

<Short Note>

천연기념물 제413호 영월 문곡리 “스트로마톨라이트”의 성인에 대한 예비연구: 비생물기원 구조일 가능성에 대한 논의

이정현

충남대학교 지질환경과학과

요 약

조선누층군 영월층군 영흥층 하부(중기 오르도비스기)에서 나타나는 천연기념물 제413호 “영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트”는 스트로마톨라이트에서 특징적으로 나타나는 위로 볼록한 엽층리 구조를 보이지 않아 스트로마톨라이트라는 명칭을 부여하는 데 문제가 있다. Kong and Lee (2009)는 “문곡리 스트로마톨라이트”가 층리면 상부를 따라 울록볼록한 형태를 보여 외형상 LLH (laterally linked hemispheroid)형 스트로마톨라이트와 유사한 양상을 보이지만 그 구조 내부에 엽층리가 발달하지 않는다는 점을 근거로 이를 미생물암의 일종인 머드마운드로 해석해야 한다고 주장하였으나, 이들 역시 이 구조가 생물 기원이라는 증거는 제시하지 못하였다. 이 연구에서는 이 구조가 물리적인 퇴적 작용에 의해 형성되었을 가능성을 제기한다. 횡단면에서 아래쪽은 평평하고 위쪽은 볼록한 일반적인 스트로마톨라이트와는 달리 이 구조는 층리면 상부뿐만 아니라 하부 또한 울록볼록한 형태를 보인다. 비록 백운암화 작용에 의해 대부분의 일차퇴적구조는 지워졌으나, 박편 및 슬랩 관찰 결과 이 구조 내부에 침식면 및 상향세립화 구조가 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 연구 결과는 “문곡리 스트로마톨라이트”가 생물 기원이 아니라는 것을 지시하며, 물리적인 퇴적 작용에 의해 이 구조가 생성되었을 가능성을 시사한다. 따라서 이 연구 결과는 천연기념물과 같은 지질유산을 지정하기 앞서 자제 한 과학적인 연구가 필수적임을 시사한다.

주요어: 천연기념물 제413호, 문곡리 스트로마톨라이트, 비생물 기원

Jeong-Hyun Lee, 2020, A preliminary study on so-called “Mungokri stromatolite”, Natural Monument No. 413 of South Korea: possibility of abiotic origin. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 3, p. 365-373

ABSTRACT: “Yeongwol Mungokri stromatolite and dry structure”, designated as Natural Monument No. 413 of South Korea, occurs in the lower Yeongheung Formation (Middle Ordovician), Yeongwol Group, Joseon Supergroup. This structure lacks convex-upward lamination, which is the most characteristic feature of stromatolite. Kong and Lee (2009) showed that this “Mungokri stromatolite” shows dome-like geometry superficially resembling LLH-type stromatolite but lacks internal lamination, and suggested that this “stromatolite” should be re-named as mud mound, though they failed to present evidence of its biogenicity. This study suggests that the physical sedimentary process could have formed the “stromatolite”. In cross-section, this structure shows wavy geometry not only from the upper bedding surface but also lower bedding surface, which is different from other stromatolites that show flat bottom and a convex-upward upper surface. Although primary sedimentary structures were mostly obscured due to dolomitization, slab and thin section observation show erosive surfaces and fining-upward structures within the “stromatolite”. This result shows that the “Mungokri stromatolite” is not likely formed by the biogenic process, and probably resulted from the physical sedimentary process. This study, therefore, suggests the importance of detailed scientific study prior to the designation of geoheritage, such as natural monuments.

Key words: Natural Monument No. 413 of South Korea, Mungokri stromatolite, abiotic origin

(Jeong-Hyun Lee, Department of Geological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)

‡ Corresponding author: +82-42-821-6425, E-mail: jeonghyunlee@cnu.ac.kr

1. 서론

문화재보호법 제 2조는 “문화재는 인위적이거나 자연적으로 형성된 국가적·민족적 또는 세계적 유산으로서 역사적·예술적·학술적 또는 경관적 가치가 큰” 것이라고 정의하며, 여기에는 지형, 지질, 광물, 동굴, 생물학적 생성물 또는 특별한 자연현상이 포함된다. 이에 근거하여 천연기념물이 지정되었으며, 2020년 5월 현재 제559호까지 천연기념물이 지정되어 보호되고 있다. 이들 중 천연기념물 제413호로 지

정된 “영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트”는 “웅진 소청도 스트로마톨라이트 및 분바위(제508호)”, “경산대구가톨릭대학교 스트로마톨라이트(제512호)”와 함께 대한민국의 천연기념물로 지정된 3개소의 스트로마톨라이트 중 하나이며 이들 중에서도 가장 빠른 2000년 3월 16일에 지정되었다(그림 1). 그러나 이에 대한 학술적인 조사는 천연기념물 지정 이전에는 Choi and Woo (1993)가 영흥층의 퇴적 환경에 대한 연구를 진행하며 그 외형상의 특징을 바탕으로 미생물 매트(algal mat)라 기재한 것이

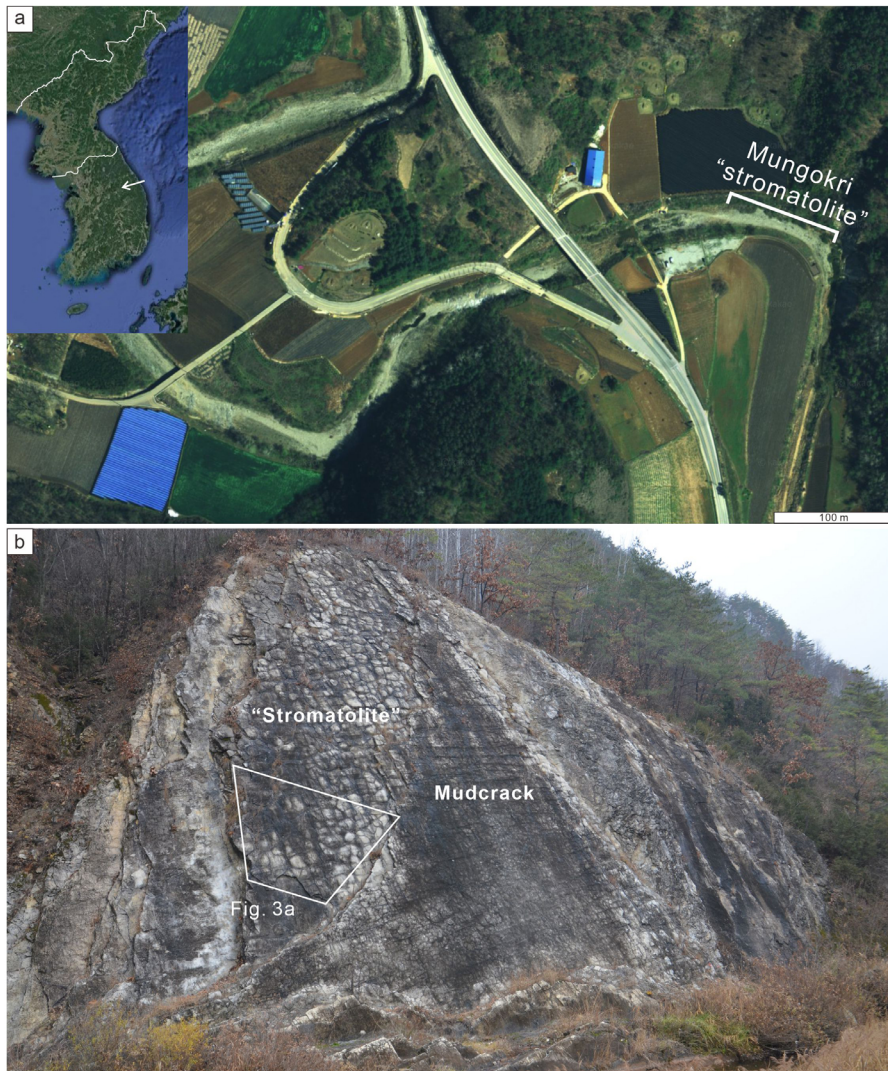


Fig. 1. (a) Satellite photograph of the Natural Monument No. 413 “Yeongwol Mungokri stromatolite and dry structure” (Kakao, 2019). (b) Outcrop photograph of the “Mungokri stromatolite”, developing along a cliff (37°15'23"N 128°25'59"E).

전부이며, 지정된 이후 Kong and Lee (2009)가 이에 대해 추가적인 조사를 시행하였다.

Kong and Lee (2009)는 문곡리 “스트로마톨라이트” 내부에 엽층리나 화석이 발견되지 않음을 근거로 이를 머드마운드라 해석하였다. 그러나 머드마운드는 주로 석회질 진흙(머드)로 구성된 생물 기원의 생물초(마운드)를 설명할 때 사용되는 단어로 이러한 해석을 하기 위해서는 생물 기원이라는 증거가 제시되어야 한다(Pratt, 1995). 그러나 지금까지 이 문곡리 “스트로마톨라이트”에서 생물 기원의 증거가 보고된 적은 없으며, 이들이 스트로마톨라이트라는 근거로는 외형상 LLH (laterally linked hemispheroid) 형 스트로마톨라이트(Logan *et al.*, 1964)와 유사하다는 점만 제시되었을 뿐이다(Choi and Woo, 1993; Kong and Lee, 2009).

이 예비연구에서는 문곡리 “스트로마톨라이트”에 대해 자세한 야외 기재 및 슬랩, 박편 관찰을 바탕으로 이 구조가 생물 기원이 아닐 가능성을 제기한다. 확답을 내리기 위해서는 추가적인 연구가 필요하나

관찰된 증거들은 이 구조가 물리적인 퇴적구조일 가능성을 제시하며, 따라서 이 구조를 생물학적으로 형성되는 스트로마톨라이트나 머드마운드라고 부르는 것에 대해서는 재고가 필요하다.

2. 지질학적 배경 및 연구 방법

강원도 영월군 일대에 널리 발달하는 조선누층군 영월층군은 고생대 캄브리아기 중기부터 오르도비스기 중기에 걸쳐 퇴적되었으며, 하부로부터 삼방산층, 마차리층, 외곡층, 문곡층, 영흥층으로 나뉜다(Choi, 1998)(그림 2). 이 연구의 대상인 문곡리 “스트로마톨라이트”는 층서적으로 영흥층의 하부에 나타난다(그림 2). 영흥층은 주로 석회암 및 백운암으로 구성되어 있으며, 얇은 조건대에서 조상대 환경에 걸쳐 퇴적된 것으로 해석된다(Paik and Lee, 1989; Choi and Woo, 1993; Yoo *et al.*, 1994; Yoo and Lee, 1997, 1998; Park *et al.*, 2017). 이 연구의 대상인 “스트로마톨라이트”가 나타나는 층준에서 약 1.7 m 위

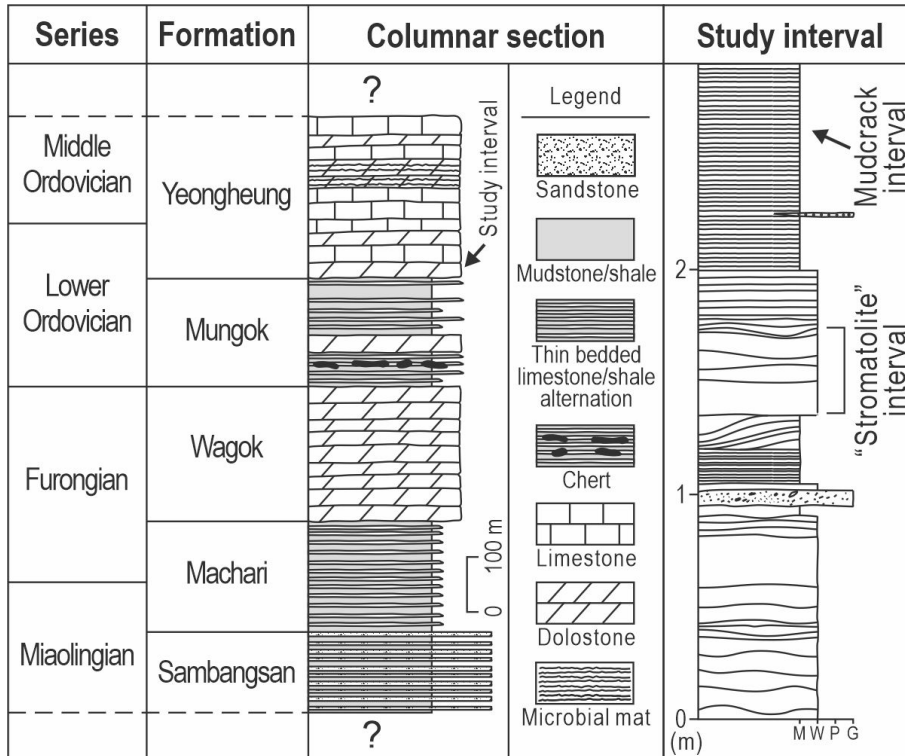


Fig. 2. Generalized stratigraphy of the Yeongwol Group (modified after Kwon, 2012 and Kim *et al.*, 2014) and detailed sedimentological log of the study interval. M: mudstone, W: wackestone, P: packstone, G: grainstone.

에 함께 천연기념물로 지정된 건열이 발달하므로 이 구조 또한 얇은 조간대에서 조상대 환경에서 생성되었으리라 생각된다.

영흥층에서는 화석이 잘 나타나지 않아 생층서적 연구가 거의 이루어지지 않았으나, 삼엽충 *Basiliella*와 actinoceratoid 두족류(Kobayashi, 1966), 코노돈트 *Plectodina* (Lee, 1979) 등의 산출을 근거로 오르도비스기 중기(late Darriwilian)에 퇴적되었을 것으로 생각된다. 영흥층 중상부에서 나타나는 층공충(stromatoporoid) 생물초도 이를 지지한다(Lee and Yu, 1993; Kano *et al.*, 1994; Hong *et al.*, 2017; Jeon *et al.*, 2017).

이 연구의 대상인 “문곡리 스트로마톨라이트”는 강원도 영월군 북면의 연덕천 동쪽 절벽 일대에 발달한 높이 13.5 m, 폭 16 m 규모의 층리면에서 나타난다(그림 1). 이 구조의 수직 단면은 부분적으로만 관찰할 수 있으며 야외에서 이를 자세히 기재하고 주상도를 작성하였다. 또한 문화재청의 허가를 받아 해당 암석을 일부 채취하고 이를 층리에 수직 방향으로 절단하여 슬랩 및 박편을 제작하였다. 이렇게 제작한 슬랩 및 박편을 디지털카메라 및 현미경으로 촬영하여 그 내부 구조를 관찰하였다. 다만, 문화재청에서 암석 샘플을 소량(500 g 내외)만 채취하도록, 그나마도 전석 위주로 채취하도록 한정적으로만 허가하여 “문곡리 스트로마톨라이트”의 성인을 충분히 연구하지 못했기에 향후 추가 연구가 필요하다.

3. “문곡리 스트로마톨라이트”의 특징

노두상에서 “문곡리 스트로마톨라이트”는 지름 20-80 cm (주로 40-60 cm) 크기의 매우 낮은(1-5 cm)

돔 구조들이 층리면을 따라 연속적으로 발달하는 특성을 보인다(그림 3). 이 돔들은 층리면상에서 원형에서 사각형의 형태로 발달하며, 돔 구조 사이에는 직교하는 균열이 나타난다(그림 3a, 4a). 이 균열들은 서로 평행한 양상을 띠며, 표면에만 나타나고 돔 내부까지 연장되는 경우는 관찰되지 않는다. 충분한 양의 샘플을 채취하지 못하여 균열의 성인에 대해서는 파악할 수 없었으나, 이 균열이 “스트로마톨라이트”의 상하위에 위치하는 퇴적체의 형태(geometry)에는 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 돔의 분포 양상은 규칙적으로 격자 형태를 띠며, 그 이외에 특별한 방향성은 나타나지 않는다.

수직 단면에서 이 “스트로마톨라이트”는 가운데가 볼록하고 가장자리로 갈수록 그 두께가 가늘어지며, “스트로마톨라이트”의 중심부를 기준으로 그 상위 및 하위 경계면이 대칭적인 형태를 띤다(그림 4). 두꺼운 부분은 7-12 cm 정도의 두께를 가지며, 얇은 부분은 4 cm 내외이다. 수직 단면에서 관찰할 수 있는 특징은 일견 구조지질학적으로 인장력을 받아 형성되는 부딘 구조(boudinage structure) 또는 퇴적물 내에서 광물이 침전되어 생성되는 단괴 구조(nodule)와 유사한 형태를 띤다.

“문곡리 스트로마톨라이트”는 백운암으로 구성되어 있으며, 노두 상에서 일차퇴적구조는 거의 관찰되지 않는다(그림 5). 그러나 슬랩 및 박편을 자세히 관찰하면 “스트로마톨라이트” 내부에 아래쪽으로 볼록한 날카로운 경계면들이 반복적으로 나타나며, 이 경계면들을 따라 상향세립화를 보이는 점이 층리를 확인할 수 있다(그림 5e-5g). 아래쪽으로 볼록한 경계면에서 가장 아래쪽에 해당하는 부분에는

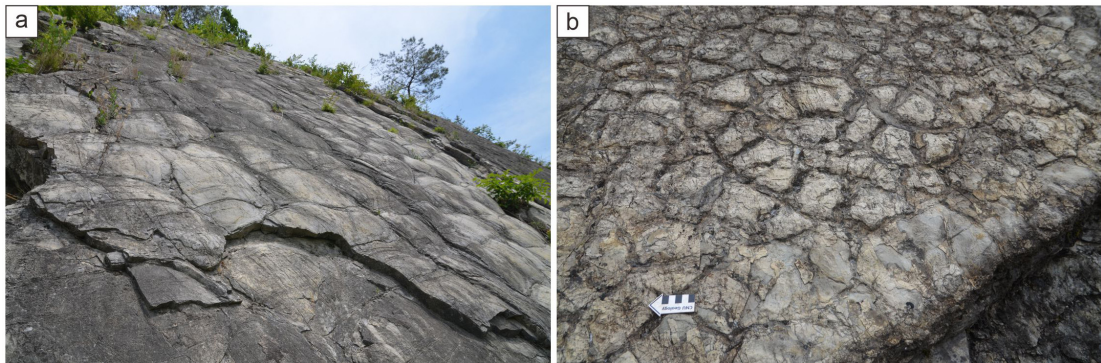


Fig. 3. Photos showing the bedding plane of (a) low-relief dome-shaped “stromatolites” and (b) mud cracks.

주위보다 굽은 크기의 입자들이 나타난다.

4. “문곡리 스트로마톨라이트”의 기원에 대한 해석

“문곡리 스트로마톨라이트”가 나타나는 노두를 처음으로 기재한 것은 Choi and Woo (1993)으로,

이들은 “스트로마톨라이트”가 나타나는 절벽부터 시작하여 서쪽으로 두께 280 m 상당의 영흥층 노두를 기재하였다(Choi and Woo, 1993, fig. 4). 이들은 “문곡리 스트로마톨라이트”를 미생물 매트(algal mat)라 기술하였으며(Choi and Woo, 1993, fig. 5c), 층서적으로 상위에 나타난다고 기재한 LLH형 스트로마톨라이트(Choi and Woo, 1993, fig. 7d)와

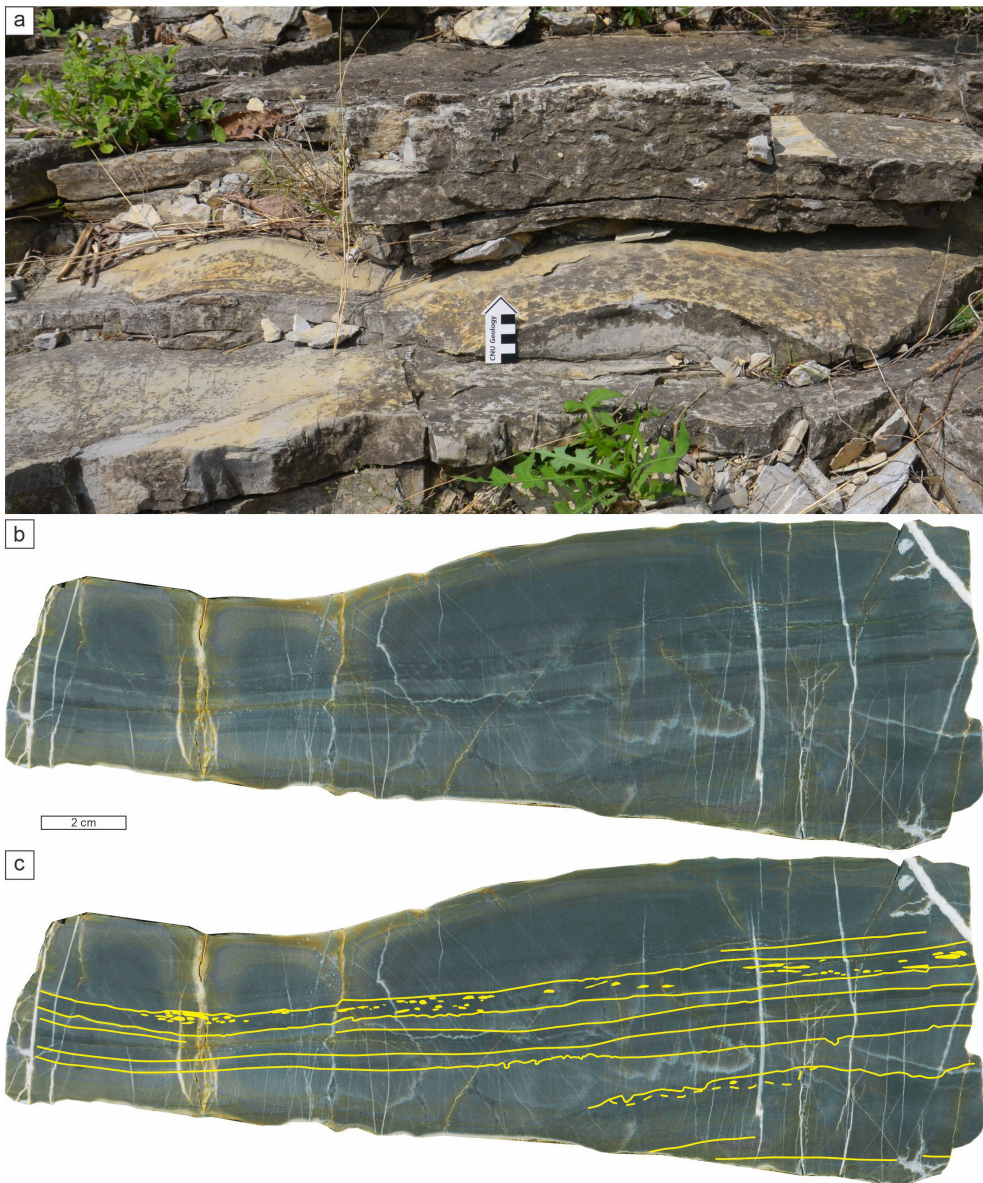


Fig. 4. Details of the “Mungokri stromatolite”. (a) Transverse section showing low-relief “boudin-like” shapes. (b) Slab of the “stromatolite” and (c) its interpretative sketch. The “stromatolite” is thicker in the center. Layers within the “stromatolite” are generally parallel to the upper bedding surface. Note occurrence of intraclasts.

는 구분하였다. 이는 처음 기재되었을 당시부터 “문곡리 스트로마톨라이트”가 일반적인 스트로마톨라이트와는 다르다고 인지되었다는 점을 지시한다. 이후 동일 노두에서 퇴적학적 연구를 진행하였던 후속

연구자들은 “문곡리 스트로마톨라이트”가 나타나는 절벽부터 층서적으로 상위에 해당하는 구간이 하천 퇴적물에 덮인 결과 그 상부만을 기재하였으며, “문곡리 스트로마톨라이트”는 별도로 기재하지 않

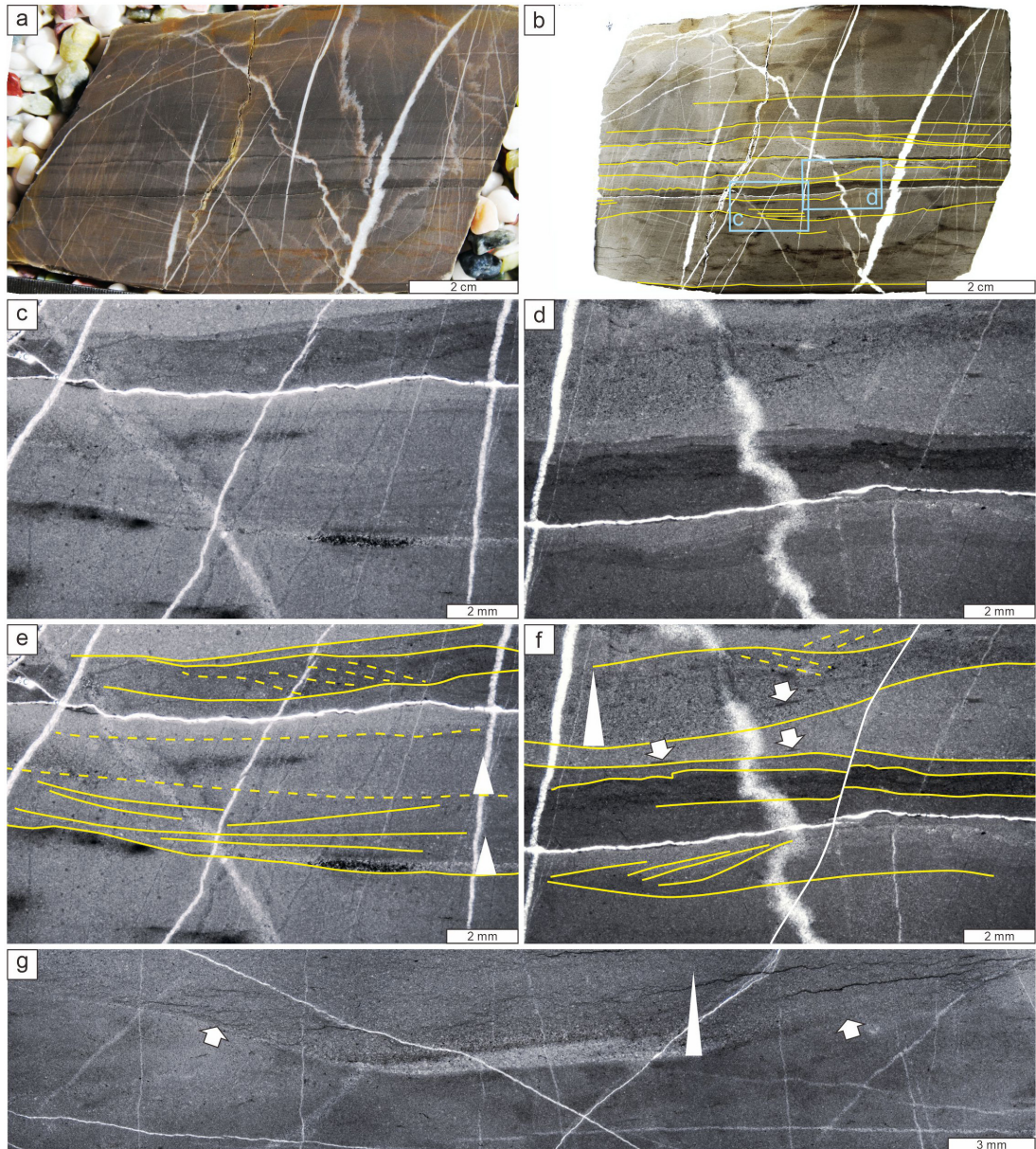


Fig. 5. Slabs and photomicrographs of the “Mungokri stromatolite”. (a) Slab and (b) thin section made from the same slab. Convex-downward surfaces filled with coarse grains are recognized. (c-g) Photomicrographs of the “Mungokri stromatolite” (c, d) and their interpretative sketches (e, f). Convex-downward erosive surfaces (yellow line) with cross-lamination are common. Dotted lines indicate structures that are not clear enough to give definite interpretation. Note occurrence of intraclasts in (f) (arrows) and fining-upward trend (white triangles). (g) A convex-downward erosive surface (arrows) with fining-upward trend.

았다(Park *et al.*, 2017, fig. 1d).

Kong and Lee (2009)의 고생물학적 연구에서는 “문곡리 스트로마톨라이트”를 층리면에 노출된 형상이 LLH형 스트로마톨라이트와 유사하나, “스트로마톨라이트의 핵심요소인 미세엽층리 구조가 관찰되지 않고, 외부 형태 또한 일반적인 스트로마톨라이트의 모습과는 거리가 멀”기 때문에 그 “명칭에 대한 재검토가 요구된다”고 하였다. 이 때문에 이들은 당시 “문곡리 스트로마톨라이트”를 “쓰롬볼라이트(thrombolite), 건열(desiccation crack), 바이오허름(bioherm), 슈도모프 팬(pseudomorph fan), 알갈 마운드(algal mound) 또는 머드마운드(mud mound)” 등과 비교하였으며, “층리가 발달되어 있지 않고 미크라이트가 주요 구성 성분이며 어떠한 화석도 관찰되지 않”기 때문에 “문곡리 스트로마톨라이트”를 머드마운드로 해석하는 것이 옳다고 기술하였다. 그러나 머드마운드는 생물에 의해 생성된 생물초(reef) 중 주로 석회질 진흙으로 이루어져 있으며 그 내부에 대형 생물의 화석이 거의 나타나지 않아 그 성인이 불분명한 것에 붙이는 용어로(Pratt, 1995), 생물에 의해 형성되었다는 것을 증명하기 어려운 “문곡리 스트로마톨라이트”에 사용하기에는 적합하지 않다.

수직단면에서 “문곡리 스트로마톨라이트”가 부딘 구조와 유사한 형태를 보이기 때문에 이를 퇴적 이후 구조적인 과정에 의해 변형된 것으로 해석할 수도 있다. 그러나 부딘 구조는 인장력을 받아 발달된 구조로, 이 경우 층리면에서 특정 방향으로 신장된 형태가 나타나야 하나(Goscombe *et al.*, 2004) 이러한 특징은 관찰할 수 없다. 또한 “스트로마톨라이트”의 상하위에 존재하는 퇴적체의 형태가 변형되지 않은 일차퇴적구조인 것으로 판단되므로 구조적인 원인에 의해 형성된 것이 아니라고 판단할 수 있다. 돛 상부에 나타나는 균열은 구조적인 영향을 받아 생겼을 가능성도 있으나, 이에 대해서는 구조지질학적 연구가 추가적으로 필요할 것이다. “문곡리 스트로마톨라이트”가 속성 과정을 통해 특정 층준을 따라 광물이 침전되어 생긴 단괴 구조일 가능성도 있으나, 이 경우에는 각각의 돛형 구조가 격자형으로 배열되어 있는 이유를 해석하기 어렵다.

이 연구 결과에서 확인할 수 있듯, “문곡리 스트로마톨라이트”의 내부에는 아래쪽으로 볼록한 날카로운 경계면, 즉 침식면과 침식면 상부에 놓이는 굽

은 입자들 및 그 위에 발달한 상향세립화 구조가 관찰되며, 이는 물의 흐름과 같은 물리적인 퇴적 과정에 의해 이 퇴적체가 생성되었을 가능성을 시사한다(그림 5). 그러나 물리적인 퇴적과정만으로 층리면에 뚜렷하게 나타나는 돛형 구조를 생성하기는 쉽지 않으며, 일반적으로는 방향성이 나타나는 구조가 생성되기 마련이다. 방향성이 없는 돛 형태를 형성하는 퇴적 구조로는 폭풍에 의해 생성된 파도와 해저면을 따라 흐르는 밀도류(density current)가 동시에 작용하여 형성되는 언덕사층리(hummocky cross-stratification) 구조가 있다. 언덕사층리 구조는 그 파장이 10 cm에서 수 미터에 달할 정도로 다양하며, 얇은 바다부터 깊은 바다까지 폭풍의 영향이 미치는 곳이라면 어디에서라도 나타날 수 있다(Cheel and Leckie, 1993). 현생 바다에서 언덕사층리는 수 미터 깊이 내외의 매우 얇은 바다에서도 생성된다는 점을 고려하면(Yang *et al.*, 2006), 그 상부 층준에 건열이 나타난다는 이유만으로 언덕사층리의 가능성을 배제하기는 어려울 것이다. 그러나 “문곡리 스트로마톨라이트”에서는 같은 지역에서 이보다 수백만 년 이전에 퇴적된 문곡층에 발달하는 언덕사층리 구조와 달리 하부침식면 위에 얇게 걸쳐진(drape-over) 엽층리 구조가 잘 확인되지 않는다(Paik and Lee, 1989). 경상남도 진주 일대에 발달하는 백악기 하산동층에서 보고된 고풍화면(paleoweathered surface)이 LLH형 스트로마톨라이트와 유사한 외형을 보이며 이를 “문곡리 스트로마톨라이트”에 비교할 수도 있으나, 이 경우에는 풍화에 의해 생성된 퇴적층 상부의 볼록한 층리면이 내부의 평행엽층리를 횡적으로 단절하며(Paik and Lee, 1994) 이러한 양상은 “문곡리 스트로마톨라이트”에서는 확인되지 않는다(그림 4). 이러한 해석의 문제는 백운암화 작용에 의해 “문곡리 스트로마톨라이트”의 내부 구조가 잘 보존되어 있지 않기 때문이며, 향후 충분한 양의 시료를 획득하여 추가 연구가 필요할 것이다.

5. 천연기념물 제413호 “문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트”의 문화재적 가치 및 명칭에 대한 토의 및 결언

강원도 영월군 북면 문곡리 언덕천 일대 절벽에 발달한 천연기념물 제413호 “영월 문곡리 건열구조

및 스트로마톨라이트”는 백운암화 작용 때문에 그 미세구조의 보존 상태가 불량하며, 연구가 부족한 상태에서 천연기념물로 지정되었다. 천연기념물로 지정된 부분 중 일부인 건열구조는 층리면에 수직으로 갈라져 있으며 위쪽은 넓고 아래쪽으로 갈수록 가늘어지고 틈새가 다른 퇴적물로 채워져 있다는 특징들을 종합적으로 고려해볼 때 전형적인 건열구조와 유사해 보인다. 다만 상대적으로 깊은 바다에서 미생물이 성장하는 과정을 통해서도 유사한 구조가 만들어질 수 있음을 고려할 필요는 있다(Lokier *et al.*, 2017). 그러나 건열구조와 달리 “문곡리 스트로마톨라이트”는 층리면에 나타난 구조만을 놓고 보면 LLH형 스트로마톨라이트와 유사하지만 그 내부 구조에는 생물 기원의 증거가 전혀 없으며, 생물학적인 작용이 아닌 물리적인 퇴적작용에 의해 형성되었을 가능성이 높아 그 명칭의 변경이 필요하다.

문화재청에서는 천연기념물 제413호 “영월 문곡리 건열구조 및 스트로마톨라이트”에 대해 “영월 문곡리의 건열구조 및 스트로마톨라이트는 당시의 퇴적환경을 잘 보여주고 있어 학술적 보존가치가 매우 크다”고 기재하고 있다(CHA, 2019). 이 설명에 따르면 “스트로마톨라이트”의 성인을 생물 기원이 아니라 재해석하더라도 이 노두를 천연기념물에서 해제할 이유는 되지 않는다. 따라서 Kong and Lee (2009)가 지적하였던 것과 마찬가지로 이 연구에서도 천연기념물 제413호는 그대로 유지되어야 함을 주장한다. 그러나 그 명칭은 반드시 변경할 필요가 있으며, 이는 “문곡리 스트로마톨라이트”가 생물 기원의 구조일 가능성이 낮고, 스트로마톨라이트라는 단어는 미생물에 의해 생성된 엽리를 갖는 구조만을 지칭하기 때문이다. 향후 자세한 연구를 통하여 이 “스트로마톨라이트”에 대한 성인을 과학적으로 해석하고 이를 바탕으로 천연기념물 제413호에 대한 합리적인 명칭 변경이 이루어져야 할 것이다.

이 논문에서는 상기한 연구 결과를 바탕으로 문화재청이 천연기념물 제413호뿐만 아니라 문화재로 지정된 다른 지질유산에 대해서도 적극적으로 학술적인 연구를 지원하고 최신 연구 결과를 반영하여 지질유산을 관리할 필요가 있음을 제기하고자 한다. 아울러 지질유산의 특성과 가치에 대한 과학적인 근거를 확보하기 위해서는 문화재의 원형이 최대한 보존되는 범위 안에서 연구용 시료 채취에 대한 문화

재청의 전향적인 협조가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었다. 함께 노두 답사를 진행하고 내용에 관해 토의해 주신 Dr. Robert Riding과 조석주 교수께 감사드리며, 샘플 채취 및 박편 제작에 도움을 준 충남대학교 오민규 및 이승훈 학생에게 감사드린다. 또한 건설적인 의견으로 논문에 도움을 주신 편집위원과 두분의 심사위원께 감사드린다.

REFERENCES

- CHA (Cultural Heritage Administration), 2019, http://www.heritage.go.kr/heri/cul/culSelectDetail.do?pageNo=5_2_1_0&ccbaCpno=1363204130000 (February 24, 2019).
- Cheel, R.J. and Leckie, D.A., 1993, Hummocky cross-stratification. In: Wright, V.P. (ed.), *Sedimentology Review*, 1, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1, 103-122.
- 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.
- Choi, S.J. and Woo, K.S., 1993, Depositional environment of the Ordovician Yeongheung Formation near Machari area, Yeongweol, Kangweondo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 375-386.
- Chough, S.K., Lee, H.S., Woo, J., Chen, J., Choi, D.K., Lee, S.-b., Kang, I., Park, T.-y. and Han, Z., 2010, Cambrian stratigraphy of the North China Platform: revisiting principal sections in Shandong Province, China. *Geosciences Journal*, 14, 235-268.
- Goscombe, B.D., Passchier, C.W. and Hand, M., 2004, Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. *Journal of Structural Geology*, 26, 739-763.
- Hong, J., Choh, S.-J., Park, J. and Lee, D.-J., 2017, Construction of the earliest stromatoporoid framework: Labechiid reefs from the Middle Ordovician of Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 470, 54-62.
- Jeon, J., Park, J., Choh, S.-J. and Lee, D.-J., 2017, Early labechiid stromatoporoids of the Yeongheung Formation (Middle Ordovician), Yeongwol Group, mideastern Korean Peninsula: Part II. Systematic paleontology and paleogeographic implications. *Geosciences Journal*,

- 21, 331-340.
- Kakao, 2019, <http://map.kakao.com/> (April 1, 2019).
- Kano, A., Lee, D.-J., Choi, D.K. and Yoo, C.-M., 1994, Ordovician (Llanvirnian) stromatoporoids from the Yeongwol Area, southern Korea. *Transactions and Proceedings of the Palaeontological Society of Japan New Series*, 174, 449-457.
- Kim, Y.-H., Rhee, C.W., Woo, J. and Park, T.-Y., 2014, Depositional systems of the Lower Ordovician Mungok Formation in Yeongwol, Korea: implications for the carbonate ramp facies development. *Geosciences Journal*, 18, 397-417.
- Kobayashi, T., 1966, Stratigraphy of the Chosen Group in Korea and South Manchuria and its relation to the Cambro-Ordovician formations of other areas, Section A, The Chosen Group of South Korea. *Journal of the Faculty Science, University of Tokyo, Section II*, 16, 1-84.
- Kong, D.-Y. and Lee, S.-J., 2009, Reconsideration of the Natural Monument No. 413 Mungokri Stromatolite, Yeongwol, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 711-723 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.K., 2012, Sequence Stratigraphy of the Yeongweol Group (Cambrian-Ordovician), Taebaeksan Basin, Korea: Paleogeographic Implications. *Economic and Environmental Geology*, 45, 317-333.
- Lee, D.-J. and Yu, C.M., 1993, Middle Ordovician stromatoporoids from the Yeongheung Formation and its biostratigraphic implications. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 9, 131-142 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-Y., 1979, A study on biostratigraphy and bioprovince of the Middle Ordovician conodonts from South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 15, 37-60.
- Logan, B.W., Rezak, R. and Ginsburg, R.N., 1964, Classification and environmental significance of stromatolites. *Journal of Geology*, 72, 68-83.
- Lokier, S.W., Andrade, L.L., Court, W.M., Dutton, K.E., Head, I.M., van der Land, C., Paul, A. and Sherry, A., 2017, A new model for the formation of microbial polygons in a coastal sabkha setting. *The Depositional Record*, 3, 201-208.
- Paik, I.S. and Lee, Y.I., 1989, Storm Deposits of the Lower Ordovician Mungok Formation in the Vicinity of Machari, Yeongweol, Kangweondo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 337-346.
- Paik, I.S. and Lee, Y.I., 1994, Paleoclimatic records in floodplain lake deposits of the Cretaceous Hasandong Formation in Jinju Area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 410-424.
- Park, J., Hong, J., Lee, J.-H., Choh, S.-J. and Lee, D.-J., 2017, Early labechiid stromatoporoids of the Yeongheung Formation (Middle Ordovician), Yeongwol Group, mideastern Korean Peninsula: Part I. Environmental distribution. *Geosciences Journal*, 21, 317-329.
- Pratt, B.R., 1995, The origin, biota and evolution of deep-water mud-mounds. In: Monty, C.L.V., Bosence, D.W.J., Bridges, P.H. and Pratt, B.R. (eds.), *Carbonate Mud-Mounds: Their Origin and Evolution*. Special Publication of International Association of Sedimentology, 23, 49-123.
- Yang, B., Dalrymple, R.W. and Chun, S., 2006, The significance of hummocky cross-stratification (HCS) wavelengths: evidence from an open-coast tidal flat, South Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 2-8.
- Yoo, C.M. and Lee, Y.I., 1997, Depositional cyclicity of the Middle Ordovician Yeongheung Formation, Korea. *Carbonate and Evaporites*, 12, 192-203.
- Yoo, C.M. and Lee, Y.I., 1998, Origin and modification of early dolomites in cyclic shallow platform carbonates, Yeongheung Formation (middle Ordovician), Korea. *Sedimentary Geology*, 118, 141-157.
- Yoo, C.M., Lee, Y.I. and Paik, I.S., 1994, Evidence for Hypersaline Conditions in the Middle Ordovician Yeongheung Formation, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 355-368 (in Korean with English abstract).

Received : December 22, 2019

Revised : February 10, 2020

Accepted : February 19, 2020