

경남 하동의 백악기 하산동층에 발달한 특이 서관 구조: 산상, 기원과 고생태적 의미

백인성[‡] · 김현주 · 이호일

부경대학교 지구환경과학과

요 약

경남 하동군 갈사만 부근 하산동층 중부 퇴적층에서 특이 형태의 불규칙상 서관 구조가 새로이 관찰되었다. 이 연구에서는 서관 구조가 보존된 퇴적층의 발달 특성과 서관 구조의 구체적인 산상을 기술하고, 이를 바탕으로 이 서관 구조의 기원과 서관 구조가 가지는 고생태 및 고환경적 의미를 고찰하였다. 서관 구조가 보존된 퇴적층은 사행하천이 발달한 충적평원에 쌓인 범람원 퇴적층으로 석회질 및 버티졸질의 고토양층이다. 서관 구조는 대체로 수 cm 이상의 직경을 가지며, L, T, X자형 등의 분지, 방의 발달, 외벽부의 파형 또는 요철상 발달, 그루브 발달, 나선형 발달 등의 특성을 보인다. 이와 같은 발달 특성은 이 서관 구조가 땅에 구멍을 파며 생활하는 소형 척추동물에 의한 것임을 시사해 준다. 서관 구조 퇴적층의 퇴적 당시 기후 조건은 건기와 우기가 뚜렷이 변하는 아건조성의 기후로 해석되며, 이에 따라 이 서관 구조는 이와 같은 양극성 기후 조건에서의 적응을 위한 목적으로 사용되었을 가능성이 높은 것으로 해석된다. 한편 하산동층 내에 땅에 구멍을 파며 생활하는 소형 척추동물에 의한 서관 구조가 보존되어 있음은 백악기 당시 한반도의 충적평원에 형성된 척추동물 생태시스템에 공룡 이외에 파충류와 포유류 등의 소형 척추동물들이 함께 관여하였음을 시사해 준다. 따라서 앞으로 국내 백악기 육성 생태시스템 연구에 소형 척추동물과 관련한 고생물, 고생태, 고환경 등의 연구가 확장되어 이루어져야 할 것으로 판단된다.

주요어: 하동, 백악기, 하산동층, 서관 구조, 척추동물, 고생태, 고환경

In Sung Paik, Hyun Joo Kim and Ho Il Lee, 2015, Unique burrows in the Cretaceous Hasandong Formation, Hadong, Gyeongsangnam-do, Korea: Occurrences, origin, and paleoecological implications. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 2, p. 141-155

ABSTRACT: Unique irregular burrows were newly observed in the middle part of the Hasandong Formation, Galsaman Bay, Hadong County, Gyeongsangnam-do, Korea. In this study the occurrences of the burrows and burrow-bearing deposits are described and the origin of the burrows and their paleoecological and paleoenvironmental implications are discussed. The burrow-bearing deposits are floodplain deposits with calcic and vertic paleosols formed on a fluvial plain with meandering rivers. The burrows are mostly more than a few cm in diameter, and branching in L, T, and X shapes, chambers, cusped or grooved walls, and spiraled burrows are observed, indicating that the burrows were formed by small-sized fossorial vertebrates. It is interpreted that semiarid climate with alternation of wetting and drying periods was prevailing during the formation of the burrow deposits, suggesting that the burrows were exploited for the adaptation to extreme climatic condition. The preservation of the burrows by fossorial vertebrates in the Hasandong Formation suggests that mammals and reptiles together with dinosaurs influenced the vertebrate ecosystem on the Cretaceous alluvial plain in Korean Peninsula. The study on small-sized vertebrates in paleontology, paleoecology, and paleoenvironment should be further needed to understand the Cretaceous terrestrial ecosystem in Korea.

Key words: Hadong, Cretaceous, Hasandong Formation, burrows, vertebrates, paleoecology, paleoenvironment

(In Sung Paik, Hyun Joo Kim and Ho Il Lee, Pukyong National University, Busan 608-737, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-51-629-6625, E-mail: paikis@pknu.ac.kr

1. 서 언

하산동층은 중생대 백악기 경상분지에 발달한 지층 중 하성 퇴적층이 가장 특징적으로 나타나는 지층이며, 다양한 특성의 켈크리트를 포함한 석회질 고토양이 가장 빈번하게 발달한 지층이다(Paik and Kim, 1995; Paik, 1998; Paik and Lee, 1998; Paik *et al.*, 1998; Chough and Sohn, 2010). 아울러 공룡의 골격 화석이 가장 많이 산출된 지층이며(Paik *et al.*, 1998, 2012; Dong *et al.*, 2001; Lee, 2007, 2008; Lee and Lee, 2007), 악어두개골(Lee and Lee, 2005), 거북뼈(Lee and Tomida, 2004) 등 다양한 종류의 척추동물 화석과 연체동물 화석(Lee *et al.*, 1990; Yun *et al.*, 2005; Paik *et al.*, 2011a)이 하산동층으로부터 산출되었다. 최근에는 소형 육식 공룡의 뼈화석 발견이 언론을 통해 보도된 바 있다(2014.11.25, 동아일보 외). 따라서 하산동층은 한반도 공룡 시대 초기의 고생태와 고환경의 특성을 이해하는 데에 매우

가치 있는 자료를 제공해 주는 지층이다.

전술한 화석들 이외에 하산동층에 보존된 생흔 화석의 특성 또한 하산동층 퇴적 당시의 육성 생태계를 이해하는 데에 매우 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다. 하산동층에서는 공룡 발자국(Paik *et al.*, 2012)을 비롯하여, 익룡 발자국(Lee *et al.*, 2008)과 양서류 발자국(Lee *et al.*, 2006) 등 여러 종류의 척추동물 생흔 화석이 보고된 바 있다. 이와 함께 다양한 종류의 무척추동물 생흔 화석(Kim and Paik, 1997; Kim *et al.*, 2002)이 보고된 바 있다. 특히 Kim *et al.* (2002)은 생흔 화석의 군집 유형을 퇴적 환경과 연계시켜 해석함으로써, 생흔 화석 군집상을 이용한 층적분지의 고환경 해석에 바탕 자료를 제시하였다.

이 연구에서는 대체로 직경 수 cm 이상을 가지는 불규칙한 형태의 서관 구조 화석을 경남 하동군 갈사면 부근에 발달한 하산동층 내의 고토양층으로부터 새로이 관찰하였다. 육성 퇴적층에서 산출되는 서관 구조들은 절지동물, 연체동물, 파충류, 공룡, 포

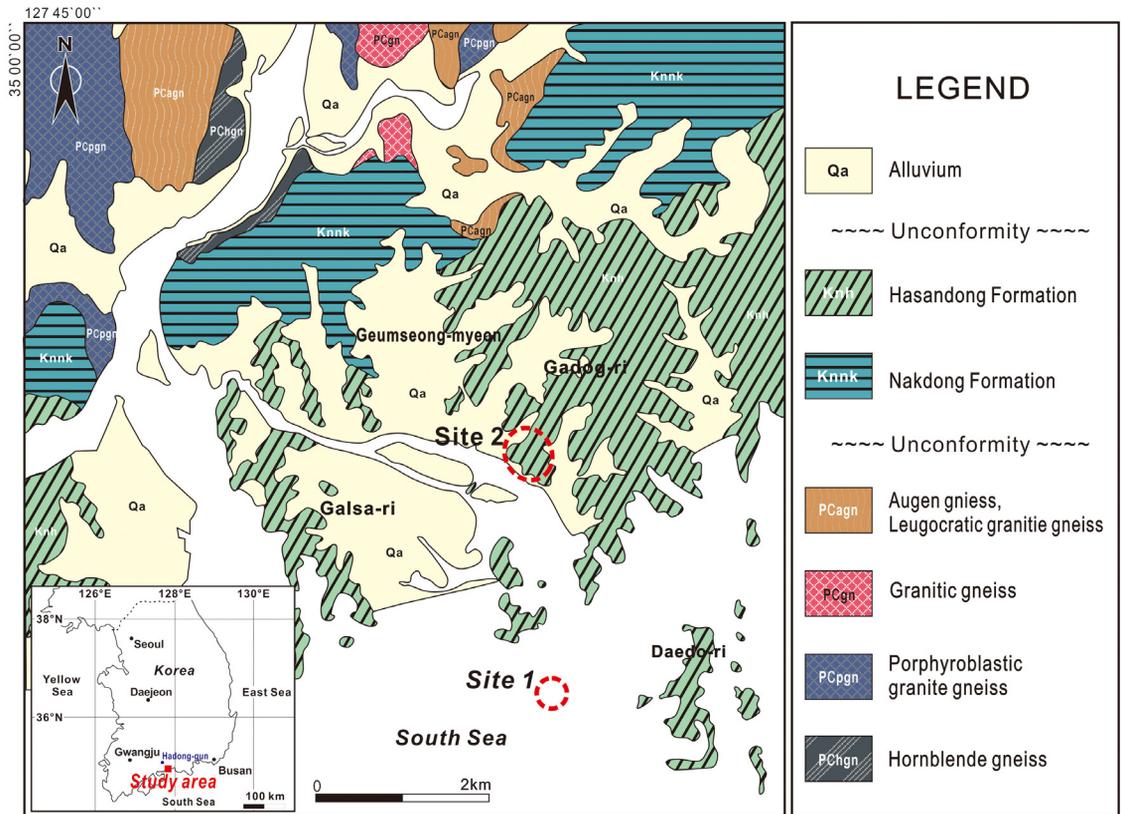


Fig. 1. Location and geological map of study area (Chang *et al.*, 1989).

유류 등 매우 다양한 동물에 의해 다양한 형태로 만들어지며, 지질시대를 통한 이들 서관 구조의 화석 기록 또한 다양하게 나타난다(Hasiotis, 2002; Hasiotis *et al.*, 2007).

이 논문에서는 갈사만 부근의 2개 지점에 분포하는 전기 백악기 하산동층 퇴적층(Chang *et al.*, 1989) (그림 1)에 발달한 특이 형태의 불규칙상 서관 구조들을 대상으로, 이들 서관 구조가 보존된 퇴적층의 발달 특성과 서관 구조의 구체적인 산상을 기술하고, 이를 바탕으로 이 서관 구조의 기원과 이 서관 구조가 가지는 고생태 및 고환경적 의미를 고찰하였다.

2. 지질 개관

연구 지역은 경상누층군 신동층군의 중부에 해당하는 전기 백악기의 하산동층의 중부에 해당하는 퇴적층이 분포하는 지역이다(그림 1). 하산동층은 Tateiwa (1928)에 의해 왜관도폭에서 명명되었으며, 진주 주변 지역의 여러 도폭들에서는 “마동층”이란 명칭이 사용되었다(Kim and Yun, 1969; Kang and Park, 1975). 하산동층의 퇴적층은 대체적으로 북동의 주향과 남동 방향으로 10° 내외의 경사를 갖는다. 하산동층의 상한과 하한은 각각 붉은색 층의 출현과 소멸 층준으로 설정되어 있으며, 층후는 지역에 따라 640 ~ 1,300 m로 변화한다(Um *et al.*, 1983).

하산동층의 지질시대는 윤조류 화석을 이용한 생층서에 의해 Hauterivian에 대비된 바 있고(Seo, 1985), 고자기학 연구에 의해 Aptian 초기(Doh *et al.*, 1994)에 대비된 바 있다. 한편 최근에 이루어진 하산동층의 절대 연령 연구 자료(Sano *et al.*, 2002, 2006; Lee *et al.*, 2010)와 하산동층 하위의 낙동층 절대 연령 연구 자료(Lee *et al.*, 2012)는 하산동층의 주 퇴적시기가 Aptian임을 지시한다(Kang and Paik, 2013).

하산동층의 전반적인 퇴적 환경은 충적평원으로서, 충적평야상에 발달하는 고굴곡 하천의 사행과 범람 및 유기의 결과로 이루어진 하도 퇴적층, 하도 주변의 범람원 퇴적층, 독터짐(crevasse splay/channel) 퇴적층, 범람원 호소퇴적층 등으로 구성되어 있으며, 사질로 이루어진 하도퇴적층과 이질 우세인 범람원퇴적층의 교호가 하산동층의 대표적인 퇴적 특성이다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1985; Paik and Lee, 1994). 따라서 하산동층은 붉은색층을 빈번히 협재

하는 하성 평원 퇴적층의 발달에 의해 하위의 낙동층 및 상위의 진주층과 일반적으로 구분된다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1985). 이와 같은 퇴적 특성에 의한 하산동층의 층서적 구분에도 불구하고, 하산동층의 중부에는 수십 m 두께의 붉은색 층을 협재하지 않은 암회색 내지 회색 우세의 호소성 퇴적층이 진주와 하동 지역에 단속적으로 발달되어 있다(Paik and Lee, 1994; Paik *et al.*, 2011a).

한편 하산동층은 경상누층군의 지층 중 석회질 고토양의 발달이 가장 현저한 지층으로서, 이들 퇴적층 내에는 다양한 유형의 고토양 기원 켈크리트가 발달되어 있으며, 고토양 기원의 미끌림면과 위배사 구조가 발달된 버티졸 고토양이 흔히 수반되어 있다(Paik and Kim, 1995; Paik, 1998; Paik and Lee, 1998). 따라서 하산동층 퇴적 시기의 전반적인 기후 조건은 아건조 기후로 해석되었다(Paik and Kim, 1995; Paik, 1998; Paik and Lee, 1998).

3. 퇴적 특성

특이 서관 구조의 보존이 관찰된 지역은 2개 지역으로 이들 지역에서의 하산동층 퇴적층의 발달 특성은 다음과 같다.

3.1 1지역 퇴적 특성

조간대 사주 지역에 위치한 이 지역의 퇴적층은 용각류 공룡인 Titanosauriformes에 속하는 부경고사우루스(*Pukyongosaurus*)(Dong *et al.*, 2001; Paik *et al.*, 2011b; D'emic, 2012; Xing *et al.*, 2015)의 골격 화석들이 산출된 퇴적층이다. 간조 시에 노출되는 이 지역(그림 2)의 퇴적층은 직경 약 30 m 정도의 노출 범위를 가지며 분포되어 있으며, 발달 두께는 약 5.7 m이다(그림 2).

전반적으로 이 퇴적층의 하부에는 10 cm 내외에서 수십 cm 두께의 녹회색질의 실트스톤 또는 세립질 사암층이 우세하게 발달한 가운데 수 cm 두께의 세일층(붉은색 또는 녹회색)이 협재한다. 중부에는 수십 cm에서 1 m에 이르는 켈크리트를 함유한 이암층이 발달하는데, 공룡 골격 화석은 이 이암층에서 산출되며, 이와 함께 이 이암층의 상부와 표면부에 불규칙 서관 구조들이 산재되어 보존되어 있다. 이 이암층의 상위에는 두께 1 m 이상의 판상층리 내지

사층리가 발달한 괴상의 조립 내지 중립질 사암이 발달하는데, 이 사암층은 측방(남서측)으로 가면서 사암과 세일의 호층암상으로 점차 변화하는 양상을 띤다. 이 사암은 압편질 장식사암으로 방해석질로 교결되어 있다.

중부 퇴적층에 집중적으로 발달된 켈크리트의 경우, 성분적으로는 미크라이트가 주를 이루는 가운데 내부에 발달한 환상 균열이나 관형 또는 불규칙상(부분적으로 스트로마타티스형의 공극 발달)의 공극들에는 스페라이트가 충전되어 있다. 이와 함께 환상 균열의 발달로부터 기원된 펠로이드들이 산재하며, 일부 관형 공극 및 불규칙 공극의 외곽에는 열층상 미크라이트가 발달한다. 이와 같은 발달 특성은 이 켈크리트들이 토양 기원임과 함께 이들 켈크리트를 함유한 이암층이 석회질 고토양임을 지지하여 준다. 이들 켈크리트들은 이 지역 중부 퇴적층의 하부에서는 단괴상(일부 단괴에서는 뿌리 결핵체의 양상이 관찰됨)으로 나타나는 반면, 상부에서는 층상으로 나타나는데, 단괴상에 비하여 층상 켈크리트의 성숙도가 높게 나타나며, 단괴상의 경우에도 상

부로 가면서 농집도가 증가하는 경향을 보인다.

서관 구조가 보존된 퇴적층은 두께 약 70 cm 정도의 사질 이암층으로서(그림 2), 공간적으로 북측(부분적으로 사질을 띠고 켈크리트 인트라클라스트 함유)에서 남측으로 가면서 세립화하는 양상을 띠며, 때로 원마도가 양호한 규암역들이 관찰된다. 이 화석층은 2 내지 3 단계의 성숙도를 가지는 석회질 고토양층 위에 발달되어 있으며, 상위는 조립질 사암에 의해 덮여 있다. 공룡 골격 화석은 이 이암층 내의 상부 약 20 cm 정도 두께의 구간에서 산출하며, 하산동층의 다른 지역 공룡골격화석층에서와 마찬가지로 전반적으로 토양 기원 켈크리트에 의하여 둘러싸여 있다. 한편 이 이암층에서는 거북의 배갑편, 경린 어류의 비늘, 이매패류의 패각편 등이 드물게 산출된다.

이 이암층의 암색은 하부에서는 붉은 색을 띠나 상부로 가면서 녹회색질로 변화하는 양상을 띠는데, 공룡 골격 화석과 서관 구조가 산출되는 구간에서는 전반적으로 녹회색질이 우세하다. 켈크리트 발달의 경우 하부에서는 미약한 편이나 서관 구조가 산출하

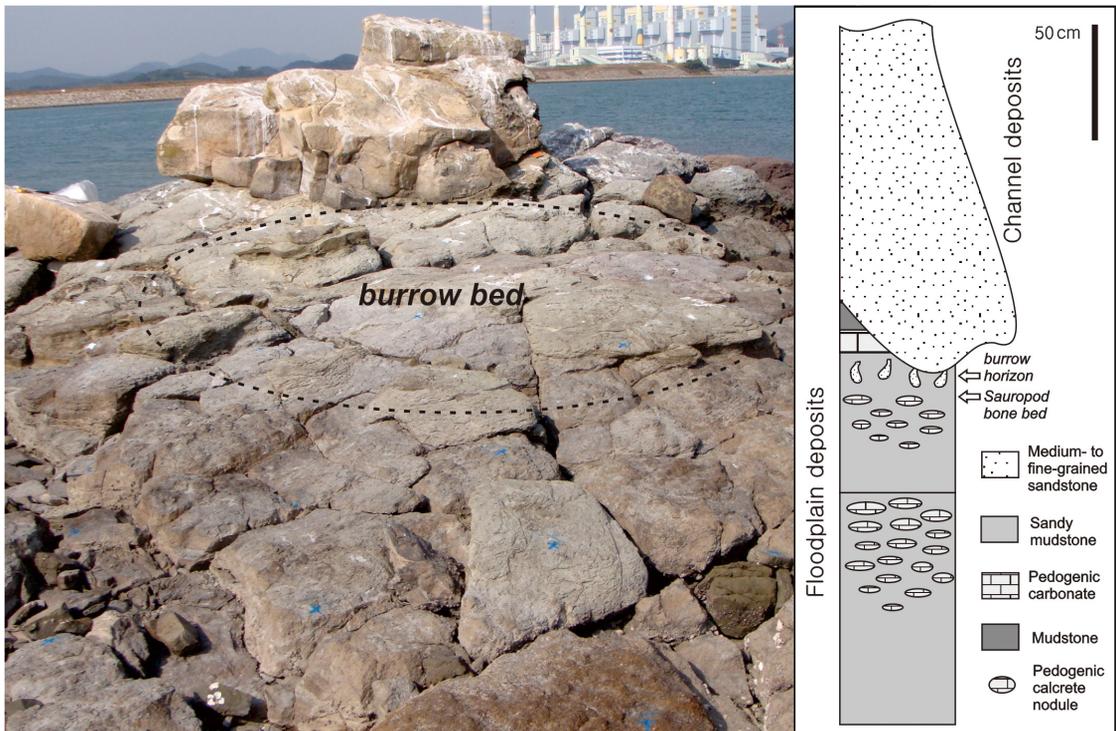


Fig. 2. Overview and stratigraphic section (modified from Paik *et al.*, 2011b) of site 1.

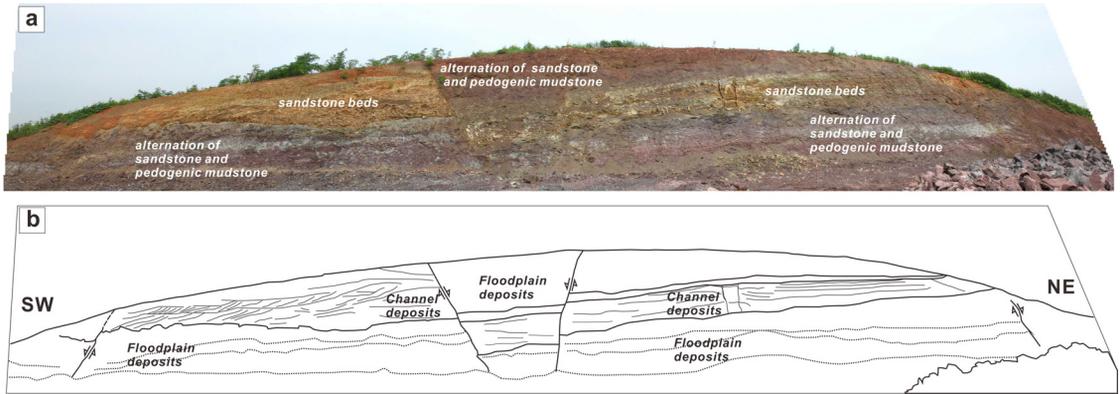


Fig. 3. Outcrop exposure (a) and sketch (b) of the section overlying the burrow-bearing deposits at site 2.

는 상부에는 비교적 켈크리트의 발달이 일반적이는데, 공간적으로 북측에서 남측으로 가면서 켈크리트의 성숙도가 증가되는 경향을 보인다. 이러한 석회질 고토양의 기록과 함께 이 이암층에는 버티줄 고토양의 특성 중 하나인 미끌림면들이 부분적으로 산재하여 나타나며, 일부 미끌림면의 표면에는 얇은 방해석각이 형성되어 있다.

3.2 2지역 퇴적 특성

이 지역은 1지역에서 북북동으로 약 2.5 km 정도 떨어져 있으며, 층서상 1지역의 하산동층 퇴적층보다 하부에 해당하는 지역이다. 이 지역 하산동층의 퇴적특성은 도로공사에 의해 나타난 절토면에 노출된 퇴적층(두께 약 25 m 정도)의 단면 특성(그림 3)으로부터 관찰되었으며, 이의 특성은 다음과 같다.

이 지역의 퇴적층은 붉은색 이암 내지 세일질 이암층이 흔히 발달된 가운데에 침식기저면이 뚜렷이 발달한 상향세립화의 양상을 보이는 조립질 내지 세립질 사암층이 협재하는 것이 특징이다(그림 3). 이와 함께 이질암층에는 10 내지 30 cm 두께의 사암 렌즈가 부분적으로 나타나며, 녹색색의 세일질 이암이 간헐적으로 협재되어 나타난다.

이암층에는 고토양 기원의 켈크리트가 흔히 함유되어 있으며, 일부 붉은색 이질암에는 가지상의 켈크리트가 집중적으로 발달되어 있음이 특징으로, 대체적으로 석회질 고토양 성숙도 2 내지 3 단계에 해당된다. 이와 함께 일부 이질암층에서는 버티줄 고토양 기원의 미끌림면과 위배사 구조가 흔히 관찰된다. 한편 일부 이암층에서는 무척추동물의 생존기록

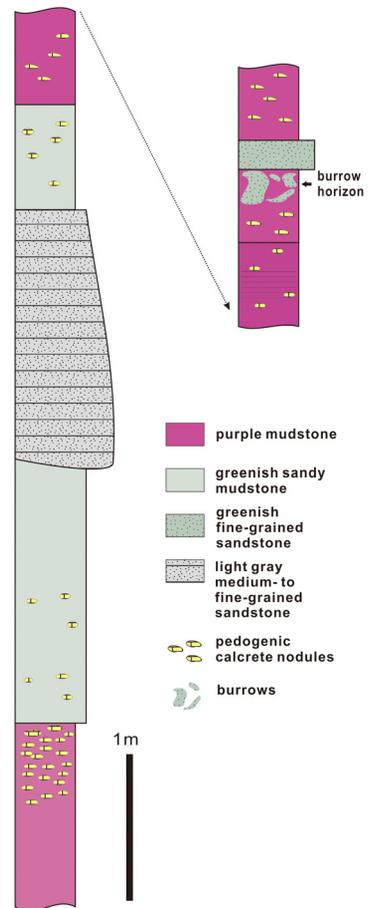


Fig. 4. Stratigraphic section of the burrow-bearing deposits at site 2.

이 드물게 나타나며, 탄화식물편화석이 드물게 관찰된다.

상향세립화를 보이는 사암층은 전반적으로 회색질을 띠고, 수 m 두께의 규모로 2매가 발달되어 있다. 하부에 발달한 사암층의 경우 하위의 이질암층과 U자형의 침식경계면을 가지며 발달되어 있으며, 부분적으로 측방성장의 층리발달을 보인다. 사암층의 기저부에는 역질암층이 10 cm 내외의 두께로 나타난다. 이들 사암층의 하부는 렌즈상의 사암층으로 이루어져 있으며, 내부에는 사층리가 발달되어 있다. 반면 상위의 이질암층으로 접이되는 상부에서는 층리의 발달이 미약하다. 한편 하부에 발달된 사암층의 상부에 발달한 이질사암과 사질이암의 접이부에서는 척추동물 골편 및 악어 이빨화석이 드물게 산출한다.

이 지역에서의 특이 서관 구조는 전술한 퇴적층의 하위에 해당하는 퇴적층에서 관찰되었다. 이 퇴적층의 두께는 약 8 m로, 붉은색 이암과 녹회색 세립질 이암이 교호되어 있는 가운데 회색질의 중립질 내지 세립질 사암과 녹회색 세립질 사암층이 협재하는 특성을 띤다(그림 4). 회색질 중립질 내지 세립질 사암은 렌즈상으로 여러 차례 중첩되어 나타나며, 하위의 이질암과의 경계는 침식적이다. 이질암층에는 고토양 기원의 캘크리트 단괴가 흔히 나타나나, 상위층의 이질암층에서 흔히 관찰되는 버티졸고토양 기원의 미끌림면 구조는 드물게 관찰된다. 서관 구조는 이 퇴적층의 상부에 발달한 붉은색 이암층에서 관찰된다. 이 붉은색 이암층에는 녹회색을 띠는 불규칙상 내지 관형의 캘크리트가 산재되어 있어, 녹회색질의 세립질 사암으로 충전된 서관 구조와 외견상 구분이 뚜렷하지 않은 경우도 있다.

4. 서관 구조 산상

전술한 2개 지역의 하산동층 퇴적층에 보존된 특이 서관 구조의 산상은 표면부와 단면부에서의 발달 특성으로부터 파악될 수 있으며, 대체로 1지역에서는 표면부의 특성이, 그리고 2지역에서는 단면부에서의 특성이 관찰된다.

4.1 1지역 서관 구조

이 지역에 발달한 용각류 골격 화석층 표면에는 관형 내지 불규칙상의 서관 구조가 산재되어 나타나며(그림 5a, 5b, 5c), 서관 구조의 내부는 골격 화석층

상위에 놓여 있는 하도 기원의 사암층으로부터 기원한 사질퇴적물로 충전되어 있다. 이들 서관 구조는 표면뿐만이 아니라 화석층의 내부 20 cm 이상의 깊이까지 발달되어 있으며, 내부에서 3차원적으로 연결된 특성이 부분적으로 관찰된다.

이 서관 구조의 크기는 관찰 단면에서 대체로 직경 1 cm 내외로부터 10여 cm의 것까지 다양하게 나타나며, 단면의 형태는 대체로 아원상을 띤다. 서관 구조의 발달 방향은 수평과 수직, 경사 등 다양한 방향을 보인다. 수평 방향의 발달 형태는 직선 내지 아직선형이 주를 이루나, 부분적으로 곡선 또는 반원, L자, C자 등 다양한 연결 형태를 보인다(그림 5b, 5c). 이와 함께 수평으로 가다가 아래로 얇게 들어간 후에 다시 위로 나와 수평으로 이어지는 연결 양상도 관찰된다. 수평 방향에서 십자형과 T자형의 교차 양상이 나타나며(그림 5a, 5c), 이로부터 다각상의 형태가 부분적으로 나타난다. 일부에서는 수평부에서 직경 수 cm의 원형 내지 불규칙상의 서관 구조가 마디 또는 얼룩의 형태를 이루며 나타나기도 한다(그림 5a, 5c). 단면의 형태는 원형 내지 타원형이 주를 이루나 판상 또한 관찰된다. 한편 수 cm 내외의 거리에서 단면의 직경이 유지되기도 하나, 단면 직경의 증감이 수 cm 내외의 거리에서 나타나기도 한다.

수직 방향에서는 수직 방향과 수평 방향의 서관 구조가 교차되어 발달한 양상이 부분적으로 관찰되며, 대체로 표면부에서의 형태보다 불규칙한 양상을 보인다. 일부에서는 아래쪽으로 가면서 크기가 증가하여, 직경 10여 cm의 넓은 공간으로 확장된 양상이 관찰된다(그림 6a). 일부 서관 구조의 수직 단면에서는 나선형의 형태를 띠는 양상이 관찰되며(그림 6b), 사암으로 충전된 서관 구조 캐스트의 일부에서는 벽부분에 가로 방향으로 서로 평행하게 발달한 그루브 구조가 나타난다(그림 6c). 한편 서관 구조 외벽부의 경우, 바깥쪽으로는 호의 형태를, 안쪽으로는 첨부의 형태를 띠며 이어진 첨곡상의(cusps) 특성이 흔히 나타난다(그림 6d). 이 경우 호의 직선길이는 수 mm 내지 1 cm 내외이다. 이러한 외벽부의 첨곡상 발달과 함께 외벽부의 형태는 대체로 요철상을 보인다.

1지역 서관 구조의 충전물은 상위 사암과 동일한 성분인 조립 내지 중립질의 석영 및 암편 입자로 구성되는 암편질 사암의 성분을 띠며, 일부 서관 구조

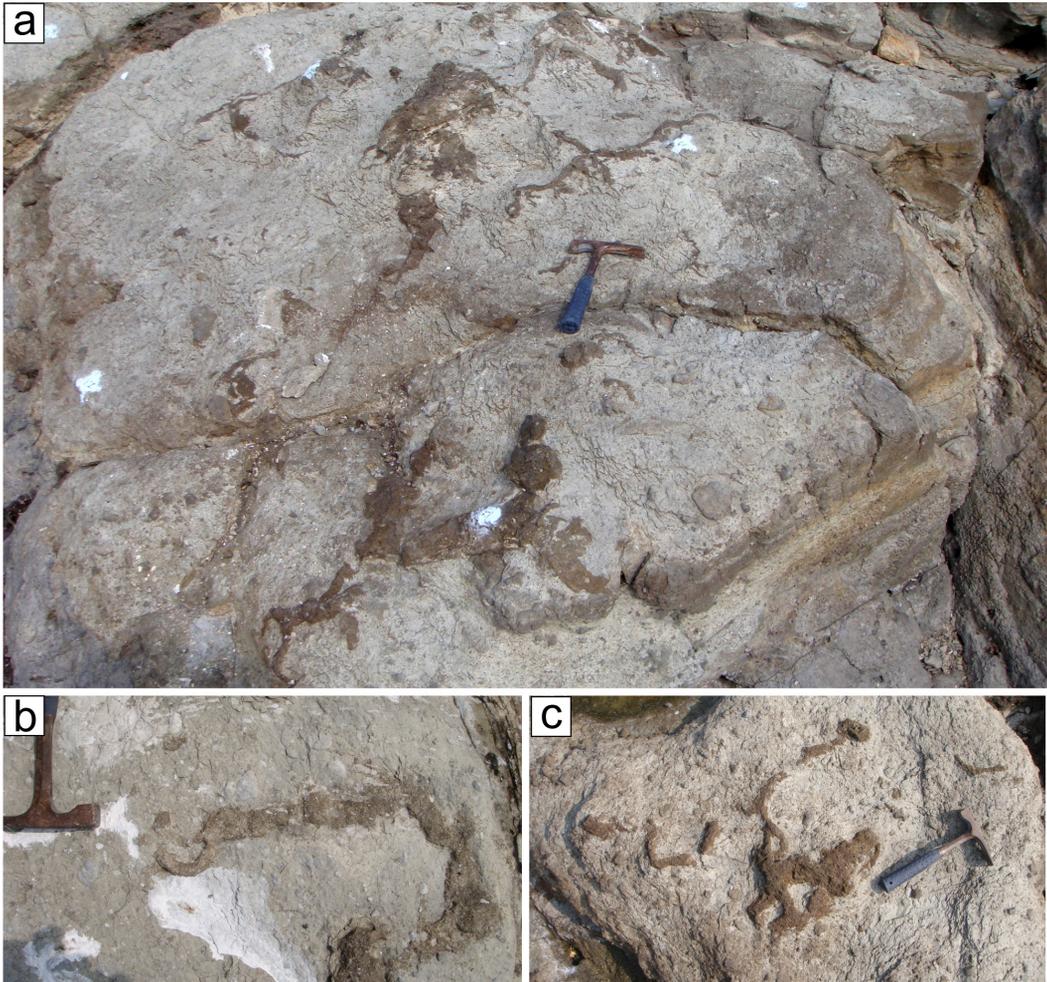


Fig. 5. Occurrences of the burrows at site 1 (surface views). a. Surface view of the burrows showing tubular, subcircular, and irregular shapes. b. L-shaped and subcircular burrows. c. L- and X-shaped burrows and subcircular burrows.

에서는 내부에 공룡 골편 화석이 드물게 함유되어 있다. 한편 서관 구조의 모암이 된 이암편이 서관 구조의 사암 충전물 내에 고립되어 있는 양상이 관찰되는데, 이는 이 서관 구조가 굴착될 당시에 대상이 된 퇴적물이 어느 정도 고화되어 있었음을 지시해 준다. 즉 공룡뼈 화석층이 퇴적 이후 어느 정도 석회질 토양화된 이후에 이들 서관 구조가 만들어진 것으로 해석된다. 이는 서관 구조가 캘크리트 단괴에 의해 가로막혀 있는 양상에 의해서도 뒷받침된다.

4.2 2지역 서관 구조

이 지역에서는 절취면에 노출된 퇴적층의 단면으

로부터 서관 구조의 단면 특성이 관찰된다. 서관 구조는 이 지역의 하부 퇴적층에 발달한 범람원 기원의 붉은색 이암 내에 관형 내지 불규칙상의 형태로 산재되어 나타나며, 서관 구조의 내부는 상위의 렌즈상 세립질 사암(두께 30 cm 내외)과 동일한 모래입자들로 충전되어 있다(그림 7). 이 서관 구조는 상위의 사암층으로부터 50 내지 60 cm 정도의 깊이까지 발달되어 있으며, 서로 간에 수 cm 내외에서 수십 cm의 수평적인 간격을 가지며 나타난다. 서관 구조의 직경은 수 cm에서 10 cm 내외 정도의 규모를 가지며, 일부에서는 장경이 20 cm에 이르는 구형의 구조로 연결된 양상을 보인다(그림 7b). 서관 구조의

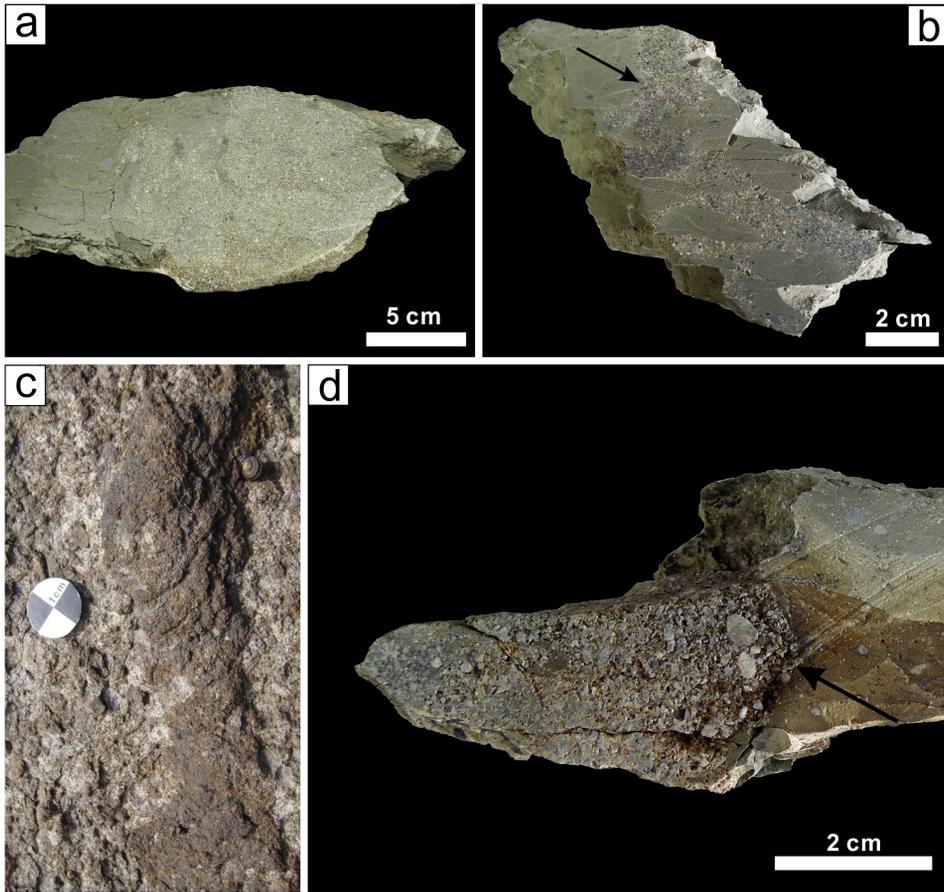


Fig. 6. Occurrences of the burrows at site 1 (sectional views). a. Downward expansion of the burrow. b. Spiraled burrow (arrow). c. Subparallel grooves in burrow wall. d. Cusped burrow wall (arrow).

단면 형태는 대체로 타원형을 보이며(그림 7c, 7d, 7e), 일부에서 상부는 볼록하고 바닥은 수평으로 굴곡진 형태를 가지는 반원상의 단면 구조가 관찰된다(그림 7b).

이들 서관 구조 또한 1지역에서와 마찬가지로 층리에 수직, 수평, 경사 등 다양한 방향으로 난다(그림 7c, 7d, 7f, 7g). 일부에서는 서로 간에 연결되어 불규칙한 망상의 연결 형태를 보이며, 수직으로 발달하다가 층리를 따라 이어지는 L자형 구조가 관찰된다(그림 7b). 이 지역 서관 구조의 외벽은 선형보다는 대체로 불규칙한 파형 또는 요철상의 굴곡 구조를 이루며 발달되어 있으며, 파형 굴곡의 간격은 수 mm 내지 1 cm 내외로 나타난다(그림 7g). 한편 서관 구조가 발달된 붉은색 이암에는 버티줄 고토양 기원의 미끌림면이 나타나는데, 이 미끌림면은 서관

구조에 의해 절단되어 있다. 이는 1지역에서와 마찬가지로 이들 서관 구조가 굴착될 당시에 대상이 된 퇴적물이 어느 정도 고화되어 있었음을 지시해 준다.

5. 토 의

5.1 퇴적 환경

하산동층의 중부 내지 상부의 퇴적층은 전반적으로 층적평야에 발달하는 고굴곡하천의 사행과 범람 및 유기의 결과로 이루어진 하도 퇴적층, 하도 주변의 범람원퇴적층 및 독터짐 퇴적층, 범람원 호수 퇴적층 등으로 구성되어 있으며, 범람원 퇴적층에는 석회질 및 버티줄 고토양의 발달이 일반적이다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1985, 1986; Paik and Lee, 1994, 1998; Paik and Kim, 1995; Paik, 1998; Paik *et al.*,

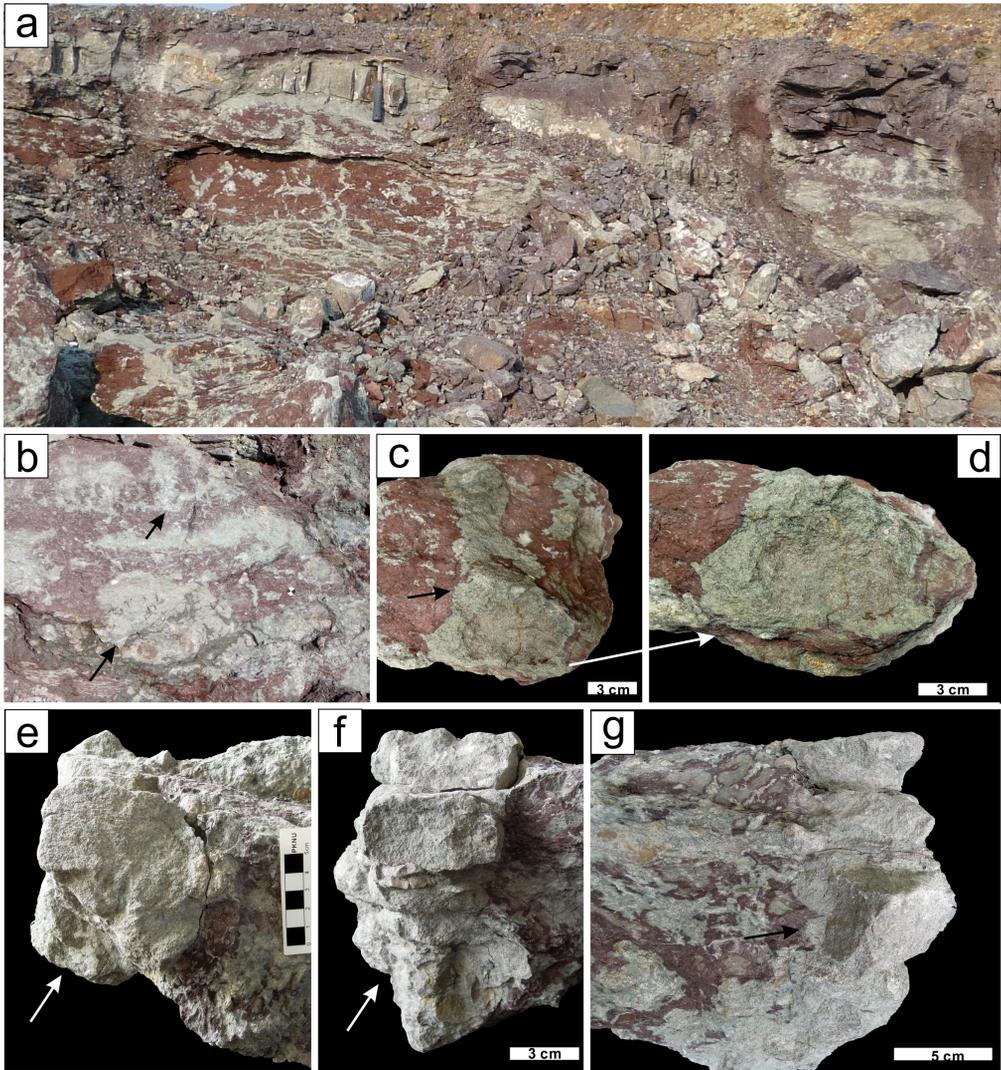


Fig. 7. Occurrences of the burrows at site 2. a. Overall views of the sandstone-filled burrow bed below fine-grained sandstone (hammer-laid). b. L-shaped burrow (upper arrow) and subcircular chamber (lower arrow). c. Oblique view of a horizontal tube (arrow) filled with fine-grained sandstone and distinct wall contact. Irregular mottles in the surrounding mudstone are calcretes. d. Cross-sectional view of the burrow in c, showing hemispherical shape with bilobate bottom. e. Planar view of a vertical tube (arrow) filled with fine-grained sandstone, showing subcircular cross section. f. Sectional view of the burrow (arrow) in e. g. Opposite view of f, showing an inclining of the burrow in the lower part. Cusped burrow wall (arrow) is distinct. Irregular mottles in the surrounding mudstone are calcretes.

2011a).

1지역 퇴적층의 경우, 하부로부터 상부까지의 퇴적 특성은 하산동층 중부와 상부 퇴적층의 특성인 사행하천과 범람원 퇴적층의 구성 특성을 보인다. 즉 수십 cm 두께의 실트스톤 내지 세립질 사암층을 협재하는 고토양질의 이암층으로 이루어진 하부 퇴적층은 독터짐 퇴적층을 함유한 범람원 퇴적층으로 해석

되며, 뚜렷한 침식기저면을 가지며 상향세립화된 상부의 조립질 사암층은 하도 퇴적층으로 해석된다. 따라서 1지역 퇴적층의 전반적인 시간에 따른 퇴적상 변화는 하천에 비교적 가까운 범람원 지역(하부)에서 상대적으로 먼 거리에 위치한 범람원 지역(중부)을 거쳐 갑작스러운 유로 변경에 의한 하천의 회귀로 이어지는 공간적인 변화의 기록을 보여주는데, 이와 같

은 퇴적 기록은 하산동층 중부 내지 상부 퇴적층의 일반적인 발달 양상이다(Um *et al.*, 1983; Choi, 1986; Paik and Kim, 1994; Paik, 1998; Paik and Lee, 1998; Paik *et al.*, 1998). 2지역의 경우, 고토양 기록을 간직한 이암층과 U자형의 침식 경계를 가지며 상향 세립화한 사암층이 발달되어 있음은 이 지역 퇴적층 또한 1지역의 퇴적층과 마찬가지로 사행하천이 발달한 충적평원의 퇴적층이었음을 지시해 준다.

한편 서관 구조가 산출하는 1 및 2지역의 범람원 기원 이질암층에 석회질과 버티졸 고토양의 기록이 발달하여 있음은 당시의 기후 조건이 대체적으로 아건조한 가운데에 건기와 우기가 반복되는 기후 조건이었음을 지시해주며(Retallack, 1990, 1993), 서관 구조가 발달한 퇴적층은 하도로부터 비교적 먼 거리에 위치한 지역이었던 것으로 해석된다(Paik and Lee, 1998). 한편 경상누층군 퇴적 당시의 아건조성 기후는 분지 외곽에 발달된 산악 지형이 분지 외부에서 공급되는 습한 공기를 차단하는 역할을 하는 소위 산악효과(orographic effect)로부터 기인된 것으로 해석되었다(Paik *et al.*, 2007).

5.2 서관 구조의 기원 생물

서관 구조 내에 이 구조를 만든 생물의 체화석이 함께 보존되어 있는 경우를 제외하고는 서관 구조의 기원 생물을 알아내기는 쉽지 않다. 따라서 서관 구조의 기원 생물을 추정하는 데에는 서관 구조의 발달 구조와 방향, 확장의 유무, 표면 구조, 직경, 단면 형태, 충전물, 외벽막 유무, 퇴적상, 지질시대의 특성 등이 이용될 수 있다(Melchor *et al.*, 2010).

전술한 연구 지역 서관 구조의 발달 특성은 이 구조의 형성 기원이 백악기에 육성 환경에 서식하였던 소형 동물에 의한 서관 구조일 가능성이 높음을 시사해 준다. 육성 퇴적층에서 산출되는 서관 구조들은 절지동물, 연체동물, 파충류, 공룡, 포유류 등 매우 다양한 동물에 의해 다양한 형태로 만들어지며, 지질시대를 통한 이들 서관 구조의 화석 기록 또한 다양하게 나타난다(Hasiotis, 2002). 위에서 기술된 연구 지역의 서관 구조처럼 충적평원 지역의 토양층 내에 관형 또는 불규칙상으로 서관 구조를 굴착하는 동물은 개미, 갑충류의 곤충, 갑각류, 소형 파충류, 설치류 등이다(Hasiotis, 2002).

연구 지역 서관 구조의 경우 3차원적인 연결망을

가지며 발달은 되어 있으나, 수 cm 크기의 반구 내지 타원형의 방들이 작은 통로로 복잡하게 연결된 특성을 가지는 개미의 서관 구조(Hasiotis, 2002)와는 다른 특성을 보인다. 아울러 수 cm 내지 10 cm 이상의 단면 직경 등 규모의 차이 또한 갑충류 곤충에 의한 서관 구조(Hasiotis, 2002)와도 다른 양상이다. 한편 갑각류인 계에 의해 만들어진 연구 지역 서관 구조와 유사 특성을 가지는 서관 구조가 하성 퇴적층으로부터 보고된(Melchor *et al.*, 2010) 바 있으나, 연구 지역의 경우 고토양화된 범람원 퇴적층에 발달한 것임으로 일반적으로 하도 퇴적층에 발달하는 계에 의한 서관 구조의 가능성은 낮은 것으로 해석된다.

따라서 연구 지역의 서관 구조는 L, T, X자형 등 다수의 분지, 방의 발달, 외벽부의 파형 또는 요철상 발달, 그루브 발달, 나선형 발달 등의 특성(표 1)을 복합적으로 고려할 때, 땅에 구멍을 파며 생활하는(fossorial) 소형 척추동물에 의한 서관 구조임을 시사해 준다(Voorhies, 1975; Groenewald *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2001; Hasiotis, 2002; Hasiotis *et al.*, 2004; Gobetz and Martin, 2006; Hembree and Hasiotis, 2008). 땅에 구멍을 파는 육상동물에 의한 서관 구조는 페름기 초기의 지층으로부터 보고되어 있다(Hasiotis, 1993). 이와 함께 최근에는 소형 공룡의 서관 구조가 백악기 육성 퇴적층으로부터 보고된 바 있다(Varrichio *et al.*, 2007; Martin, 2009). 전술한 바와 같이 연구 지역 서관 구조에 이 구조를 굴착한 동물의 체화석이 남아 있지 않음은 물론, 범람원의 토양층에 서식하던 소형 척추동물의 체화석이 남한반도의 백악기 퇴적층에서는 아직까지 보고된 바가 없어 연구 지역 서관 구조의 기원 동물을 직간접적으로 추정하기에는 어려움이 있다.

하산동층 퇴적 당시에 토양을 굴착하여 생활했던 소형 척추동물군의 후보에는 공룡과 파충류가 있으며, 이와 함께 서식의 개연성이 높은 포유류를 들 수 있다. 최근에 연구 지역 인근에 분포하는 하산동층 퇴적층으로부터 길이 20여 cm, 폭 15 cm 정도 크기의 소형 수각류 공룡뼈 화석이 보고되었으나, 연구 지역 서관 구조의 규모와는 차이가 있다. 따라서 지질시대에 보고된 파충류와 포유류에 의한 서관 구조의 특징들을 정리하여 연구 지역 서관 구조의 특징과 비교하였으며(표 1), 그 비교특성은 연구 지역의

Table 1. Summarized features of the burrows described in this study and vertebrate burrows in the literatures.

	<i>Site 1</i>	<i>Site 2</i>	<i>Reptile</i>	<i>Mammal</i>	<i>Summary of Vertebrates (reptiles and mammals)</i>
Diameter	1 cm to 10+ cm	a few cm to 10+ cm	4-25+ cm	a few cm to 50+ cm	subcircular to elliptical cross section with diameters from 2-20+ cm; shallow to deep burrow systems composed of shafts, tunnels, spiral ramps, and chambers; depth from 0.1-2+ m; scratches, bulbous, pustulose, to smooth burrow walls
Cross-sectional shape	subcircular	subcircular; in places hemispherical	circular to subcircular; flattened biconvex or bilobate	subcircular; elliptical	
Architecture	vertical and horizontal tubes; complex network, in places polygonal; spiral tube and chamber present	vertical and horizontal tubes; complex network; in places chamber present	vertically oriented; spiral tube; inclined entry and terminal chambers; complex network	vertical and horizontal tubes; shallow to steeply dipping shafts; spiral tubes; terminal chambers; irregular orientation; complex network	
Branching	multiple	multiple	multiple	multiple	
Depth	20+ cm	50 to 60 cm	50-75 cm	50-150+ cm	
Wall	scratched in places	scratched in places	scratched in places	scratched in places	
Depositional environment	floodplain (calic and vertic paleosol)	floodplain (calic and vertic paleosol)	floodplain	floodplain; levee	alluvial plain to lake margin
Geological age	Early Cretaceous	Early Cretaceous	Upper Permian; Triassic	Jurassic; Cretaceous; Miocene	Devonian to Recent
References	this study	this study	Smith, 1987; Groenewald <i>et al.</i> , 2001; Miller <i>et al.</i> , 2001; Hasiotis <i>et al.</i> , 2004	Martin, 2001; Hasiotis <i>et al.</i> , 2004; Gobetz, 2006; Gobetz and Martin, 2006; Hembree and Hasiotis, 2008	Voorhies, 1975; Hasiotis, 2002; Hasiotis <i>et al.</i> , 2007

서관 구조가 소형 척추동물에 의한 가능성이 높음을 시사해 준다. 그러나 이 서관 구조의 기원 동물을 구체적으로 알아내기 위해서는 앞으로 우리나라의 백악기 퇴적층에서 보다 다양한 종류의 소형 척추동물 체화석의 발견이 이루어진 후에 가능할 것으로 판단된다.

5.3 고생태적 의미

지난 20여 년간에 이루어진 척추동물 서관 구조에 대한 연구를 통해 척추동물의 고생태 이해를 위

한 다양한 정보가 제시되었다(Schult and Farlow, 1992; Hasiotis *et al.*, 1993, 2004, 1999; Meyer, 1999; Hembree *et al.*, 2004; Buatois and Mángano, 2011; Knaust and Bromley, 2012). 일반적으로 육상 척추동물들이 땅 속에 서관 구조를 짓는 것은 지표 환경에서의 기온 변화나 강우, 포식자 등에 의한 위협 요소로부터의 피난처를 마련키 위한 것으로 (Butler, 1995; Groenewald *et al.*, 2001; Hasiotis *et al.*, 2004), 연구 지역의 서관 구조 산출 특성은 한반도 백악기 초기의 한반도 육성 생태환경을 보다 입

체적으로 이해하는 데에 추가적인 정보가 될 수 있다.

연구 지역의 서관 구조는 범람원 퇴적층에 발달한 것으로, 범람원 퇴적층에 발달하는 생흔 화석의 유형은 주로 절지동물에 의한 무척추동물 생흔과 양서류, 파충류, 포유류, 조류 등에 의한 척추동물 발자국, 그리고 척추동물들의 서관 구조 등이다(Buatois and Mángano, 2011; Knaust and Bromley, 2012). 이와 함께 토양화된 범람원 퇴적층에는 다양한 형태의 석화된 식물뿌리(rhizolith)가 수반되어 있음이 특징이다(Hembree and Hasiotis, 2008; Knaust and Bromley, 2012). 한편 Kim *et al.* (2002)은 하산동층 및 진주층의 범람원 퇴적층으로부터 *Beaconites*, *Palaeophycus*, *Skolithos*, *Thalasinoides* 등의 무척추동물 생흔으로 이루어진 *Palaeophycus* 생흔 화석상을 기재하였다.

연구 지역 서관 구조 퇴적층의 경우 뚜렷이 인지되는 무척추동물의 생흔과 석화식물뿌리들이 관찰되지 않음은 전술한 토양화된 범람원 퇴적층에 발달하는 생흔 화석상의 일반적인 특성과는 차이를 보인다. Hembree and Hasiotis (2008)는 마이오세의 고토양 범람원 퇴적층으로부터 다양한 양상의 척추동물 서관 구조와 무척추동물 생흔 화석, 석화식물뿌리 등이 함께 수반된 생흔 화석상을 기재하여, 범람원 퇴적층에서의 생흔 화석상 특성 변화는 범람원 토양 내의 습도 차이에 따른 것으로 해석하였다.

연구 지역 서관 구조 퇴적층에 석화식물뿌리가 매우 드문 반면 켈크리트의 발달이 일반적인 점은 이 지역 범람원 토양 내의 수분이 상대적으로 부족하였음을 시사해 준다(Hembree and Hasiotis, 2008). 이러한 토양 조건에 따라 토양 내 곤충들의 서식이 제한적이 되었을 것이며, 이는 무척추동물의 생흔 화석이 드물게 된 바탕이 된 것으로 해석된다. 이와 같은 비교적 건조한 석회질의 토양조건은 척추동물이 토양 내에 서관 구조를 유지하고, 그곳에 서식하는 데에 유리한 조건으로 작용하여(Hembree and Hasiotis, 2008), 연구 지역 퇴적층에 서관 구조가 보존된 것으로 해석된다.

연구 지역에 보존된 서관 구조들이 구체적으로 어떤 목적으로 사용되었는지를 명확히 알아내기는 어려운 일이다. 일반적으로 육상에 서식하는 소형 척추동물들의 서관 구조는 지속적인 거주나 계절적 거주의 목적으로 이용되며, 특히 서관 구조 외부의

기온 변화(일변화 또는 계절 변화)로부터의 피난처 기능을 한다(Groenewald *et al.*, 2001). 따라서 육상 척추동물의 서관 구조 화석은 기후 변동이 심했던 지질시대, 즉 페름기 말-트라이아스기 초, 마이오세 말-플라이오세, 플라이스토세 등의 퇴적층으로부터 많이 보고되었다(Groenewald *et al.*, 2001; Hembree and Hasiotis, 2008). 연구 지역의 경우 이들 지질시대에 해당하지는 않으나, 전술한 바와 같이 연구 지역 서관 구조 퇴적층은 건기와 우기가 뚜렷이 변하는 아건조성의 기후 조건에서 쌓인 퇴적층이다. 따라서 연구 지역의 서관 구조는 이러한 기후 조건에서의 적응을 위한 목적으로 사용되었을 가능성이 높다.

전술한 바와 같이 연구 지역의 하산동층 퇴적층에서는 부정고사우루스 골격 화석을 포함하여 종류 미상의 척추동물 골편과 악어 이빨 화석들이 산출되었다. 아울러 부정고사우루스의 꼬리뼈에는 여러 종류 동물에 의한 순차적 포식 흔적이 남겨진 것으로 보고되었다(Paik *et al.*, 2011b). 따라서 이 연구에서 보고하는 서관 구조는 백악기 초 한반도의 충적평원에 형성된 육성 생태시스템에 공룡과 악어, 거북 등의 동물 이외에 땅을 파고 서식하는 소형 척추동물도 함께 관여하였음을 시사해 준다.

6. 결 론

- 1) 경남 하동군 갈사만 부근의 하산동층 중부에 발달한 고토양화된 범람원 퇴적층으로부터 대체로 직경 수 cm 이상을 가지는 특이 형태의 서관 구조가 관찰되었다.
- 2) 이 서관 구조의 발달 특성, 즉 L, T, X자형 등의 다양한 분지, 방의 발달, 외벽부의 파형 또는 요철상 발달, 그루브 발달, 나선형 발달 등의 특성을 복합적으로 고려할 때, 이 서관 구조는 땅에 구멍을 파며 생활하는 소형 척추동물에 의한 것으로 해석된다.
- 3) 연구 지역의 서관 구조 퇴적층이 건기와 우기가 뚜렷이 변하는 아건조성의 기후 조건에서 쌓인 퇴적층임을 고려할 때, 이 서관 구조는 이와 같은 양극성 기후 조건에서의 적응을 위한 목적으로 사용되었을 가능성이 높은 것으로 해석된다.
- 4) 하산동층 내에 땅에 구멍을 파며 생활하는 소형 척추동물에 의한 서관 구조가 보존되어 있음

은 백악기 당시 한반도의 층적평원에 형성된 척추동물 생태시스템에 공룡과 악어, 거북 등의 동물 이외에 땅을 파고 서식하는 소형 척추동물도 함께 관여하였음을 시사해 준다.

- 5) 따라서 앞으로 국내 백악기 육성 생태시스템 연구에 포유류와 파충류 등 소형 척추동물과 관련한 고생물, 고생태, 고환경 등의 연구가 확장되어 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드린다. 이 논문의 내용과 논리의 개선을 위해 세심한 검토와 유익한 지적, 그리고 도움말을 주신 한국지질자원연구원 이용남 박사님과 익명의 심사위원님, 그리고 편집위원이신 충북대학교 이동찬 교수님께 감사를 드린다.

REFERENCES

- Buatois, L. and Mángano, M.G., 2011, *Ichnology: Organism-substrate interactions in space and time*. Cambridge University Press, New York, 358 p.
- Butler, D.R., 1995, *Zoogeomorphology: Animals as Geomorphic Agents*. Cambridge University Press, Cambridge, 231 p.
- Chang, K.H., Lee, Y.G. and Kim, K.H., 1989, Geological map of the Namhae-Seosang sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. 58 p (in Korean with English abstract).
- Choi, H.I., 1985, Sedimentology and its implications for stratigraphic classifications of the Cretaceous Gyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 26-37.
- Choi, H.I., 1986, Fluvial plain/lacustrine facies transition in the Cretaceous Sindong Group, south coast of Korea. *Sedimentary Geology*, 48, 295-320.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-back arc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- D'emic, M.D., 2012, The early evolution of titanosauriform sauropod dinosaurs. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 166, 624-671.
- Doh, S.J., Hwang, C.S. and Kim, K.H., 1994, A paleomagnetic study of sedimentary rocks from Kyeongsang Supergroup in Milyang Sub-basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 211-228 (in Korean with English abstract).
- Dong, Z.M., Paik, I.S. and Kim, H.J., 2001, A preliminary report on a sauropod from the Hasandong Formation (Lower Cretaceous), Korea. In: Deng, T., Wang, Y. (eds.), *Proceedings of the Eighth Annual Meeting of the Chinese Society of Vertebrate Paleontology*. China Ocean Press, Beijing, 41-53.
- Gobetz, K.E., 2006, Possible burrows of mylagaulids (Rodentia: Aplodontioidea: Mylagaulidae) from the late Miocene (Barstovian) Pawnee Creek Formation of northeastern Colorado. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, 119-136.
- Gobetz, K.E. and Martin, L.D., 2006, Burrows of a gopher-like rodent, possibly *Gregorymys* (Geomyoidea: Geomyidae: Entoptychtinae), from the early Miocene Harrison Formation, Nebraska. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, 305-314.
- Groenewald, G.H., Welman, J. and MacEachern, J.A., 2001, Vertebrate burrow complexes from the Early Triassic Cynognathus Zone (Driekoppen Formation, Beaufort Group) of the Karoo Basin, South Africa. *Palaio*, 16, 148-160.
- Hasiotis, S.T., 1993, Ichnology of Triassic and Holocene cambarid crayfish of North America: An overview of burrowing behavior and morphology as reflected by their morphologies in the geological record. *Freshwater Crayfish*, 9, 399-406.
- Hasiotis, S.T., 2002, Continental trace fossils. *SEPM Short Course Notes*, No. 51, 132 p.
- Hasiotis, S.T., Mitchell, C.E. and Dubiel, R.F., 1993, Application of morphologic burrow architects: lungfish or crayfish? *Ichnos*, 2, 315-333.
- Hasiotis, S.T., Miller, M.F., Isbell, J.L., Babcock, L.E. and Collinson, J.W., 1999, Triassic trace fossils from Antarctica: burrow evidence of crayfish or mammal-like reptiles? Resolving crayfish from tetrapod burrows. *Freshwater Crayfish*, 12, 71-81.
- Hasiotis, S.T., Wellner, R.W., Martin, A.J. and Demko, T. M., 2004, Vertebrate burrows from Triassic and Jurassic continental deposits of North America and Antarctica: their paleoenvironmental and paleoecological significance. *Ichnos*, 11, 103-124.
- Hasiotis, S.T., Platt, B.F., Hembree, D.I. and Everhart, M.J., 2007, The trace-fossil record of vertebrates. In: Miller III, W.M. (ed.), *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier, Amsterdam, 196-218.
- Hembree, D.I. and Hasiotis, S.T., 2008, Miocene vertebrate and invertebrate burrows defining compound paleosols in the Pawnee Creek Formation, Colorado, U.S.A. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 270,

- 349-365.
- Hembree, D.I., Martin, L.D. and Hasiotis, S.T., 2004, Amphibian burrows and ephemeral ponds of the Lower Permian Speiser Shale, Kansas: evidence for seasonality in the midcontinent. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 203, 127-152.
- Kang, H.C. and Paik, I.S., 2013, Review on the geological ages of the formations in the Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 17-29 (in Korean with English abstract).
- Kang, P.J. and Park, S.W., 1975, Explanation of the Samga sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea, 16 p (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Kim, K.S. and Pickerill, R.K., 2002, Cretaceous nonmarine trace fossils from the Hasandong and Jinju formations of the Namhae Area, Kyongsangnamdo, Southeast Korea. *Ichnos*, 9, 41-60.
- Kim, J.Y. and Paik, I.S., 1997, Nonmarine *Diplocraterion luniforme* (blanckenhorn 1916) from the Hasandong Formation (Cretaceous) of the Jinju area, Korea. *Ichnos*, 5, 131-138.
- Kim, O.J. and Yoon, S., 1969, Explanatory text of the geological map of Jinju sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 11 p (in Korean with English abstract).
- Knaust, D. and Bromley, R.G., 2012, Trace fossils as indicators of sedimentary environments. *Developments in Sedimentology* vol. 64, Elsevier, UK, 924 p.
- Lee, S.S., Yang, S.Y. and Lee, Y.D., 1990, On the *Brotiopsis* spp. (Cretaceous Non-Marine Gastropod) from the Lower Formations of the Gyeongsang Supergroup, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 143-153 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2012, SHRIMP U-Pb zircon ages of the Nakdong and Ulyeonsan Formations in the Gyeongsang Basin. 2012 Fall Joint Annual Conference of The Geological Societies in Korea (Abstract), Jeongseon, October 24-27, 134 p (in Korean).
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2010, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, Southeast Korea: implications for depositional age and Early Cretaceous igneous activity. *Island Arc*, 19, 647-658.
- Lee, Y.N., 2007, New theropod teeth from the Juji Island (Hasandong Formation), Daedo-ri, Hadong County, South Gyeongsang Province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 151-166.
- Lee, Y.N., 2008, The first tyrannosaurid tooth from Korea. *Geosciences Journal*, 12, 19-24.
- Lee, Y.N., Kim Y.B., Kim, B.C., Lee, Y.S., Song, K.Y. and Lee, H.J., 2006, New vertebrate fossils from the Cretaceous Hasandong Formation of Hadong and Jinju areas, Gyeongsangnam-do. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 22, 330 (in Korean).
- Lee, Y.N. and Lee, H.J., 2005, A new protosuchian (Archosauria: Crocodyliforms) skull from the Hasandong Formation (Lower Cretaceous) of Hadong County, South Korea. *Journal of Vertebrate Paleontology* (Supplement to Number 3), 83A.
- Lee, Y.N. and Lee, H.J., 2007, The first ornithopod tooth in Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 23, 213-225.
- Lee, Y.N., Lee, H.J., Lü, J. and Kobayashi, Y., 2008, New pterosaur tracks from the Hasandong Formation (Lower Cretaceous) of Hadong County, South Korea. *Cretaceous Research*, 29, 345-353.
- Lee, Y.N. and Tomida, Y., 2004, Collection building of vertebrate body fossils in South Korea. *Proceedings of the 5th and 6th Symposium on Collection Building and Natural History Studies in Asia and the Pacific Rim*, National Science Museum Monographs 24, Tokyo, 37-50.
- Martin, A.J., 2001, Probable mammal burrows in the Two Medicine Formation (Late Cretaceous) of Choteau, Montana. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 21, Supplement to Number 3, 77A-78A.
- Martin, A.J., 2009, Dinosaur burrows in the Otway Group (Albian) of Victoria, Australia, and their relation to Cretaceous polar environments. *Cretaceous Research*, 30, 1223-1237.
- Melchor, R.N., Genis, J.F., Farina, J.L., Sánchez, M.V., Sarzetti, L. and Visconti, G., 2010, Large striated burrows from fluvial deposits of the Neogene Vinchina Formation, La Rioja, Argentina: A crab origin suggested by neoichnology and sedimentology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291, 400-418.
- Meyer, R.C., 1999, Helical burrows as a paleoclimate response: *Diamonelix* by *Paleocastor*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 147, 291-298.
- Miller, M.F., Hasiotis, S.T., Babcock, L.E., Isbell, J.L. and Collinson, J.W., 2001, Tetrapod and large burrows of uncertain origin in Triassic high paleolatitude floodplain deposits, Antarctica. *Palaios*, 16, 218-232.
- Paik, I.S., 1998, Vertic paleosols from the Sindong Group: Occurrences, paleoenvironments, and stratigraphy. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 58-72 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Huh, M., So, Y.H., Lee, J.E. and Kim, H. J., 2007, Traces of evaporites in Upper Cretaceous lacustrine deposits of Korea: Origin and paleoenvironmental implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30, 93-107.
- Paik, I.S. and Kim, J.Y., 1995, Calcareous paleosols from the Upper Hasandong Formation in the vicinity of Jinju, Korea: Implications in floodplain sedimentation and

- paleoclimate. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 482-498 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, N.Y. and Kim, H.J., 2011a, Shell deposits in the Lower Cretaceous Hasandong Formation from Daesong-ri Geumnam-myeon, Hadong-gun: Occurrences, taphonomy, paleoenvironments, and implications in Geological Heritage. *Munhwajae*, 44, 4-29 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S., Kim, H.J., Lim, J.D., Huh, M. and Lee, H.I., 2011b, Diverse tooth marks on an adult sauropod bone from the Early Cretaceous, Korea: Implications in feeding behaviour of theropod dinosaurs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 309, 342-346.
- Paik, I.S., Kim, H.J., Kim, K.S., Jeong, E.K. and Kang, H.C., 2012, Report on preservation plan for the Mesozoic Natural Monuments of fossil sites. *Cultural Heritage Administration*, 321 p (in Korean).
- 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 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S. and Lee, Y.I., 1998, Desiccation cracks in vertic palaeosols of the Cretaceous Hasandong Formation, Korea: genesis and palaeoenvironmental implications. *Sedimentary Geology*, 119, 161-179.
- Paik, I.S., Lee, Y.I. and Kim, H.J., 1998, Dinosaur beds of the Gyeongsang Supergroup: Taphonomy and paleoenvironments. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 243-265 (in Korean with English abstract).
- Retallack, G.J., 1990, *Soils of the Past*. Unwin Hyman, Boston. 520 p.
- Retallack, G.J., 1993, Late Ordovician paleosols of the Juniata Formation near Potters Mills, Pennsylvania. In: Driese, S.G. (ed.). *Paleosols, paleoclimate and paleo-atmospheric CO₂: Paleozoic paleosols of Pennsylvania*. *Studies in Geology*, Department of Geological Sciences, University of Tennessee, 22, 33-49.
- Sano, Y., Terada, K., Ly, C. and Park, E.J., 2006, Ion microprobe U-Pb dating of a dinosaur tooth. *Geochemical Journal*, 40, 171-179.
- Sano, Y., Terada, K. and Park, E.J., 2002, Ion microprobe dating of dinosaur tooth: implications for high-level lead exposure. *Goldschmidt Conference Abstracts*, A666.
- Schult, M.F. and Farlow, J.O., 1992, Vertebrate Trace Fossils. In: Maples, C.G., West, R.R. (eds.), *Trace Fossils*. *Paleontological Society Short Course*, no. 5, 34-63.
- Seo, S.J., 1985, Lower Cretaceous geology and paleontology (Charophyta) of central Gyeongsang Basin, South Korea. Ph. D. Thesis, Kyungbuk National University, Daegu, 177 p (in Korean with English abstract).
- Smith, R.M.H., 1987, Helical burrow casts of the aspid origin from the Beaufort Group (Permian) of South Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 60, 155-169.
- Tateiwa, I., 1928, Geological atlas of Chosen, no. 10: Gyeongju, Yongcheon, Daegu and Waegwan sheet. *Geological Survey of Chosen*, 9 p (in Japanese with English abstract).
- Um, S.H., Choi, H.I., Son, J.D., Oh, J.H., Kwak, Y.H., Sin, S.C. and Yun, H.S., 1983, Geological and Geochemical studies on the Gyeongsang Supergroup in the Gyeongsang Basin. *Korea Institute of Energy and Resource Bulletin*, 36, 124 p (in Korean with English abstract).
- Varricchio, D.J., Martin, A.J. and Katsura, Y., 2007, First trace and body fossil evidence of a burrowing, denning dinosaur. *Proceedings of the Royal Society of London*, B274, 1361-1368.
- Voorhies, M.R., 1975, Vertebrate burrows. In: Frey, R.W. (ed.), *The Study of Trace Fossils*. Springer, New York, 325-350.
- Xing, L., Miyashita, T., Zhang, J., Lic, D., Ye, Y., Sekiya, T., Wang, F. and Currie, P.J., 2015, A new sauropod dinosaur from the Late Jurassic of China and the diversity, distribution, and relationships of mamenchisaurids. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 35: 1. e889701, DOI: 10.1080/02724634.2014.889701
- Yun, C.S., Yang, S.Y., Seo, S.J. and Lee, S.S., 2005, Cretaceous gastropod fossil, *Brotiopsis wakinoensis* from the Hanchi area, Hadong, Gyeongsangnam-do. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 21, 167-176 (in Korean with English abstract).

Received : February 2, 2015

Revised : March 13, 2015

Accepted : March 24, 2015