In: Golubic, S., Komarek, J. and Lhotsky, D. (eds.), *Cyanophyta (Cyanobacteria): morphology, taxonomy, ecology*. *Arch Hydrobiology Supplement* 71, 331-348.
- Pedly, M., 2000, Ambient temperature freshwater micro-

- bial tufas. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 179-186.
- Petrov, P.Yu., 1996, Model of stromatolites morphogenesis. *Lithology and Mineral Resources*, 31, 229-239.
- Pratt, B.R., 1995, The origin, biota and evolution of deep-water mud-mounds. *Special Publication of International Association of Sedimentology*, 23, 49-123.
- Preiss, W.V., 1976, Basic field and laboratory methods for the study of stromatolites. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites: Development in Sedimentology* 20, Elsevier, Amsterdam, 5-20.
- Riding, R., 1979, Origin and diagenesis of lacustrine algal bioherm at the margin of the Reis crater, Upper Miocene, southern Germany. *Sedimentology*, 26, 645-680.
- Riding, R., 1991, Classification of microbial carbonates. In: Riding, R. (ed.), *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, Berlin, 21-51.
- Roylance, M.H., 1990, Depositional and diagenetic history of a Pennsylvanian algal-mound complex: Bug and Pappose Canyon Fields, Paradox Basin, Utah and Colorado. *The American Association of Petroleum Geologists*, 74, 1087-1099.
- Semikhatov, M.A. and Raaben, M.E., 2000, Proterozoic stromatolite taxonomy and biostratigraphy. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 295-306.
- 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. In: Grotzinger, J.P. and James, N.P. (eds.), *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian Worlds*, SEPM, 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.
- Southgate, P.N., 1989, Relationships between cyclicity and stromatolite form in the Late Proterozoic Bitter Springs Formation, Australia. *Sedimentology*, 36, 323-339.
- Stolz, J.F., 2000, Structure of microbial mats and biofilms. In: Riding, R. and Awramik, A. (eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 1-8.
- Sumner, D.Y. and Grotzinger, J.P., 2000, Late Archean aragonite precipitation: petrography, facies associations, and environmental significance. In: Grotzinger, J.P. and James, N.P. (eds.), *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian Worlds*, SEPM, 67, 123-144.
- Thraillkill, J., 1976, Speleothems. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 73-86.
- von der Borch, C.C., Stratigraphy of stromatolite occurrences in carbonate lakes of the Coorong Lagoon area, South Australia. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 413-420.
- Walter, M.R., 1976, Introduction. In: Walter, M.R. (ed.), *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam, 1-3.
- Walter, M.R. and Heys, G.R., 1985, Links between the rise of the metazoa and the decline of stromatolites. *Precambrian Research*, 29, 149-174.
- 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.
- Ward, D.M., Beck, E., Revsbech, N.P., Sandbeck, K.A. and Winfrey, M.R., 1984, Decomposition of hot spring microbial mats. In: Cohen, Y., Castenholz, R.W. and Halvorson, H.O. (eds.), *Microbial Mats: Stromatolites*. Alan R. Liss, New York, 191-214.
- Ward, D.M., Weller, R., Shiea, J., Castenholz, R.W. and Cohen, Y., 1989, Hot spring microbial mats: anoxygenic and oxygenic mat of possible evolutionary significance. In: Cohen, Y. and Rosenberg, E. (eds.), *Microbial Mats*. American Society of Microbiology, Washington, 3-15.
- Winefield, P.R., 2000, Development of Late Proterozoic aragonitic seafloor cements in the McArthur Group, Northern Australia. In: Grotzinger, J.P. and James, N.P. (eds.), *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian Worlds*, SEPM, 67, 145-159.
- Winsborough, B. and Golubic, S., 1987, Stromatolitic structures of inland waters built by diatoms. *Journal of Phycology*, 23, 195-201.
- Wright, V.P., 1989, Terrestrial stromatolites and laminar calcretes: a review. *Sedimentary Geology*, 65, 1-13.
- Yoo, C.M. and Lee, Y.I., 1997, Depositional cyclicity of the Middle Ordovician Yeungheung Formation, Korea. *Carbonates and Evaporites*, 12, 192-203.
- Yosimura, I., 1940, Geology of the Neietsu district, Kogendo, Tyosen. *Journal of the Geological Society of Japan*. 47, 112-122.

---

투 고 일 : 2009년 10월 7일

심 사 일 : 2009년 10월 8일

심사완료일 : 2009년 11월 26일