

경상분지 남부에 분포하는 백악기 함안층에 발달한 새 발자국 화석층: 산상, 화석화과정 및 고환경

김현주^{1,2} · 백인성^{1,*} · 허민²

¹부경대학교 지구환경과학과

²전남대학교 지구환경과학부 & 한국공룡연구센터

요약

경상분지 남부에 위치한 진주시 진성면 가진리 지역과 남해군 창선면 가인리 지역, 함안군 칠원면 용산리 지역에 분포하는 함안층에 발달한 새 발자국 화석층에 대한 퇴적학적 연구가 수행되었으며, 이를 바탕으로 새 발자국 화석층의 퇴적환경, 화석화과정 및 고환경적 의미를 해석하였다. 가진리 지역은 함안층의 중하부에 해당되며, 가인리 지역은 중상부, 용산리 지역은 최상부에 해당된다. 가진리 지역의 새 발자국 화석층은 붉은색 이암과 중립 내지 세립사암의 교호암상, 가인리 지역 새 발자국 화석층은 회색 내지 암회색의 이암과 사암의 교호암상, 그리고 용산리 지역의 새 발자국 화석층은 엷층 내지 매우 얇은 층으로 발달한 붉은색 이암과 실트스톤 내지 세립사암의 교호암상이다. 연구지역의 새 발자국 화석층은 모두 건기와 우기가 반복되는 계절성 기후 하에서 층상범람에 의해 형성된 퇴적층으로서, 함안층의 중하부에 해당하는 가진리 지역은 충적평원, 중상부에 해당하는 가인리 지역은 충적평원 내지 호수주변부의 사질 내지 이질평원, 상부에 해당하는 용산리 지역은 호수주변부 이질평원환경으로 해석된다. 연구지역의 층상범람 퇴적층에서는 다양한 형태의 건열, 비대칭 및 대칭의 연흔과 다양한 소형 무척추동물의 생흔화석, 공룡 발자국 화석들이 흔히 관찰되며, 때때로 증발잔류광물혼과 석화목편이 산출된다. 함안층의 새 발자국 화석은 대부분 발자국의 인상이 뚜렷하고 주변이 솟아 있으며, 부분적으로 연흔 및 무척추동물의 생흔화석과 수반되고 드물게 건열과 수반된다. 이는 연구지역의 새 발자국 화석이 층상범람 이후 형성된 얇은 물 속 또는 젖은 바닥면에서 형성되었고, 뒤이은 건기로 짧은 노출을 겪은 후 빠르게 매몰되었음을 지시한다. 물새류에 의해 형성된 함안층의 새 발자국 화석은 대부분 높은 산출밀도와 먹이섭취흔적을 보인다. 이는 당시 새들의 개체수가 많았으며, 이들이 높은 활동성을 가지고 있었음을 암시한다. 이러한 조건들은 함안층에서 새 발자국 화석의 풍부한 산출과 높은 보존 상태의 바탕이 된 것으로 해석된다. 수직층서적으로 함안층의 중하부에서 최상부에 이르기까지, 그리고 충적평원에서 호수주변부에 이르는 환경과 여러 지역에 걸쳐서 다양한 새 발자국 화석이 산출된다는 것은 함안층의 층상범람 퇴적층이 새 발자국 화석의 보존에 중요한 역할을 하였고, 함안층 퇴적 당시 우리나라가 새들의 좋은 서식지로서 활용되었음을 의미한다.

주요어: 백악기, 함안층, 새 발자국 화석층, 화석화과정, 고생태, 고환경

Hyun Joo Kim, In Sung Paik and Min Huh, 2011, Bird footprint-bearing deposits from the Cretaceous Haman Formation in the southern Gyeongsang Basin: occurrences, taphonomy and paleoenvironments. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 47, no. 2, p. 97-122

ABSTRACT: The bird footprint-bearing deposits from the Cretaceous Haman Formation in the southern Gyeongsang Basin were studied at three sites (Gajinri, Gainri, and Yongsanri) and depositional environments, taphonomy, paleoecological and paleoenvironmental implications of the bird footprint-bearing deposits were interpreted. The Gajinri site, Gainri site, and Yongsanri site are the lower middle part, the upper middle part, and the uppermost part of the Haman Formation, respectively. The bird footprints of the Gajinri site occur in alternation of medium- to fine-grained sandstone and mudstone lithofacies deposited on an alluvial plain. The bird footprints of the Gainri site occur in alternation of fine-grained sandstone to siltstone and mudstone lithofacies, which were deposited on an alluvial plain to lake margin (sandflat to mudflat). The bird footprints of the Yongsanri site are preserved in interlaminated to thinly interbedded fine-grained sandstone to siltstone and mudstone lithofacies

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

deposited on a lake margin (mudflat). The bird footprint-bearing deposits of the Haman Formation were formed by sheetflooding on alluvial plain to lake margin (sandflat to mudflat) under seasonal climates with alternation of wetting and drying periods. Various mudcracks, asymmetrical and symmetrical ripple marks, diverse small invertebrate trace fossils and dinosaur footprints are commonly observed, and evaporite mineral pseudomorphs and petrified wood fragments are occasionally present in these sheetflooding deposits. The bird footprints showing deep and distinctive impression and raised rim by trampling are associated with asymmetrical and symmetrical ripple marks and small invertebrate trace fossils on occasion and are rarely associated with mudcracks. It suggests that the footprints were formed on wet substrate or in subaqueous condition after a sheetflooding event and suffered short evaporation caused by subsequent drying prior to rapid burial. The footprints made by shorebirds or waterbirds are commonly dense and bill probe marks are present in places. It is implied that birds were gregarious and had high activities such as trampling and catching foods on a shore. It resulted in abundant occurrence and high preservation of the bird footprints. The abundant occurrence of the bird footprints in several stratigraphical horizons and sheetflooding deposits formed on alluvial plain to lake margin (sandflat to mudflat) of the Haman Formation at various sites suggests that the depositional environments of the Cretaceous Haman Formation provided good habitats for birds under the favorable environmental conditions as well as the high preservational potentials.

Key words: Cretaceous, Haman Formation, bird footprint-bearing deposits, taphonomy, paleoecology, paleoenvironments

(Hyun Joo Kim and In Sung Paik, Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea; Hyun Joo Kim and Min Huh, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences & Korea Dinosaur Research Center, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea)

1. 서 언

우리나라의 새 발자국 화석은 백악기 경상분지의 함안층(백광석과 양승영, 1998; Kim, 1969; Kim *et al.*, 2006)과 진동층(백광석과 서승조, 1998; 김현주 외, 2008; Lockley *et al.*, 1992, 2006), 그리고 해남분지의 우항리층(Yang *et al.*, 1995)에 이르기까지 다양한 지역과 지층에서 보고되고 있다. 지금까지 우리나라 백악기 퇴적층에서 명명된 새 발자국 화석은 물갈퀴가 있는 것을 포함하여 총 6속 6종에 달한다. 이는 전 세계적으로 보고된 중생대 새 발자국 화석의 약 34%를 차지하는 것으로(김정률 외, 2009), 우리나라가 중생대 백악기 새 발자국 화석지로서 가치가 높은 지역일 뿐만 아니라, 다양한 종의 발견으로 백악기 당시 새의 종에 관한 연구와 더불어 새의 진화와 생태에 대한 연구지로서의 가치가 높다는 것을 반영하는 것이다.

특히 함안층은 Kim (1969)에 의해 함안군 칠원면 용산리에서 *Koreanaornis hamanensis*가 최초로 명명된 이후, 백광석과 양승영(1998)에 의해 진주시 진성면 가진리에서 *Koreanaornis hamanensis*, *Jindongornipus kimi*, *Uhangrichnus chuni*가 보고되었고, 같은 지역에서 Lim *et al.* (2000)에 의해 분류되지 않은 물갈퀴가 있는 새 발자국 화석이 보고되었으며, Kim *et al.* (2006)에 의해 남해군 창선면 가진리에서 가장 오래

된 물갈퀴가 있는 발자국인 *Ignotoris yangi*가 보고된 바가 있다. 이 지역들은 새 발자국 화석과 함께 공룡 발자국 화석도 산출되는 지역으로서, 천연기념물로 지정되어 지질문화재로서의 중요성을 인정받고 있고, 진주시 진성면 가진리 지역의 경우는 경남과 학교육원에서 화석전시관을 개설하여 유소년 및 청소년을 위한 교육자원 뿐만 아니라 일반인들을 위한 관광자원으로 활용되고 있다.

이처럼 우리나라는 중생대 새 발자국 화석을 이해하는 데에 매우 중요한 산출지로 인식되고 있어 이에 대한 고생물학적 연구는 여러 연구자에 의해 꾸준히 이루어져 왔다(백광석과 서승조, 1998; 백광석과 양승영, 1998; Lockley *et al.*, 1992, 2006; Lim *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2006). 최근 들어 새 발자국 및 공룡 발자국 화석을 포함한 발자국 화석층에 대한 퇴적학적 연구를 바탕으로 화석화과정과 고환경을 해석하는 연구가 이루어지고 있으나(김현주 외, 2008; Paik *et al.*, 2001a), 공룡 발자국 화석에 비해 상대적으로 새 발자국의 보존과정 및 화석화과정에 대한 연구와 지질시대 동안 존재했던 새들의 습성, 서식지 등을 포함한 고생태 및 고환경 해석에 관한 연구는 다소 미흡한 실정이다.

화석은 당시 서식했던 생물의 기록으로서, 지형 및 지리, 기후 등과 같은 서식지의 환경적인 요인의

영향을 받는다. 이러한 환경적 요인의 변화에 의해 서식했던 생물상이 변화하고 이로 인해 먹이 그물도 변화될 수 있다. 환경적 요인에 대한 정보는 화석을 함유한 지층의 퇴적학적 기록을 통해 획득될 수 있으므로 고생태환경 연구에 퇴적학적 연구정보는 필수적인 요소가 된다. 따라서 이 연구에서는 경상분지 남부에 위치한 경남 진주시 진성면 가진리 지역과 남해군 창선면 가인리 지역, 함안군 칠원면 용산리 지역 등에 분포하는 함안층에 발달한 새 발자국 화석층을 대상으로 산출특성에 대한 퇴적학적 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 새 발자국 화석층의 퇴적환경, 화석화과정 및 고환경적 의미를 비교 해석하였다. 이 연구의 결과는 국내 새 발자국에 대한 고생태 및 고환경 해석에 바탕자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 층서 및 지질개관

백악기 경상분지의 밀양지괴에 속하는 함안층은 1:50,000 지질도엽 마산도폭(김종환과 김정택, 1963), 진동도폭(박노영과 지정만, 1963), 의령도폭(최유구와 김태열, 1963) 등에서 설정되었고, 경남 사천에서 대구에 이르기까지 북동-남서 방향으로 넓게 분포한다. 함안층의 하한은 신라역암의 조립 내지 중립 역질 사암이 끝나고 붉은색의 이암과 얇은 층의 판상의 사암 내지 실트스톤이 협재하기 시작하는 층준, 상한은 진동층의 암회색 내지 흑색 이암이 나타나기 시작하는 층준으로 설정되어 있으며(엄상호 외, 1983), 함안층의 상부에는 경상분지의 건층 역할을 하는 구산동응회암이 발달한다(장기홍 외, 1977, 1998). 장기홍 외(1998)는 구산동응회암 내의 저어콘을 대상으로 한 CHIME 연대측정에 의해 함안층의 지질시대를 Aptian 후기에 대비하였다. 그러나 Jwa *et al.* (2009)는 저어콘의 U-Pb 연대측정을 통해 구산동응회암의 분출시기를 97~96 Ma (Cenomanian)로 한정하였고, 김찬수 외(2005)는 함안층의 하위에 놓이는 신라역암 내 화산암력의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 통해 함안층의 퇴적시기를 Albian 후기에서 Cenomanian까지로 제시한 바 있다. 근래 들어 경상누층군의 연대측정에 관한 연구를 통해서 신동층군의 지질시대가 Late Aptian-Late Albian (Lee *et al.*, 2010)으로 짧게 나타나고 있다는 사실들을 고려할 때 함안층은 백악기

후기에 형성된 지층으로 여겨진다.

함안층은 아열대 내지 열대에 이르는 기후 하의 충적평원환경에서 퇴적된 지층으로 퇴적 당시 하천의 발달 없이 우기 시 분지의 가장자리에서 때때로 간헐적인 하천이 발달하였고, 층상류(sheet flow)에 의해 분지 중앙으로 퇴적물이 유입되어 형성된 것으로 해석되었다(장기홍, 1978; 엄상호 외, 1983; Choi, 1986). 함안층은 이러한 퇴적과정을 통해 형성된 판상의 사암 내지 실트스톤이 퇴적된 후 붉은색 이암이 얇게 피복하는 암상이 주를 이룬다. 판상의 사암 내지 실트스톤에서는 평행층리나 사층리, 연흔 등이 나타나고, 붉은색의 이암에서는 연흔 및 건열 등이 흔히 관찰되며, 우흔과 생흔, 다양한 새 발자국 화석 등이 보고된 바 있다(장기홍, 1967, 1978; 엄상호 외, 1983; Kim, 1969; Choi, 1986; Lim *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2006). 경남 사천시 신수도에 분포하는 함안층에서는 익룡 발자국 화석(Kim *et al.*, 2006)과 공룡 알 껍질 화석 및 탄화목 화석이 발견되었으며(윤철수 외, 2004), 이 알껍질 화석층의 고환경은 충적평야의 범람원 환경으로 해석되었다(Paik *et al.*, 2005). 또한 신수도 지역의 함안층에서는 호수주변부 퇴적층의 윤회퇴적작용이 보고되었고, 이들은 건기와 우기의 계절적인 변화와 이에 따른 층상범람 에너지의 변화 및 단기 내지 장기적 기후변화의 결과에 의한 것으로 해석되었다(소운환 외, 2007). 최근 Paik *et al.* (2010)과 Kim *et al.* (2010)에 의해 사천지역과 남해지역에 분포하는 함안층에서 공룡 피부 화석이 보고된 바 있다. 연구지역인 경남 진주시 진성면 가진리 지역은 함안층 중하부에 해당되며, 남해군 창선면 가인리 지역은 중상부, 함안군 칠원면 용산리 지역은 최상부에 해당된다(그림 1). 가진리 지역의 함안층을 구성하는 암석은 붉은색 이암 및 사암이 주를 이루고, 가인리 지역의 함안층을 구성하는 암석은 회색 내지 암회색 이암 및 셰일과 사암 등이며, 용산리 지역의 함안층을 구성하는 암석은 붉은색 이암과 세립사암 및 실트스톤이 주를 이룬다. 각 지역에서는 새 발자국 화석 뿐만 아니라 공룡 발자국 화석이 함께 산출된다.

3. 새 발자국 화석의 유형 및 산상

3.1 진주시 진성면 가진리

가진리 지역의 새 발자국 화석은 천연기념물 제

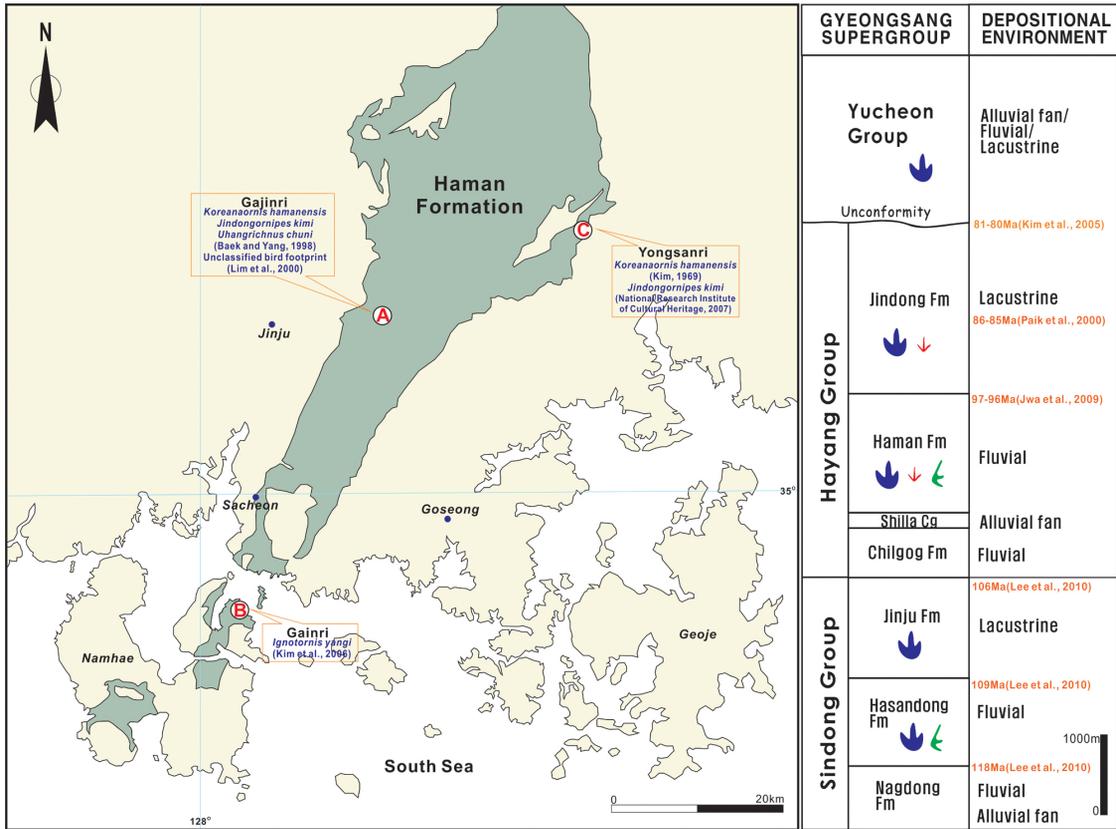


Fig. 1. Distribution and stratigraphy of the Cretaceous Haman Formation and location of the study sites.

395호로 지정되어 있으며, 현재 경남과학교육원에서 관리 및 운영하고 있는 두 개의 화석전시관 내에 보존되어 있다. 이 지역에서는 *Koreanaornis hamanensis*, *Jindongornipes kimi*, *Uhangrichnus chuni* (백광석과 양승영, 1998)와 분류되지 않은 물갈퀴가 있는 새 발자국 화석(Lim et al., 2000)이 보고되었다(그림 2). 백광석과 양승영(1998)은 새 발자국 화석들이 총 3개의 층준에서 산출되며, 각 유형들이 같은 층면에 함께 나타나지 않고 상호 배타적이고 간혹 *Koreanaornis hamanensis*와 *Jindongornipes kimi*가 함께 나타나는 경우가 있음을 기재하였다. 그 가운데 *Koreanaornis hamanensis*의 경우는 대체적으로 방향성을 파악하기 어려운 정도로 밀집된 산출을 보이고, 밀집도가 낮은 표본에서는 보행열이 인지되는 것으로 기재된 바 있다(백광석과 양승영, 1998).

이 연구에서는 두 개의 화석전시관 내에 있는 새 발자국 화석층에서 제 1화석전시관에서 두 개의 층

준, 제 2화석전시관에서 한 개의 층준을 관찰하였고, 이와 함께 전시된 시료들을 관찰하였다. 그 결과 *Koreanaornis hamanensis*와 *Uhangrichnus chuni*는 함께 산출되며, *Koreanaornis hamanensis*와 *Jindongornipes kimi*도 함께 산출되고, 분류되지 않은 물갈퀴가 있는 새 발자국 화석과 *Koreanaornis hamanensis*가 함께 산출됨을 확인하였다.

제 1화석전시관의 두 개의 층준 가운데 하부 층준에서는 높은 산출밀도를 보이는 *Koreanaornis hamanensis* (그림 3A)와 보행열이 잘 발달한 분류되지 않은 물갈퀴가 있는 새 발자국이 함께 관찰된다(그림 3C, 3D). 이들은 동일한 층준에서 산출되지만 *Koreanaornis hamanensis*가 집중되는 부분과 물갈퀴가 있는 새 발자국이 산출된 부분이 다소 독립적으로 분포한다. 한편 물갈퀴가 있는 새 발자국 화석이 산출되는 부분에서는 우수연흔이 잘 발달되어 있다. 물갈퀴가 있는 새 발자국의 보행열은 보통 우수연흔의 정선방

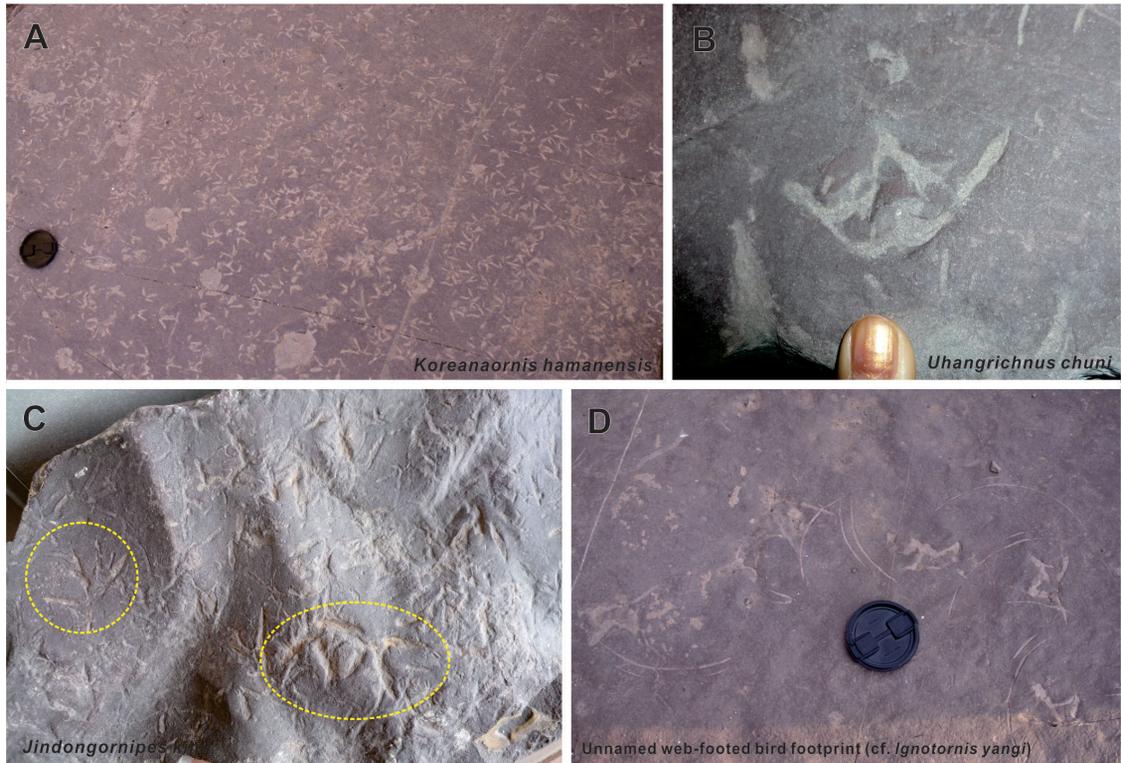


Fig. 2. Diverse bird footprints reported from the Haman Formation at the Gajinri site.

향과 거의 수직적인 방향을 이루고(그림 3C), 때때로 거의 직각방향으로 보행방향의 전환이 나타나기도 하며(그림 3D) 미약한 지그재그 방향을 보이기도 한다. 이들의 보행열과 함께 먹이 섭취 및 사냥을 지시하는 부리흔적이 수반된다(Lim *et al.*, 2000). 이러한 부리흔적은 두개의 원호형이 일정한 간격을 이루면서 좌우 반복적으로 보행열과 함께 발달되어 있다(그림 3C). 또한 최근 Falk *et al.* (2010)에 의해 *Koreanaornis hamanensis*와 부리흔적이 함께 산출됨이 보고된 바 있다.

가진리 지역의 새 발자국 화석들은 중간층 내지는 얇은 층으로 발달된 중립 내지 세립사암을 피복하는 붉은색 이암엽층에서 산출된다. 이들 새 발자국 화석은 대체적으로 인상은 깊고 뚜렷하며, 발뒤꿈치까지 선명하게 잘 보존되어 있고 발자국의 주변은 때때로 솟아있는 것이 일반적이다. 또한 발자국의 인상은 전반적으로 양호한 형태를 가지나, 간혹 찌그러진 형태를 가지기도 하며(그림 3F), 하나의 발자국에서도 발가락의 인상의 깊이가 다소 차이가 나

는 양상이 간혹 관찰된다. 이러한 형태는 평탄하지 않고 다소 굴곡진 층면에 발달되어 있거나 때때로 비대칭연흔이나 설상연흔 위에 발달되어 있다. 또한 이 지역의 새 발자국 화석은 연구지역 퇴적층에서 흔히 발달한 건열을 거의 수반하지 않으나, 연흔, 우흔, 주름구조(wrinkle mark), 생흔 등과는 수반(그림 3E)되는 경향을 보인다. 생흔 중에는 길이 4 m 이상의 직선형 기어간 자국도 관찰된다. 연구지역의 새 발자국 화석은 때때로 공룡 발자국 화석과 함께 나타나기도 하고, 간혹 공룡 발자국의 내부에 새 발자국 화석이 발달된 양상을 보이기도 한다(그림 3B).

3.2 남해군 창선면 가인리

가인리 지역은 천연기념물 제 499호로 지정된 공룡 발자국 화석지가 분포하는 곳이다. 또한 이 지역에서는 가장 오래된 물갈퀴가 있는 새 발자국 화석인 *Ignotornis yangi*가 보고되었고, 이 화석은 이암과 사암의 교호층 내의 이암에서 산출된다(Kim *et al.*, 2006). 가인리 지역의 *Ignotornis yangi*의 인상은 깊

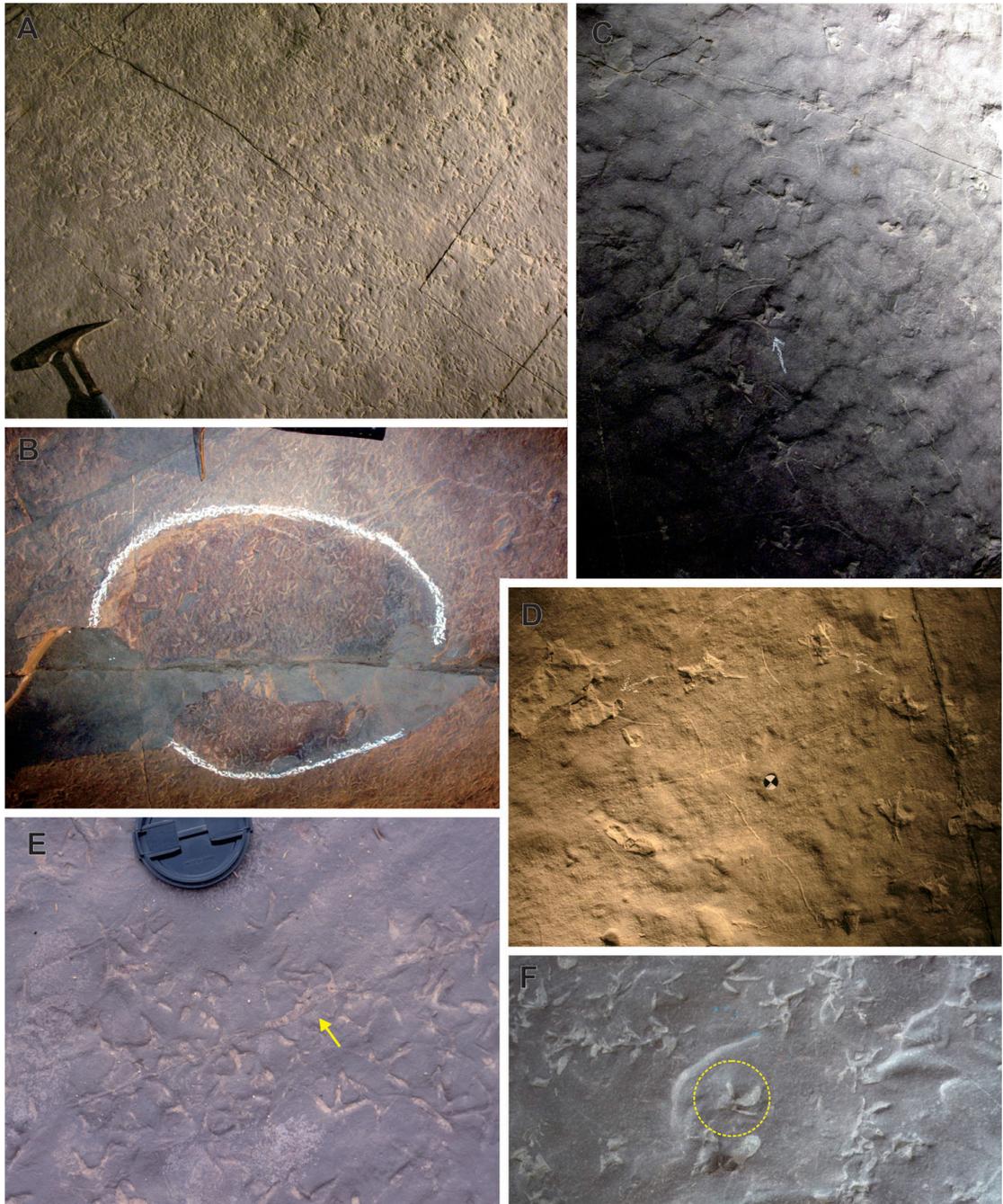


Fig. 3. Occurrences of the bird footprints at the Gajinri site. A. A large number of bird footprints occur in a relatively small area. B. Bird footprints preserved in dinosaur footprints. C. Webbed bird trackway associated with feeding trace (bill probe mark) and asymmetric ripple mark. D. Webbed bird trackway showing nearly perpendicular turn. E. Invertebrate trails (arrow) are associated with bird footprints on occasion. F. Deformed bird track.

고 선명하며, 보행열이 잘 나타난다(Kim *et al.*, 2006). 이 연구에서는 Kim *et al.* (2006)에 의해 보고된

새 발자국 화석 산출층 이외 다른 층에서도 새 발자국 화석을 확인하였다. 이 발자국 화석 역시 이암

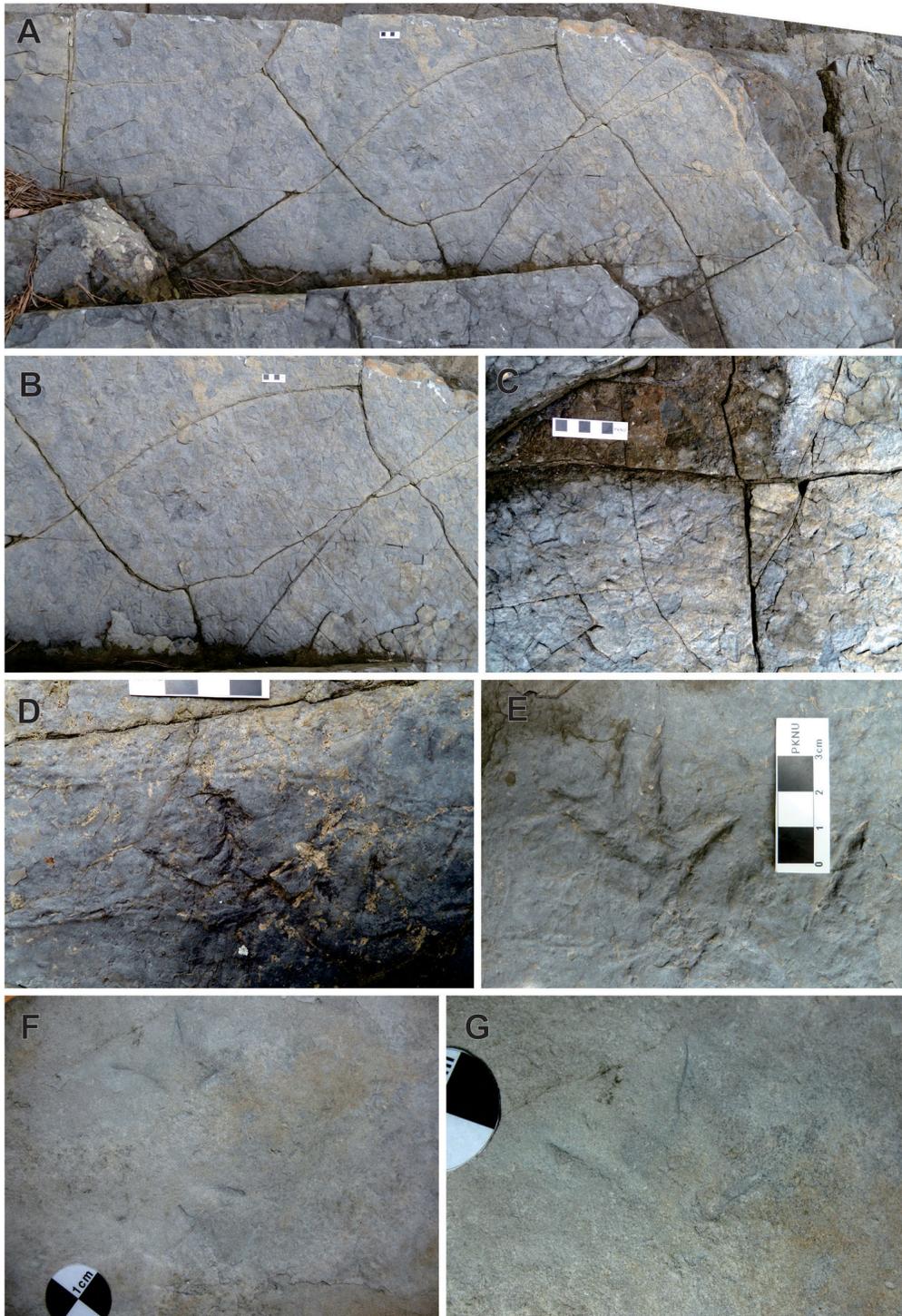


Fig. 4. Occurrences and types of the bird footprints at the Gainri site. A. Overall view of the bird footprint-bearing bed. B. Close view of A. Mudcracks and ripple marks are associated. C. Dense occurrence of bird footprints. D. Webbed bird footprint. E. Superimposed webbed bird footprints showing raised rim. F, G. Underprints preserved in fine-grained sandstone.

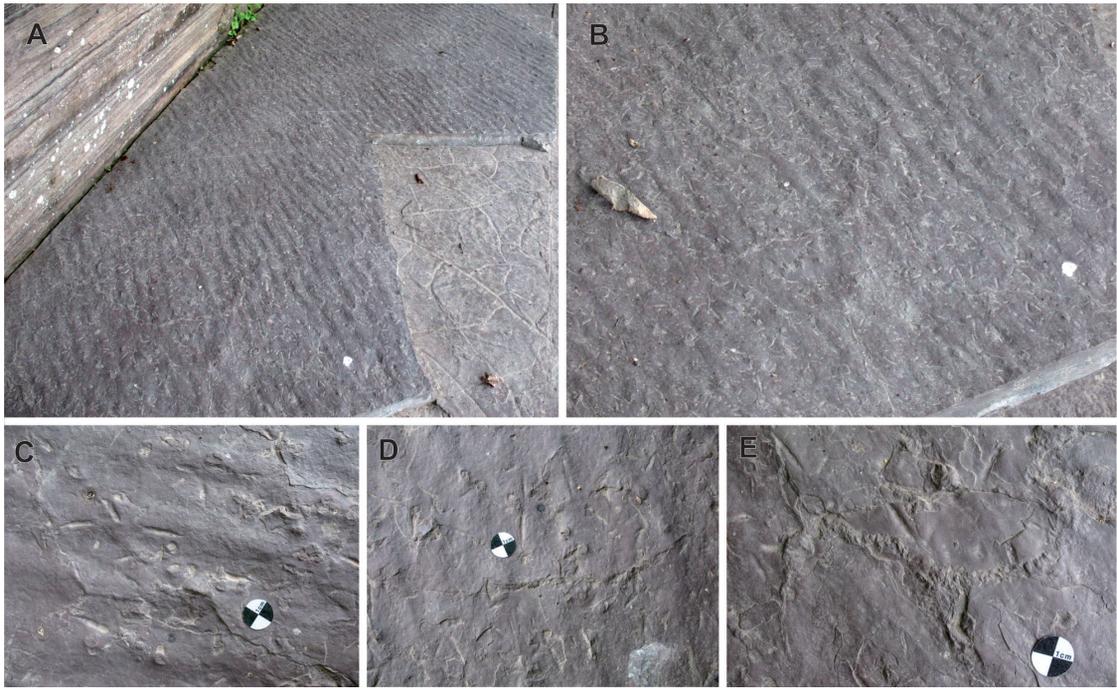


Fig. 5. Occurrences of the bird footprints at the Yongsanri site. A. Overall view of the bird footprint-bearing bed. B. Dense occurrence of bird footprints. Symmetrical ripple marks are associated. C. Feeding trace (peck mark) associated with bird footprints. D. Incomplete mudcracks. E. Invertebrate trace fossils.

과 사암의 교호암상에서 산출되며, 방향성 없이 비교적 밀집되어 나타난다(그림 4A, 4B, 4C). 이 층에서는 물갈퀴가 선명한 새 발자국(그림 4D, 4E)과 물갈퀴가 없는 새 발자국이 동시에 산출된다. 이들 새 발자국 화석은 발자국의 주변이 솟아있고, 발톱의 인상은 깊고 선명하나 뒤꿈치의 인상은 상대적으로 얇고 희미하며, 대체적으로 발가락이 서로 독립적으로 나타나고 hallux는 보이지 않는다. 이들은 Kim *et al.* (2006)이 보고한 *Ignotornis yangi*와는 다른 형태적 특성을 보인다. 이러한 새 발자국 화석들은 연흔 및 다각상의 건열을 수반하나(그림 4A, 4B), 이 건열은 새 발자국 화석이 형성된 층준의 것이 아니라 상위층 건열의 연장부이다.

한편 일부 전석에서 세립사암에 보존된 새 발자국 화석을 관찰하였다(그림 4F, 4G). 이는 발가락 III의 끝부분을 제외하고는 대체로 함몰깊이가 얇고 그 인상이 선명하지 않다. 일반적으로 모래 위에 형성된 새 발자국의 경우는 보존되기가 쉽지 않다는 점과 발가락 III의 끝부분에 부분적으로 이암이 잔존된 것으로 미루어 볼 때, 사암을 피복한 이암이 발자국

이 찍힌 면이며, 사암에 보존된 새 발자국 화석은 하흔(underprint)로 여겨진다.

3.3 함안군 칠원면 용산리

용산리 지역은 Kim (1969)에 의해 *Koreanaornis hamanensis*가 보고된 이후 천연기념물 제 222호로 지정되었다. 이 지역의 새 발자국 화석은 엽층 내지 매우 얇은 층으로 발달된 세립사암 내지 실트스톤과 붉은색 이암의 교호암상 내 붉은색 이암에서 산출된다. 새 발자국 화석은 1개의 층준에서 확인되었고, 대부분 *Koreanaornis hamanensis*로서 방향성 없이 산발적으로 밀집되어 산출된다(그림 5A, 5B). 또한 드물게 *Jindongornipes kimi*가 산출됨이 보고되었다(국립문화재연구소, 2007). 이들 발자국의 깊이는 비교적 깊은 편이고, 그 인상은 선명하여 발톱자국이 잘 나타난다. 그러나 뒤꿈치는 희미하게 보존되어 있거나 나타나지 않으며, hallux는 보존되어 있지 않고 발가락 II 또는 IV가 나타나지 않은 경우도 있다. 발자국과 함께 먹이 섭취나 사냥을 위해 부리로 쪼른 것으로 추정되는 흔적(peck mark)도 함께 산출

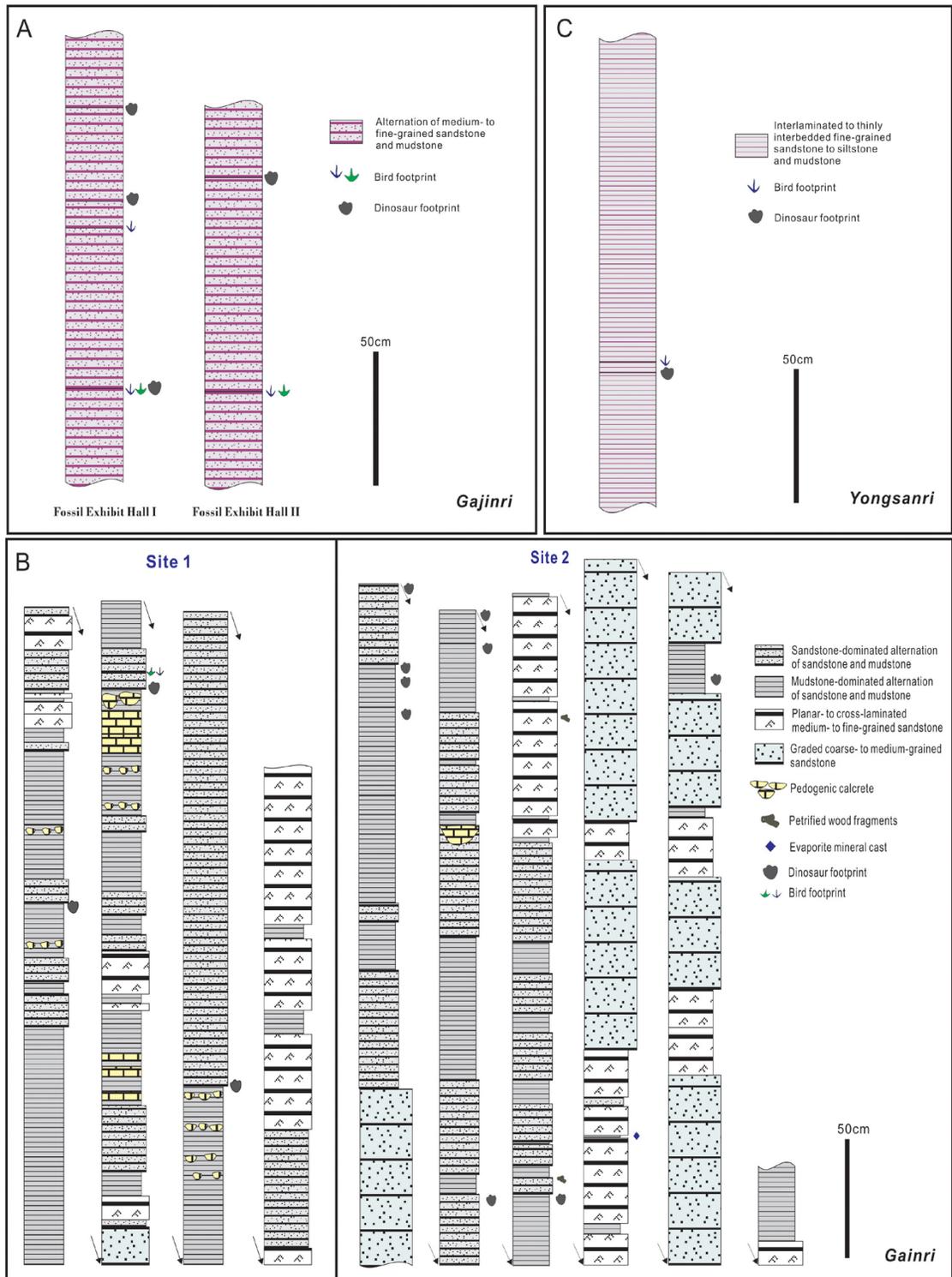


Fig. 6. Stratigraphic sections of the bird footprint-bearing deposits from the Haman Formation at study sites.

된다(그림 5C). 이러한 새 발자국 화석은 연흔의 정선이 선형 내지 아선형인 파랑연흔(wave ripple)의 위에 밀집되어 산출되고(그림 5A, 5B), 생흔과 수반된다(그림 5E). 또한 새 발자국 화석과 함께 건열이 간혹 산출되는데, 이들은 미약한 발달로 인해 불완전한 형태를 보인다(그림 5D).

4. 새 발자국 화석층의 퇴적암상 및 퇴적환경

4.1 진주시 진성면 가진리

이 지역의 퇴적층을 구성하는 주요 암석은 담회색 내지 담적색의 중립 내지 세립사암과 붉은색의 이암으로, 보통 얇은 층 내지 중간층 두께의 사암을 엽층상의 이암이 피복한 양상이 반복적으로 발달되어 있다.

4.1.1 중립 내지 세립사암과 이암의 교호암

(Alternation of medium- to fine-grained sandstone and mudstone)

기재 : 연구지역 함안층의 새 발자국 화석층을 구성하는 이 암상은 담회색 내지 담적색의 중립 내지 세립사암과 붉은색 이암의 교호암으로, 붉은색 이암의 엽층이 담회색 내지 담적색의 사암층을 덮으며, 이들이 하나의 커플릿(couplet)을 이루면서 반복적으로 발달되어 있다(그림 6A, 7A).

담회색 내지 담적색의 중립 내지 세립사암은 대부분 얇은 층 내지 중간층의 두께로 발달되어 있고, 때때로 엽층으로 발달된다. 사암층은 보통 점이적으로 상향세립화하는 양상을 보이며, 부분적으로 이암의 파편을 함유하고 있고(그림 7I) 때때로 판상엽층리나 사암층리가 발달하기도 한다. 이러한 사암을 피복하는 붉은색의 이암 엽층에서는 다양한 크기와 형태의 건열(그림 7D, 7E, 7F), 우흔(그림 7G), 무척추동물의 생흔(그림 7H) 등이 흔히 산출된다. 붉은색 이암에 발달된 건열은 그 크기와 폭도 다양하며, 형태적으로는 다각상 또는 직각상이 일반적이나, 때때로 갈라진 이후 솟은 티피구조의 형태를 보이기도 한다.

이 암상에는 흔히 연흔이 발달되어 있는데(그림 7A, 7B, 7C), 이들은 대체로 우수연흔으로서 비대칭형 또는 설상으로 산출되며, 드물게 대칭적인 파랑연흔이 관찰되기도 한다. 비대칭 연흔은 때때로 동

일한 층준 내에서도 방향이 바뀌거나 소멸되는 경우가 관찰되기도 한다. 가진리 지역의 비대칭 연흔의 일반적인 파장은 5-6 cm에 달하며 파고는 보통 1-2 cm 내외이고 다양한 방향성을 보인다(그림 11). 비대칭적인 우수연흔이 유수의 방향과 평행한 연흔 정선을 보이는 파장이 약 1 cm 내외의 파랑연흔으로 이어지는 종형연흔(longitudinal ripple)도 관찰된다(그림 7B, 7C). 이 암상의 붉은색 이암 엽층에서는 새 발자국 화석과 공룡 발자국 화석이 산출된다.

해석 : 연구지역 함안층의 새 발자국 화석층을 구성하는 중립 내지 세립사암과 이암의 교호암상은 담회색 내지 담적색 사암과 붉은색 이암의 커플릿의 반복적인 발달로 형성된 것이다. 담회색 내지 담적색 사암과 붉은색 이암의 커플릿은 1회의 일시적인 층상범람을 의미하는 것으로, 우기 동안 층상범람으로 인해 형성된 층상류(sheetflow)의 에너지가 시간이 지나면서 점차 감소하며 퇴적된 것으로 해석된다(엄상호 외, 1983). 붉은색 이암에서는 흔히 건열이 산출되는데, 이는 우기에 발생한 층상범람 이후 건기의 도래로 대기 중 노출을 겪었음을 의미하며, 우흔과 무척추동물의 생흔, 척추동물의 발자국 화석들이 흔히 나타나는 것은 건조한 기후였음을 지시한다(김현주 외, 2008). 따라서 연구지역의 새 발자국 화석층인 담회색 내지 담적색의 사암층과 붉은색 이암엽층의 교호암상은 건조 내지 아건조성 기후조건 하에서 건기와 우기가 반복적으로 발달하는 계절성 기후의 층적평원환경에서 층상범람에 의해 기원한 것(Eberth *et al.*, 2000; Coria *et al.*, 2002)으로 해석된다. 이 암상에서 다양한 방향성을 보이고 때때로 방향의 전환이 나타나는 연흔의 산출은 퇴적층의 형성 당시 산발적으로 층상범람이 형성되었음을 뒷받침한다. 또한 비대칭적인 우수연흔이 유수의 방향과 평행한 연흔 정선을 보이는 파랑연흔으로 이어지는 종형연흔은 우수와 파랑의 조합에 의해 형성된 혼성류(combined current)에 의한 것으로서(Reineck and Singh, 1973), 층상범람이 발생한 층적평원 상에 소규모의 물웅덩이가 존재하였으며, 이 물웅덩이의 파랑과 층상범람으로 형성된 유수가 조합되어 형성된 것으로 여겨진다.

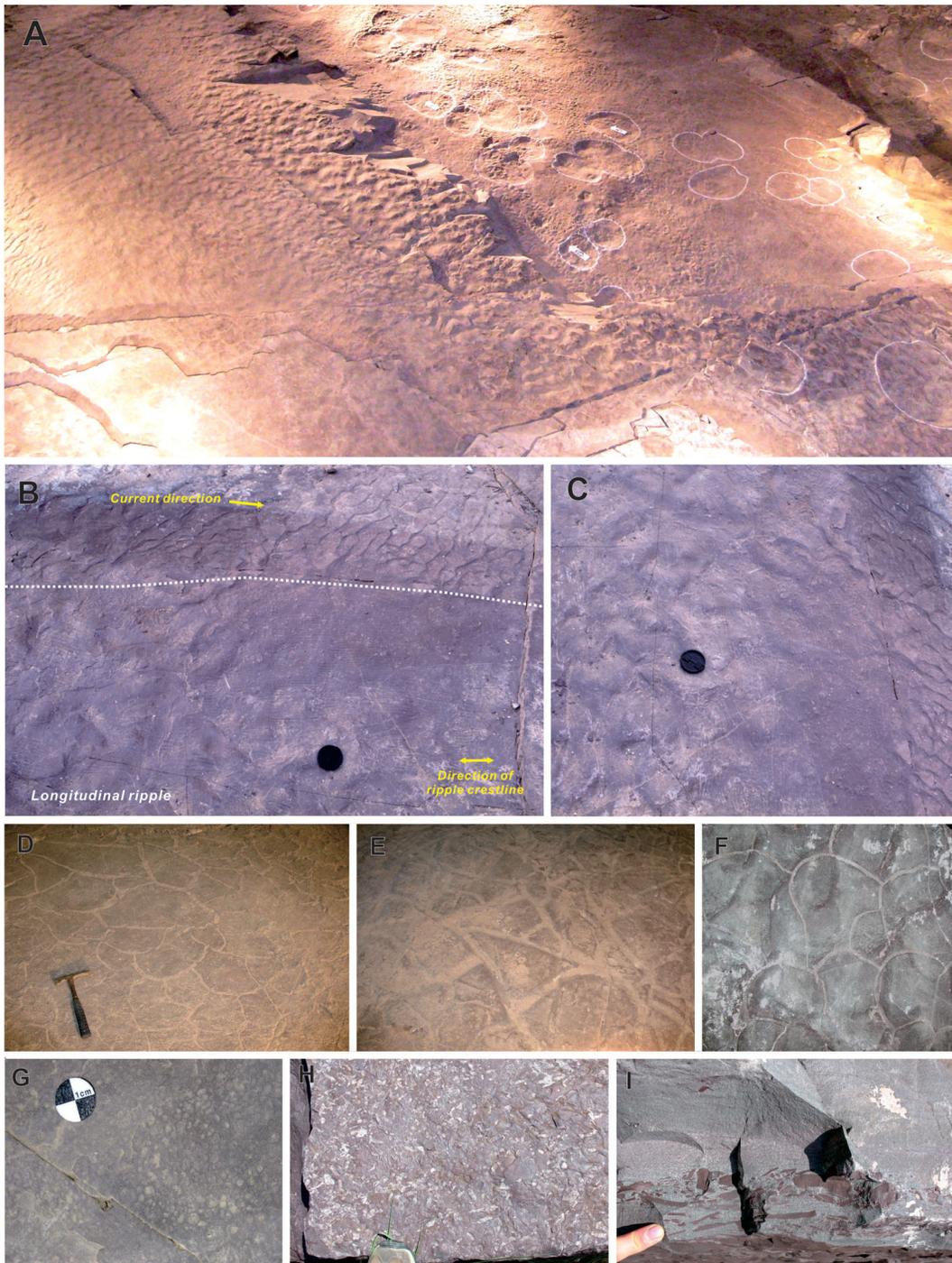


Fig. 7. Occurrences of the bird footprint-bearing deposits at the Gajinri site. A. Overall view of study area. Diverse ripple marks and dinosaur trackways are formed in alternation of sandstone and mudstone lithofacies. B, C. Longitudinal ripple. Current ripple and wave ripple occur in a same horizon and the direction of the wave ripple crestline is parallel to current direction. D-F. Mudcracks commonly developed in alternation of sandstone and mudstone lithofacies. G. Raindrop impression preserved in reddish mudstone laminae. H. Bioturbation. I. Intraformational mudstone chips in graded sandstone.

4.2 남해군 창선면 가인리

이 지역은 암회색 내지 회색의 이암과 회색 내지 담회색 사암이 주구성 암석으로서, 암회색 내지 회색의 이암은 주로 엽층 내지 얇은 층으로 발달되고, 회색 내지 담회색 사암은 엽층에서 두꺼운 층에 이르기까지 다양한 두께로 발달된다. 이들은 대체적으로 교호하며 발달되어 있다(그림 8A).

4.2.1 사암 내지 실트스톤과 이암의 교호암

(Alternation of sandstone to siltstone and mudstone)

기재: 이 암상은 암회색 내지 회색을 띠는 이암과 회색 내지 담회색을 띠는 사암 내지 실트스톤의 교호암상으로서 이암과 사암의 발달양상에 따라 대체적으로 두 개의 유형, 즉 사암이 우세한 교호암상과 이암이 우세한 교호암상으로 구분되며(그림 8B), 이 두 암상은 서로 교호하며 반복적으로 나타난다(그림 6B). 사암이 우세한 교호암상은 중립질 사암이 지배적이면서 비교적 두껍게 발달되며, 이암이 우세한 교호암상은 세립질 사암 내지 실트스톤이 엽층의 규모로 얇게 발달되고 이암이 상대적으로 두껍게 발달하는 양상을 보인다. 사암과 이암의 두께 차이는 있으나, 두 유형은 동일한 퇴적특성을 보인다.

이암에서 사암 내지 실트스톤으로 가는 경계는 침식적이며, 사암 내지 실트스톤에서 이암으로 가는 경계는 점이적인 양상을 보인다. 사암에서는 때때로 판상 내지 사엽층리가 발달되고, 이암에서는 흔히 다각상 또는 직각상의 건열이 발달(그림 9A)되며 우흔(그림 9I)과 다양한 형태와 크기를 갖는 생흔(그림 9E, 9F)가 관찰된다. 또한 이암이 우세한 교호암상에서는 증발잔류광물(halite)의 캐스트(그림 9G)와 *Cochlichmus* 생흔화석(그림 9F)이 산출되었다. 이 암상에서는 연흔이 흔히 발달되는데, 비교적 대칭적인 파랑연흔이 우세하게 산출되나(그림 9B) 비대칭적인 우수연흔도 간간히 산출된다. 이들 연흔의 정선 방향은 비교적 다양하게 나타난다(그림 11). 또한 때때로 탄화된 식물화석 파편이 산출되며, 부분적으로 고도양 기원의 단괴상 캘크리트가 수반되어 있다. 이 암상에서는 새 발자국 화석과 공룡 발자국 화석(그림 9D)이 산출되며, 전석에서 다양한 형태의 툴마크(그림 9H)가 관찰되었다.

해석: 이 암상은 사암과 이암이 엽층 내지 얇은 층의 규모로 발달되고 점이층리가 발달된다는 점과 흔히 노출의 흔적이 산출되는 점으로 미루어 층상범람(Hardie *et al.*, 1978; Calvo *et al.*, 1989; Smoot and Lowenstein, 1991)에 의해 퇴적되었음을 암시한다. 연구지역의 이 암상은 인접한 신수도 지역에 분포하는 건기와 우기의 계절성 기후의 호수주변부 퇴적층으로 해석된 함안층(소운환 외, 2007)과 동일한 산출특성을 보인다. 뿐만 아니라 우리나라 백악기 호수주변부 퇴적층으로 해석된 진동층과 여수지역 유천층군 퇴적층(김현주와 백인성, 2001; 백인성 외, 2009; Paik and Kim, 2006)과도 유사한 산상을 보인다. 이는 이 암상이 호수주변부환경에서 층상범람에 의해 형성된 것임을 지시한다. 또한 건열과 때때로 발달하는 캘크리트 단괴는 당시 기후가 전반적으로 건조했음을 지시한다. 또한 드물게 증발잔류광물흔이 존재함은 건조한 기후와 다소 염도가 높은 물이 존재했음을 암시한다(Paik and Kim, 2006). 따라서 이 암상은 전반적으로 건조한 기후가 우세한 가운데 건기와 우기가 반복되는 계절성 기후 하의 호수주변부 사질 내지 이질평원환경에서 층상범람에 의해 퇴적된 것으로 해석된다.

4.2.2 판상 내지 사엽층리가 발달된 중립 내지 세립사암

(Planar- to cross-laminated medium- to fine-grained sandstone)

기재: 이 암상은 얇게는 3-4 cm, 두껍게는 20 cm 내외의 얇은 층 내지 중간층의 규모를 가진다(그림 8C). 이 암상의 하부는 보통 침식적이고 뚜렷한 경계를 보이면서 때때로 이암의 파편을 함유하고, 상부로 가면서 점차 세립화되는 경향을 보이며, 상부는 보통 이암의 박엽층으로 피복되어 있다. 이 암상에서는 연흔이 산출되며, 사암을 피복한 이암의 박엽층에서는 건열, 우흔 및 생흔이 발달되기도 한다. 또한 이 암상에서는 석회목편이 산출(그림 9C)되며, 대체적으로 사암과 이암의 교호암상과 수반된다.

해석: 하부와의 경계가 뚜렷하고 상향세립화 현상을 보이며, 상부를 피복한 이암의 박엽층에서 흔히 노출의 흔적이 나타나고, 호수주변부 이질평원 퇴적층으로 해석된 사암과 이암의 교호암과 흔히 수

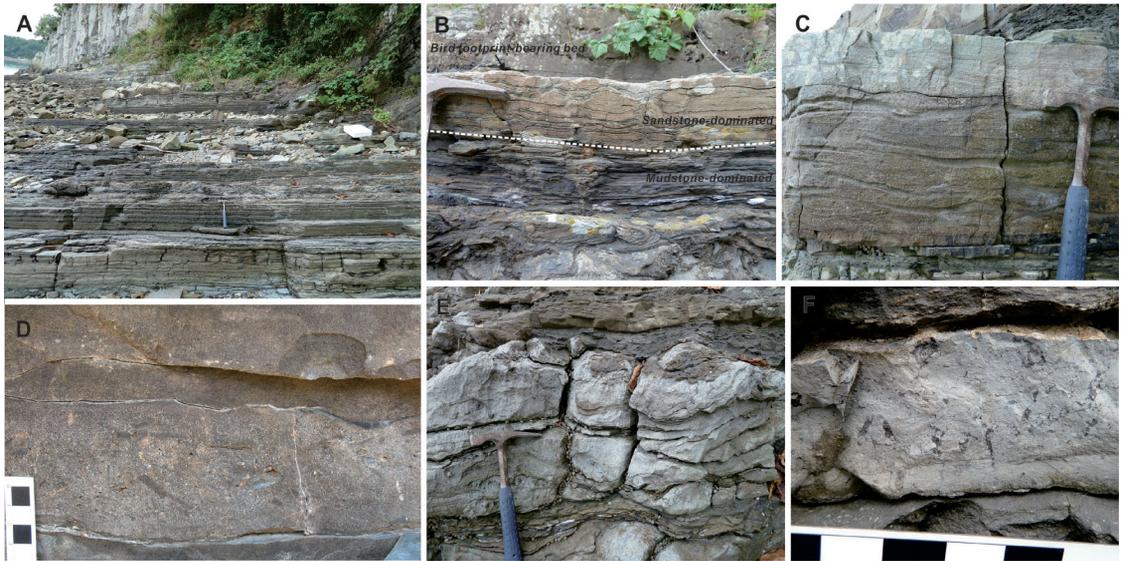


Fig. 8. Lithofacies of the bird footprint-bearing deposits at the Gainri site. A. Overall view of the bird footprint-bearing deposits. B. Sectional view of the bird footprint-bearing bed. Bird footprint fossils occur in alternation of fine-grained sandstone and mudstone lithofacies. C. Planar- to cross-laminated medium- to fine-grained sandstone lithofacies. D. Graded sandstone lithofacies. Intraformational mudchips are present in the lower part. D. Calcareous silty mudstone lithofacies. E. Close view of calcareous silty mudstone. Tubular and irregular cavities filled with calcite and pelloids are observed.

반되는 점으로 미루어 이 암상은 층적평원 내지는 호수주변부의 사질평원환경에서 층상범람에 의해 퇴적된 것으로 해석된다. 이 암상 역시 호수주변부 퇴적층으로 해석된 함안층과 진동층, 그리고 여수지역 유천층군 퇴적층에서 산출되는 사질평원 암상(김현주와 백인성, 2001; 소윤환 외, 2007; 백인성 외, 2009)과 동일한 산출특성을 나타낸다.

4.2.3 점이적인 조립 내지 중립사암

(Graded coarse- to medium-grained sandstone)

기재: 이 암상은 12-50 cm 정도의 중간 내지 두꺼운 층의 규모로 발달하며, 2-3회 중첩되어 산출되기도 한다. 각 암층의 하부에는 침식경계가 발달되어 있으며, 상부로 가면서 세립화되는 점이층리가 발달되어 있다. 침식적인 경계를 가지는 하부에서는 납작한 이암 파편이 층리에 평행하거나 비스듬하게 배열되어 있기도 하다(그림 8D). 이 암상에서는 때때로 판상층리 내지는 저각도의 사엽층리가 발달되며, 상부를 피복하는 이암에서는 건열이 산출된다. 이 암상의 상부는 때때로 파형을 이루기도 하고, 연흔이 발달하기도 하는데, 간혹 연흔의 정선이 매우 구

불구불하여 설상연흔으로 전이되는 형태를 보인다. 이 암상은 판상 내지 사엽층리가 발달된 중립 내지 세립사암과 흔히 수반된다.

해석: 이 암상은 앞서 기술한 사질평원의 층상범람 퇴적층인 판상 내지 사엽층리가 발달된 중립 내지 세립사암과 수반되고 상부를 피복한 이암에서 흔히 노출의 흔적인 건열이 산출된다는 점으로 미루어, 이 암상 역시 층상범람에 의해 형성된 것으로 해석된다. 그러나 판상 내지 사엽층리가 발달된 중립 내지 세립사암에 비해 조립질이고 두께가 상대적으로 두껍게 발달된다는 점으로 보아 이 암상을 형성시킨 층상범람의 에너지와 규모가 상대적으로 컸던 것으로 여겨진다. 따라서 이 암상은 층적평원 내 사질평원환경에서 우기 시 발생한 강한 층상범람에 의해 형성된 퇴적층으로 해석된다.

4.2.4 석회질의 실트질 이암

(Calcareous silty mudstone)

기재: 이 암상은 수 cm 내지 수십 cm 규모로 발달되고, 전반적으로 고토양화의 흔적이 나타나는 것

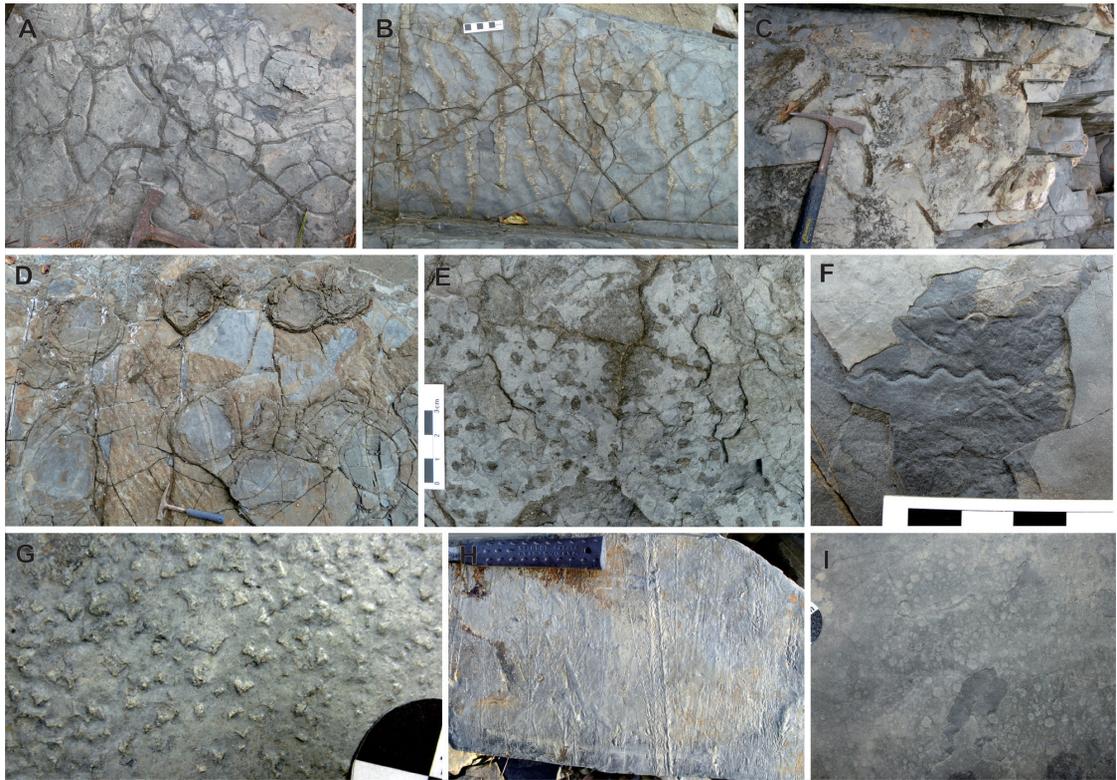


Fig. 9. Occurrences of the bird footprint-bearing deposits at the Gainri site. A. Mudcracks. B. Symmetrical ripple marks. Mudcracks and ripple marks are common in alternation of fine-grained sandstone and mudstone. C. Petrified wood fragments scattered in a fine-grained sandstone. D. Dinosaur trackway. E, F. Diverse invertebrate trace fossils. *Cochlichnus* occurs in alternation of fine-grained sandstone and mudstone lithofacies (F). G. Evaporite mineral (halite) pseudomorphs in a mudstone lamina of alternation of fine-grained sandstone and mudstone lithofacies. H. Tool marks observed in a abandoned rock. I. Raindrop impression on mudstone laminae.

이 특징이다. 이들은 보통 층상 내지 렌즈상의 캘크리트로 발달되어 있으며(그림 8E), 렌즈상의 캘크리트의 경우는 때때로 하방 성장한 형태를 보이기도 한다. 이들은 대부분 미크라이트화 되어있고 방해석으로 충전된 불규칙한 창구조, 펠로이드화 작용, 방해석으로 충전된 실뿌리 구조 등이 나타난다(그림 8F). 연구지역과 인접한 신수도 지역의 함안층에서 이와 동일한 암상에서 스페라이트로 충전된 증발광물캐스트가 보고된 바 있다(소윤환 외, 2007).

해석: 이 암상에서 나타나는 고토양화의 흔적은 이 암상이 비교적 건조한 기후 하에서 형성되었음을 지지한다(김현주와 백인성, 2001; 소윤환 외, 2007). 또한 이 암상은 호수주변부 이질평원 퇴적층인 세립사암 내지 실트스톤과 이암의 교호암상과 흔히 수반

된다. 이는 이 암상이 건조한 기후 하에서 노출과 토양화 작용을 겪은 호수주변부 토양기원 탄산염암을 의미한다(Paik and Kim, 2003).

4.3 함안군 칠원면 용산리

이 지역은 함안층의 상부에 해당하는 곳으로, 전반적으로 붉은색을 띠는 엽층 내지 얇은 층으로 발달된 사암 내지 실트스톤과 이암이 교호하는 암상이 반복적으로 발달되어 있다(그림 10A).

4.3.1 엽층 내지는 얇은 층으로 교호하는 세립사암 내지 실트스톤과 이암

(Interlaminated to thinly interbedded fine-grained sandstone to siltstone and mudstone)

기재: 이 암상에서는 엽층 내지 얇은 층으로 발달

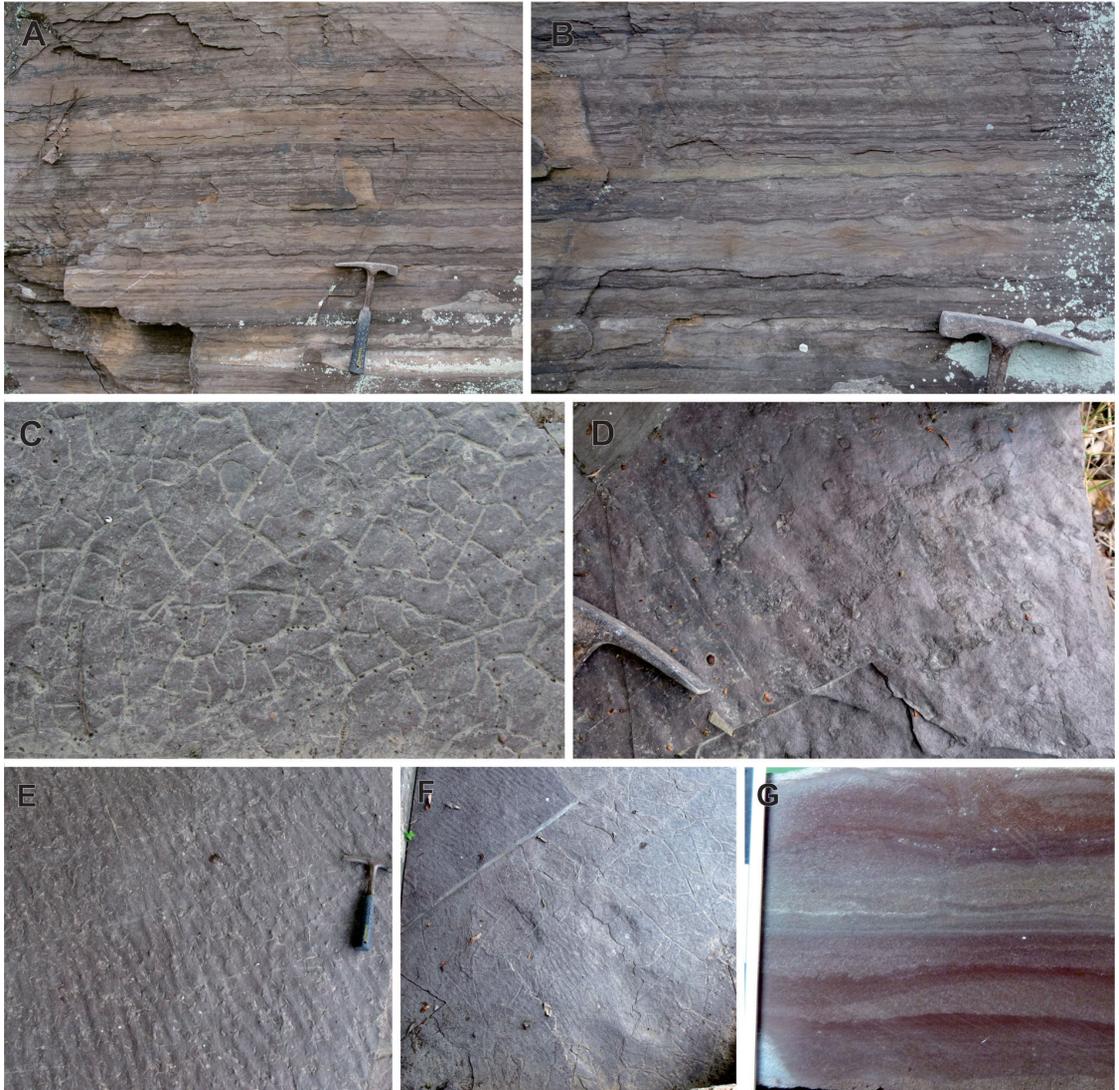


Fig. 10. Occurrences of the bird footprint-bearing deposits at the Yongsanri site. A. Sectional view of the bird footprint-bearing deposits. B. Close view of A. C. Mudcracks. D. Invertebrate trace fossils. E. Bird footprints on a ripple bed. F. Dinosaur trackway. G. Polished slab of interlaminated to thinly interbedded fine-grained sandstone to siltstone and mudstone lithofacies.

된 담회색 내지 담적색의 세립사암 내지 실트스톤과 붉은색 이암이 반복적으로 교호하며 발달되어 있다(그림 10B). 상대적으로 조립질인 세립사암 내지 실트스톤 엽층에서 세립질인 이암엽층으로 가는 경계는 점이적인 반면, 이암엽층에서 세립사암 내지 실트스톤 엽층으로 가는 경계는 뚜렷한 양상을 보이는 미세 점이층리가 발달된다(그림 10G). 세립사암 내지 실트스톤에서는 판상 또는 사엽층리 등이 발달되

어 있고, 때때로 엽층의 발달양상이 우상 내지 파상을 보이는 경우도 관찰된다. 이암엽층에서는 노출의 흔적인 건열이 흔히 발달되며(그림 10C), 우흔과 생흔(그림 10D)가 산출된다. 또한 이 암상에서는 연흔이 흔히 나타나는데, 이들 대부분이 파랑연흔으로 연흔의 정선은 선형 내지는 아선형을 이루며(그림 10E) 이들의 방향성은 그림 11과 같이 나타난다. 이 암상에서는 새 발자국 화석(Kim, 1969)과 공룡 발자

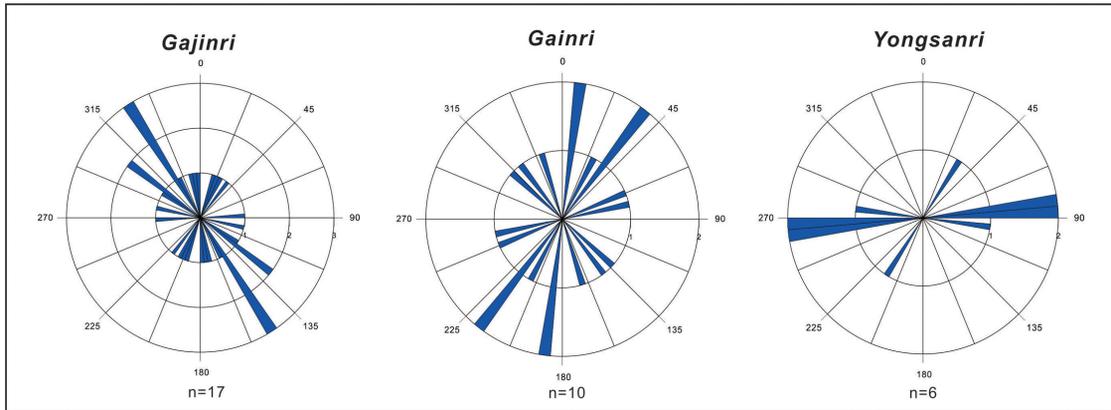


Fig. 11. Rose diagrams showing the orientation of ripple crestlines of the bird footprint-bearing deposits from the Cretaceous Haman Formation at study sites.

국 화석이 산출되며(그림 10F), 특히 새 발자국 화석은 연흔이 발달된 층면에 군집을 이루며 방향성 없이 무질서하게 발달되어 있다(그림 10E).

해석: 이 암상 역시 사암 내지 실트스톤과 이암이 엮층 내지 얇은 층의 규모로 발달되고 미세점이층리가 발달된다는 점과 흔히 노출의 흔적이 산출된다는 점으로 미루어 층상범람(Hardie *et al.*, 1978; Calvo *et al.*, 1989; Smoot and Lowenstein, 1991)에 의해 퇴적되었음을 암시한다. 또한 이 암상은 진동층에서 지배적으로 발달되는 호수주변부 이질평원의 층상범람 퇴적층(김현주와 백인성, 2001; Paik and Kim, 2006)과 동일한 산출특성을 보인다. 뿐만 아니라 앞서 기술한 가인리 지역에서 우세하게 산출되는 세립사암 내지 실트스톤과 이암의 교호암상과 유사한 특성을 보이는 암상이다. 함안층의 상부에서는 진동층과 유사한 호수주변부 이질평원 퇴적층이 보고되었고 이와 함께 윤회퇴적작용도 보고된 바 있다(소운환 외, 2007). 따라서 연구지역의 퇴적층은 아전조 기후 하의 호수주변부 이질평원에서 건기와 우기의 반복으로 형성된 층상범람 퇴적층으로 해석된다. 그러나 진동층과 가인리 지역에 발달된 이와 유사한 암상은 회색 내지는 암회색을 보이나, 이 지역 함안층은 붉은색을 보인다. 이는 유기물의 함량 차이로 여겨지는데, 진동층과 가인리 지역에 발달된 이 암상에서는 때때로 탄화목 파편들이 산출되나 용산리 함안층에서는 관찰되지 않는다는 사실은 이를 뒷받침한다. Kim (1969)은 이 암상이

사바나 기후 하에서 형성된 하성 또는 호성퇴적층으로 해석한 바 있다.

5. 화석화과정

5.1 화석화 조건과 환경

새 발자국은 일반적으로 작은 크기와 얇은 함몰 깊이로 인해 공룡을 포함한 대형 척추동물의 발자국과 비교할 때 그 보존력이 상대적으로 낮다. 공룡과 같은 척추동물의 발자국 화석에 비해 낮은 보존력을 가짐에도 불구하고 우리나라의 새 발자국 화석들은 여러 지층과 지역, 다양한 퇴적암상에서 다량 산출한다(백광석과 서승조, 1998; 백광석과 양승영, 1998; 김현주 외, 2008; Lockley *et al.*, 1992, 2006; Yang *et al.*, 1995; Lim *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2006).

발자국 화석이 일반적으로 높은 산출을 보이는 것은 발자국을 만드는 생물들의 개체수의 차이와 서식환경의 차이뿐만 아니라 보존력의 차이에서도 나타난다. 보존력의 차이는 발자국 형성 당시의 퇴적환경의 차이와 형성된 이후의 물리적, 생물학적 과정으로 인한 소실 등에 의해 발생할 수 있다(Cohen *et al.*, 1991, 1993; Scott *et al.*, 2007). 특히 연흔, 건열, 생흔 등과 같은 퇴적구조가 새 발자국 화석과 수반될 때, 이들의 선후관계를 파악하는 것은 새 발자국 화석의 보존력을 판단함에 있어서 중요한 요소이다. 발자국이 형성된 이후 연흔이나 건열이 형성되면 발자국 화석의 보존력은 감소되며, 발자국이 형성된 이후 무척추동물을 포함한 다양한 동물들의 활

발한 활동은 발자국의 훼손 가능성을 높인다.

일반적으로 발자국 화석은 충적평원의 범람으로 형성되는 얇은 물가와 호숫가 환경에서 보존력이 높다(Cohen *et al.*, 1991; Genise *et al.*, 2009). 이러한 환경에서 충상범람이 발생한 이후 잠잠해지면서 형성되는 이암의 피막은 형태가 잘 보존된 새 발자국의 개수 증가와 관련된다(Genise *et al.*, 2009). 연구지역인 함안층은 충적평원에서 호수주변부에 이르는 퇴적환경으로 해석되었으며, 모두 충상범람에 의해 형성된 퇴적층으로 해석되었다. 또한 흔히 건열과 생흔, 연흔 등이 산출된다. 그러나 새 발자국 화석이 산출되는 층에서는 상대적으로 건열과 생흔과 같은 퇴적구조들이 드물게 수반된다. 때때로 새 발자국 화석과 함께 대칭 또는 비대칭 연흔이 수반되나, 발자국들이 대부분 연흔을 누르고 있는 형태로 산출된다(그림 3C, 5B). 이는 연흔이 발자국이 찍히기 이전에 형성된 것임을 지시하는 것이다. 이러한 사실들은 연구지역 함안층의 퇴적환경과 퇴적 이후의 물리적 및 생물학적 요소가 새 발자국 화석의 보존력을 높이는 역할을 했음을 뒷받침한다.

발자국이 물 속에서 형성될 경우, 상대적으로 깊고 뚜렷한 형태를 보이지만(Lockley *et al.*, 2009), 발자국이 형성된 이후 오랫동안 물 속에 잠겨 있다면, 발자국이 물에 의해 해체되어 모양이 희미해지거나 훼손된다(Genise *et al.*, 2009; Lockley *et al.*, 2009). 또한 발자국 형성 전에 퇴적층이 노출되어 메마른 상태라면 발자국이 형성되기 어렵고, 또한 발자국이 찍혔다하더라도 뚜렷한 형태를 이루기가 어렵다. 뿐만 아니라 발자국이 형성된 후 노출의 기간이 길어졌다면 이 역시 훼손되고 발자국의 보존력은 감소된다(Cohen *et al.*, 1991). 연구지역의 새 발자국 화석들은 대부분 뚜렷하고 주변부는 솟아있는 형태로 나타난다. 이는 발자국이 물 속에서 또는 퇴적물 내 수분 함량이 비교적 높은 상태에서 형성되었음을 의미한다. 가진리 지역의 경우 최근 Falk *et al.* (2010)에 의해 새 발자국과 함께 *Cochlichnus*가 수반됨을 보고하였다. 이는 shorebird ichnofacies (Lockley *et al.*, 1994)를 이루는 것으로, 새 발자국 화석이 젖은 상태 또는 얇은 물속에서 형성되었음을 의미한다(Dolye *et al.*, 2000). 또한 연구지역의 새 발자국 화석층에서는 때때로 불완전한 형태의 건열이 수반된다. 이는 새 발자국이 형성된 이후 짧은 노출을 겪었음을 의

미한다. 발자국이 형성된 후 부분적으로 건열이 발달하는 형태는 Genise *et al.* (2009)의 현생 호수 환경에서의 관찰을 통해 건열의 생성이 발자국 형성 후 3분 내지 7시간이 경과해야 하는 것으로 나타났다. 비록 연구지역 함안층의 환경조건이 Genise *et al.* (2009)의 연구대상과 동일한 조건이 아닐지라도 발자국 화석층에서 건열의 발달이 미미하고 발자국의 형태가 잘 보존된 것으로 미루어 발자국 형성 후 오랜 시간 노출을 겪지 않았고, 노출에 의해 훼손되기 전에 빠르게 매몰된 것으로 여겨진다.

따라서 함안층의 새 발자국 화석들은 충적평원 내지 호수주변부 환경에서 우기에 일시적으로 발생한 충상범람 이후 점차 범람의 에너지가 잠잠해지면서 형성된 충적평원의 일시적인 소규모 호소의 가장자리 내지는 호수의 얇은 물 속 또는 호수주변부 이질평원의 젖은 상태의 퇴적층 위에서 형성되었고, 이후 찾아온 건기로 짧은 노출을 겪은 후 다시 찾아온 우기에 발생한 충상범람으로 인해 빠르게 모래로 충전되면서 높은 보존력을 보일 수 있었던 것으로 해석된다(그림 12). 뿐만 아니라 함안층의 새 발자국 화석들은 대부분 높은 밀집도를 보이며 산출된다. 이는 새 발자국을 형성한 새들의 개체수가 많았고, 군거하는 습성이 있었으며 이들의 활동성이 높았음을 지시하는 것이다. 결과적으로 함안층에서 새 발자국 화석이 높은 산출도를 보이는 것은 발자국을 형성한 새들의 개체수가 많았고, 이를 화석으로 보존될 수 있게 한 환경적 요인이 복합되어 나타난 결과로 해석된다.

5.2 지역에 따른 보존환경 비교

함안층의 새 발자국 화석들이 이처럼 유사한 화석화과정을 거쳤을지라도 연구지역 간 새 발자국 화석의 보존 양상에 있어서 다소 차이점이 나타난다. 가진리 지역의 경우는 대체적으로 다른 지역에 비해 인상이 깊고 선명하며 주변부가 솟은 형태가 잘 나타나며, 때때로 하나의 발자국에서도 함몰깊이가 차이가 나타나기도 하고 다소 다른 모양도 관찰된다(그림 3). 이는 가진리 지역 지면의 함수율이 다소 높았고 지면이 고르지 못함으로 인해 발생한 새들의 보행 장애에서 기인한 것으로 여겨진다. 이러한 새 발자국 화석이 비대칭 연흔과 수반되기도 하고, 가진리 지역의 새 발자국 화석층이 파형을 이루거나

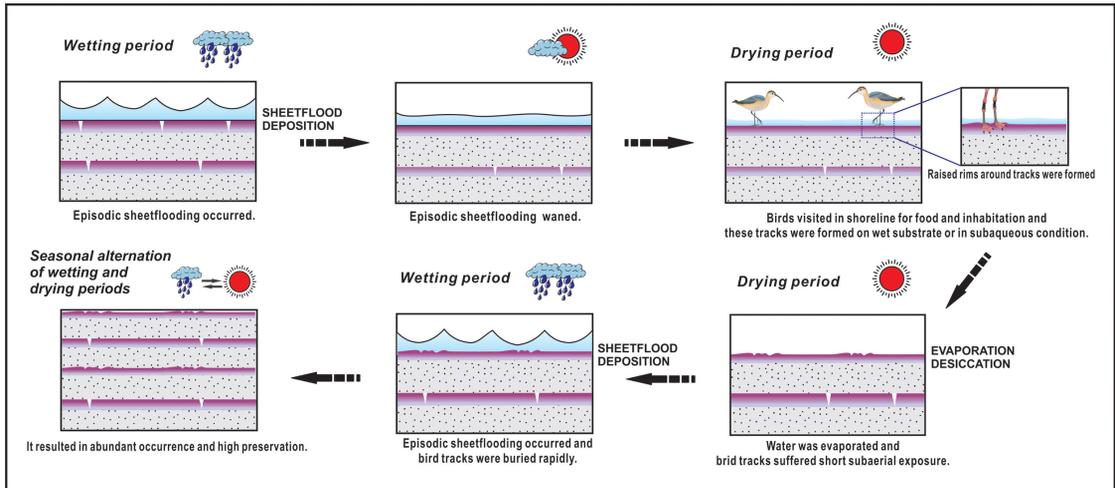


Fig. 12. Schematic diagram of taphonomy and preservation of the bird footprints from the Cretaceous Haman Formation at study sites.

비대칭 연흔이 흔히 발달된다는 점은 이러한 사실을 뒷받침한다.

가진리 지역의 전석에서 발견된 새 발자국 화석의 경우 세립사암 내에 보존된 형태를 보인다(그림 4F, 4G). 새 발자국의 경우 모래 위에 형성되더라도 보존되기가 어렵다는 점(Erickson, 1967; Lockley *et al.*, 2007)과 발자국 III의 끝부분에 부분적으로 이암이 잔존된 것으로 미루어 볼 때, 사암을 피복한 이암이 발자국이 찍힌 면이며, 사암에 보존된 새 발자국 화석은 하흔(underprint)일 것으로 여겨진다. 또한 Kim *et al.* (2006)에 의해 보고된 가진리 지역의 새 발자국 화석인 *Ignotornis yangi*는 가진리 지역과 유사하게 인상이 깊고 선명하며 주변부가 솟아있는 보존양상을 보이는데, 이 역시 다소 높은 함수율에서 기인한 것으로 여겨진다. 가진리 지역의 또 다른 새 발자국 화석이 산출된 층준에서는 다각상의 건열이 발달되어 있다(그림 4B). 이 건열은 새 발자국 화석이 산출되는 층면에서 형성된 것이 아니라 수 mm 상부에서 발생하여 하부로 침투한 것으로 야외에서 확인되었다. 이는 새 발자국 화석의 형성 당시 지속적인 노출이 있었던 것이 아니라 매물 후 건기가 도래했던 것임을 의미하는 것이다. 형성당시 지속적인 노출이 있었다면 발자국의 보존상태가 양호하지 않았을 것이므로, 이러한 조건 역시 가진리 새 발자국 화석의 보존력을 높이는 역할을 했음을 뒷받침한다.

용산리 지역의 경우는 동일한 층준에서 같은 종임에도 불구하고 뒤꿈치가 뚜렷하고 선명한 것과 그렇지 않은 것이 공존한다. 동일한 종에 의해 형성된 발자국에 있어서 보존 양상의 차이가 나타나는 것은 일반적으로 퇴적환경, 퇴적지면의 조직이나 함수율의 차이, 또는 발자국의 진흔이 아닌 하흔이 보존된 것에서 기인(Milàn and Bromley, 2006, 2008; Diedrich, 2008; Marsicano *et al.*, 2010)된다. 그러나 동일한 층준에서 다른 보존 양상을 보이는 것은 함수율의 차이로 인한 것으로, 곧 방문시간의 차이를 의미한다(Marsicano *et al.*, 2010). 이는 용산리 지역의 새 발자국이 동일한 층준에서 산출될지라도 이를 형성한 새들이 동시에 방문하여 동시에 발자국을 형성한 것이 아니라 다소 시간차를 두고 방문하였거나, 동시에 방문했을지라도 발자국을 남김에 있어서 시간 차이가 있었음을 암시한다.

용산리 지역과 가진리 지역에서 산출되는 동일한 종인 *Koreanaornis hamanensis*를 비교해 볼 때, 용산리 지역의 새 발자국은 가진리 지역의 새 발자국에 비해 상대적으로 발뒤꿈치나 hallux의 보존이 좋지 않다(그림 5). 용산리 지역과 가진리 지역의 새 발자국이 보존된 퇴적층의 조직은 상호간에 크게 차이가 없다. 퇴적환경에 있어서는 두 지역이 각각 호수 주변부와 층적평원으로 차이가 있다. 가진리 지역의 발자국이 대체적으로 발자국의 인상이 깊고 주변이

더욱 솟은 양상을 보이고(그림 3), 용산리 지역은 이에 비해 주변부가 덜 솟아있고 뒤꿈치가 희미하다(그림 5). 이러한 점으로 미루어 용산리 지역이 상대적으로 함수율이 낮았을 것으로 여겨진다. 따라서 두 지역간 동일한 종의 새 발자국 화석의 보존양상이 다소 차이가 나타나는 것은 두 지역의 퇴적환경의 차이와 함수율의 차이로 인한 것으로 여겨진다.

6. 고생태 및 고환경

전술한 바와 같이 연구지역의 새 발자국 화석층은 모두 아건조한 기후가 우세한 가운데 건기와 우기가 반복되는 계절성 기후 하에서 층상범람에 의해 형성된 퇴적층으로서, 함안층의 중하부에 해당하는 가진리 지역은 층적평원, 중상부에 해당하는 가진리 지역은 층적평원 내지 호수주변부의 사질 내지 이질 평원, 상부에 해당하는 용산리 지역은 호수주변부 이질평원환경에서 형성된 것으로 해석된다(표 1).

세 지역 간 연흔의 방향성(그림 11)을 비교해 보면, 가진리 지역과 가진리 지역의 경우는 용산리 지역과 비교해 상대적으로 우세한 방향성의 발달이 미약한 편이다. 이는 함안층 중부의 발달 시기에는 특별한 방향성 없이 층상범람이 일어나는 층적평원환경이 우세하였으며, 함안층 상부의 발달 시기에는 분지의 중심부에 호수의 발달이 확장되었고, 호수주변부에서 발생한 층상범람이 호수에 상대적으로 지속적으로 물을 공급했기 때문으로 여겨진다. 이처럼 연구지역 함안층의 퇴적환경은 중하부에서 상부로 가면서 층적평원에서 호수주변부 환경으로 점차 변화하는 양상을 보인다(그림 13). 이러한 환경변화는 경남 사천시 신수도 지역의 함안층 상부에서 확인된 윤희퇴적층의 연구결과(소윤환 외, 2007)로 미루어 볼 때, 기후의 점진적인 변화에 따른 것으로 해석된다.

연구지역의 새 발자국 화석층에 층적평원 기원의 이암에서 흔히 발달하는 건열이 수반되지 않고 때때로 연흔이 수반되는 사실과 연구지역의 새 발자국을 만든 새들이 주로 물새류라는 점을 고려할 때, 새들의 방문시기에는 물이 존재했음을 암시한다. 층적평원 퇴적층인 가진리 지역 함안층의 경우, 동일한 층준에서 우수연흔이 파랑연흔과 만나거나 전이되는 현상은 층상범람 이후 층적평원 내 일시적인 작은 물웅덩이가 존재했음을 지시하고, 호수주변부 퇴적

층인 가진리 지역과 용산리 지역의 함안층은 분지 중심부로 가면서 상대적으로 긴 시간동안 호수물이 존재했음을 지시한다.

특히 가진리 지역에서는 동일한 층준에서 연흔이 발달하는 부분과 연흔이 발달하지 않는 경우도 관찰된다. 이는 동일한 층준에서 물의 흐름이 있었던 곳과 물의 흐름이 없었던 고지면(paleosurface; Smith, 1993)을 의미한다. 이러한 층준에서는 새 발자국 화석도 다량 발달하는데, 물갈퀴가 있는 발자국은 주로 연흔 위에서 산출되며, 물갈퀴가 없는 것은 연흔이 없는 면에서 산출된다. 물갈퀴가 있는 것은 먹이 사냥 흔적과 함께 보행열이 나타난다. 이는 얇은 물 속에서 보행하면서 물 속에 있는 먹이를 잡기위한 행동을 한 것으로서, 일시적 층상범람 후 부분적으로 층적평원 내 작은 물웅덩이가 존재하였음을 뒷받침하는 것이다.

*Koreanaornis hamanensis*의 경우 현생의 물떼새(plover)의 발자국과 유사하고(Kim, 1969; Lockley *et al.*, 1992), 가진리 지역의 분류되지 않은 물갈퀴 새 발자국 화석은 뒷부리장다리물떼새(avocet)의 것과 유사하다(Lim *et al.*, 2000). 함안층의 새 발자국 화석뿐만 아니라 우리나라에서 발견되는 새 발자국 화석들은 주로 얇은 물 속이나 물가에서 서식하는 물새류(shorebird 또는 waterbird)에 의한 것이다(Lockley *et al.*, 1992; Yang *et al.*, 1995). 이러한 새들이 일시적 또는 지속적으로 서식하고 생활하기 위해서는 적절한 물의 염도, 물의 깊이, 먹이 및 포식 관계 등과 같은 환경적, 생태적 요인이 중요하다. 그 중 물의 염도 및 깊이 등은 기후와도 관련이 있다. 건기가 지속되어 물의 염도가 높아지고 물이 메말라 버리거나, 우기에 폭우가 쏟아져서 물의 염도가 낮아지고 물의 깊이가 깊어진다면 새들은 서식하던 곳을 떠난다(Cheneval, 1989). 또한 물새들은 물의 깊이가 발목에 달하는 곳에서 먹이 사냥이나 보행을 하면서 활동한다(Genise *et al.*, 2009). 따라서 물새들이 서식하기에는 비교적 얇은 물 속이나 물가, 그리고 담수나 염수보다 기수(brackish water)가 존재하는 환경이 적절한 환경인 것으로 여겨진다.

기수는 담수에 비해 염류가 풍부하여 이를 섭취하는 플랑크톤과 같은 유영생물이 서식하기 좋으며, 또한 이를 먹이로 하는 무척추동물이 서식하기에 좋은 환경을 제공함으로써 무척추동물을 먹이로 하는

Table 1. Summary of the sedimentology of the bird footprint-bearing deposits from the Cretaceous Haman Formation.

Site	Lithofacies	Sedimentary features	Depositional environments	Ichnospecies
Yongsanri	Interlaminated to thinly interbedded fine-grained sandstone to siltstone and mudstone	micrograding, symmetrical ripple, wavy bedding, cross lamination, mudcrack, raindrop imprint, tool mark, invertebrate trace fossil, dinosaur footprint, peck mark, bird footprint	lake margin (mudflat) sheet flooding deposits	<i>Koreanaornis hamanensis</i> (Kim, 1969) <i>Jindongornipes kimi</i> (National Research Institute of Cultural Heritage, 2007)
Gainri	Alternation of medium- to fine-grained sandstone to siltstone and mudstone	micrograding, symmetrical and asymmetrical ripple, mudcrack, cross lamination, raindrop imprint, tool mark, petrified wood fragment, invertebrate trace fossil (<i>Cochlichnus</i>), evaporite mineral (halite) cast, dinosaur footprint, bird footprint	alluvial plain to lake margin (sandflat to mudflat) sheet flooding deposits	<i>Ignotornis yangi</i> (Kim <i>et al.</i> , 2006) unclassified bird footprints
	Planar- to cross-laminated medium- to fine-grained sandstone	grading, mudstone film with mudcrack, intraformational clast (mudchip), invertebrate trace fossil	alluvial plain to lake margin (sandflat) sheet flooding deposits	
	Graded coarse- to medium-grained sandstone	grading, mudstone film with mudcrack, intraformational clast (mudchip), invertebrate trace fossil	alluvial plain to lake margin (sandflat) sheet flooding deposits	
	Calcareous silty mudstone	nodular, lenticular, bedded, pedogenic features (rootlet, fenestrae, peloids, circum-granular crack, etc)	lake margin palustrine carbonate	
Gajinri	Alternation of medium- to fine-grained sandstone mudstone	grading, asymmetrical and symmetrical ripple mark, cross lamination, mudcrack, raindrop imprint, invertebrate trace fossil, dinosaur footprint, bird footprint	alluvial plain sheet flooding deposits	<i>Koreanaornis hamanensis</i> <i>Jindongornipes kimi</i> <i>Uhangrichnus chuni</i> (Baek and Yang, 1998) unclassified webbed bird footprint (Lim <i>et al.</i> , 2000)

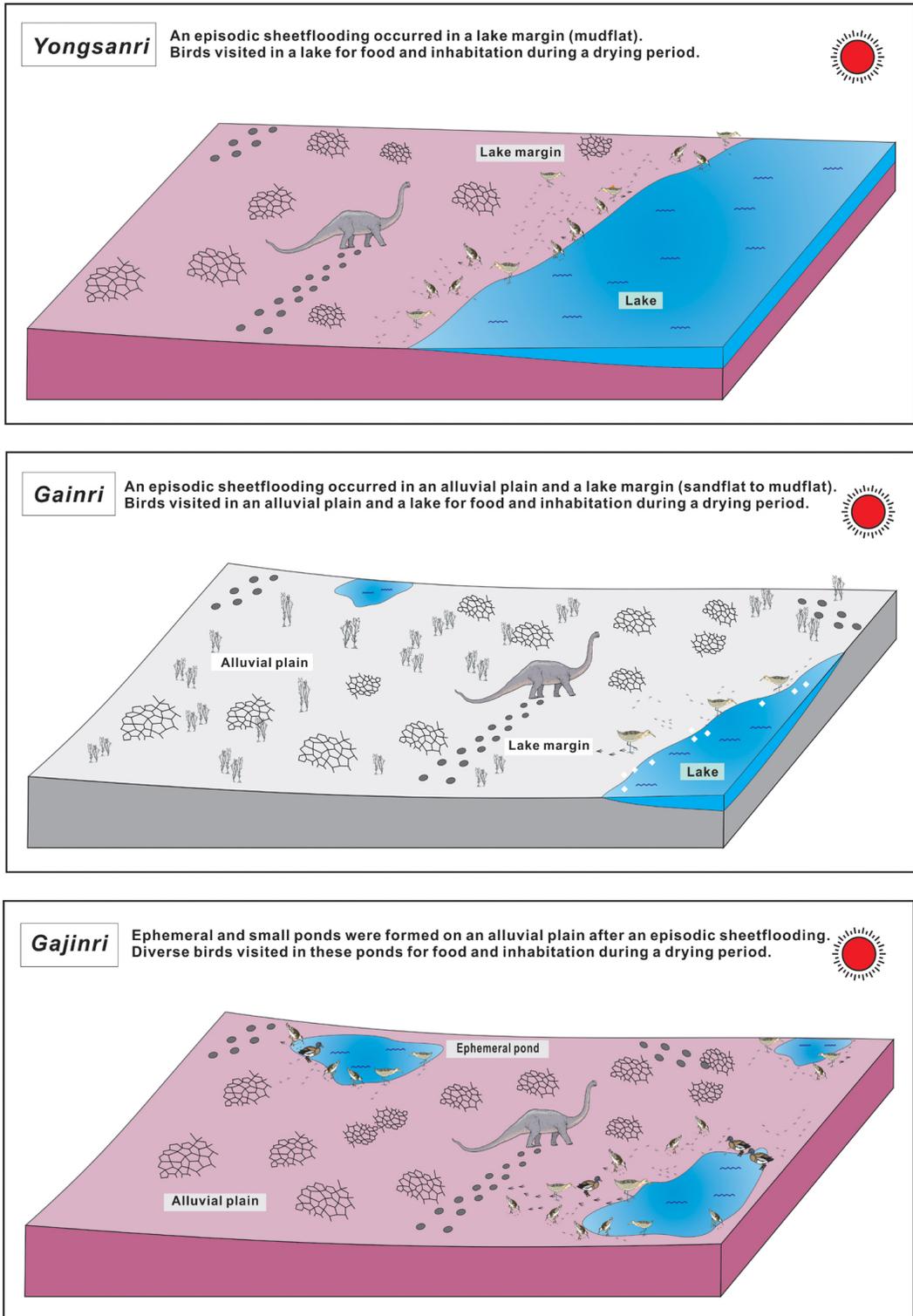


Fig. 13. Summarized diagram of the paleoenvironmental changes of the bird footprint-bearing deposits in the Haman Formation.

새로 이어지는 먹이 그물을 형성한다(Matsukawa *et al.*, 2006). 연구지역 가운데 가진리 지역에서는 증발 잔류광물혼이 산출된다. 이것은 연구지역 새 발자국 화석층의 퇴적 당시 기수의 존재를 지시한다(Paik and Kim, 2006). 또한 연구지역 함안층에서는 다양하고 많은 무척추동물의 생흔화석들이 산출된다. 이러한 사실들은 함안층의 새 발자국 화석층 형성 당시 무척추동물에서 새로 이어지는 먹이 그물과 그들 간에 포식관계가 형성되었음을 암시한다.

함안층의 새 발자국을 남긴 새들은 근거했었고 높은 활동성을 가지고 있었던 것으로 여겨진다. 특히 가진리 지역과 용산리 지역에서 산출되는 새 발자국 화석의 개수가 많고 높은 밀집도를 보이며 간혹 먹이섭취 및 사냥을 지시하는 부리흔적이 함께 산출되는 것은 이러한 사실을 뒷받침한다(백광석과 양승영, 1998; Yang *et al.*, 1995). 가진리 지역 함안층의 경우 여러 유형의 새 발자국 화석들이 동일한 층준에서 동시에 산출되기도 하지만, *Koreanaornis hamanensis*와 물갈퀴가 있는 새 발자국의 경우 동일한 층준일지라도 다소 거리가 떨어져있는 층면에서 독립적인 산출을 보인다. 이는 서로 다른 종의 새들이 독립적으로 활동하거나 근거하는 습성에 의한 것으로 해석된다.

함안층의 새 발자국 화석층에서는 공룡 발자국 화석이 흔히 산출된다. 이는 함안층의 발달 당시 건조한 기후 동안 연구지역이 새 뿐만 아니라 공룡의 서식처로서도 활용되었음을 의미한다. 따라서 백악기 함안층의 형성 환경이 다양한 생명체들로 구성된 육성생태계를 이루었고, 일시적인 층상범람이 흔히 발생하는 충적평원 내지 호수주변부는 새와 공룡에게 유리한 서식 환경을 제공했던 것으로 해석된다.

7. 토의 및 결론

연구지역인 함안층은 충적평원에서 호수주변부에 이르는 환경으로서, 이는 함안층의 중하부에서 상부로 가면서 점진적으로 변화한 것으로 해석되었다. 충적평원 내지 호수주변부 환경의 함안층에 발달된 새 발자국 화석층은 모두 건기와 우기가 반복되는 계절성 기후 하에서 층상범람에 의해 형성된 퇴적층으로 해석되었다. 이러한 층상범람 퇴적층에 발달된 새 발자국 화석들은 대체로 발자국이 선명하

고 발자국의 주변이 솟아 있으며, 부분적으로 연흔 및 무척추동물의 생흔화석과 수반되고 드물게 건열도 함께 산출된다. 이는 함안층의 새 발자국 화석이 층상범람 이후 물 속 또는 젖은 바닥면에서 형성되었고, 뒤이은 건기로 짧은 노출을 겪은 후 빠르게 매몰되었음을 지시한다. 또한 함안층의 새 발자국 화석이 대체로 방향성 없이 밀집되어 산출됨은 이를 만든 새들은 개체수가 많았고 높은 활동성을 가지고 있었음을 지시한다. 이러한 조건들은 함안층에서 새 발자국 화석의 풍부한 산출과 높은 보존의 바탕이 된 것으로 해석된다.

또한 수직층서적으로 함안층의 중하부에서 최상부에 이르기까지, 그리고 충적평원에서 호수주변부에 이르는 환경과 여러 지역에 걸쳐서 다양한 새 발자국 화석이 산출된다는 것은 함안층의 층상범람 퇴적층이 새 발자국 화석의 보존에 중요한 역할을 하였음을 의미한다. 새 발자국 화석층에서는 공룡 발자국 화석, 무척추동물의 다양한 생흔, 건열, 연흔 등이 흔히 산출되고 때때로 증발잔류광물혼이 산출된다. 이는 함안층 형성 당시 충적평원 내지 호수주변부 환경이 건기 동안 새를 비롯한 공룡과 같은 중생대 척추동물과 무척추동물 등 다양한 생물들이 서식하는 생태공간으로서의 역할을 했음을 암시한다.

연구지역 함안층의 새 발자국 화석은 대부분 비교적 좁은 면적 내에서 밀집되어 산출된다. 이들 새 발자국 화석들이 높은 밀집도를 갖는 것은 함안층 퇴적 당시 충적평원 내지 호수주변부 환경이 새들의 좋은 서식지로 활용되었거나, 철새들의 방문지로서 활용되었을 가능성이 있음을 의미한다.

중생대 백악기 당시 우리나라의 지리적 위치는 현재와 크게 다르지 않았고, 대륙의 연안에 위치하고 있었으며(Lee, 2008), 기후는 전반적으로 온난건조한 가운데 건기와 우기가 교호되는 기후였다(백인성과 김현주, 1997; 백인성, 1998; 김현주와 백인성, 2001; 소윤환 외, 2007; 백인성 외, 2009). 이와 같이 건기와 우기가 교호하는 계절성 기후는 현생의 경우 철새들의 이동(migration)에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Berthold, 2001). 층서적으로 함안층의 중하부에서 상부 및 함안층의 상위인 진동층에 이르기까지 *Koreanaornis hamanensis*, *Jindongornipes kimi*와 같은 동종의 새 발자국 화석이 지속적으로 산출한다는 점과 우리나라 백악기의 계절성 기후조건

과 연구지역 발자국 화석층이 건기와 우기의 반복으로 형성된 층상범람 퇴적층이라는 점, 그리고 현생의 철새들의 계절적인 이동 습성(Berthold, 2001)으로 미루어 보아 백악기 당시 새들의 이동의 가능성이 있었을 것으로 여겨진다. 아르헨티나 백악기 후기의 새 발자국 화석층의 하위에 놓이는 퇴적층에서 새의 뼈화석이 발견되었고 이를 바탕으로 당시 새들이 활발한 비행능력을 갖추고 있었음은(Chiappe and Calvo, 1994) 백악기 당시 새들의 계절적 이동 가능성을 뒷받침한다.

캐나다, 몽골, 레바논, 스페인 등지의 백악기 하부 지층에서는 새의 뼈 화석들이 산출된다. 이는 백악기 초기에 이미 새들이 전 세계적으로 분포하고 있었음을 의미한다(Kurochkin, 1988). 북남미, 중국, 일본 등지에서 산출되는 새 발자국 화석(Azuma *et al.*, 2002; Coria *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2006) 역시 이러한 사실을 뒷받침한다. 이처럼 백악기 초기부터 전 세계적으로 분포한 새들의 기록 가운데 우리나라 백악기 함안층에서는 발자국 화석만 산출된다. 이는 함안층 뿐만 아니라 진동층과 같은 새 발자국 화석이 많이 산출되는 지층도 마찬가지이며, 그 외 우리나라 백악기 퇴적층에서도 새의 뼈나 알 화석이 산출되지 않았다. 이는 새의 뼈와 알이 중생대 백악기에 번성했던 공룡과 같은 다른 대형 척추동물에 비해 그 크기가 작아 상대적으로 보존력이 낮기 때문일 수 있다. 그러나 새 뿐만 아니라 공룡 발자국 화석이 풍부한 지층에서도 공룡 뼈화석과 알화석이 매우 드물게 산출된다. 이는 발자국이 산출되는 지층(Paik *et al.*, 2001a)과 뼈나 알화석이 산출되는 지층(Paik *et al.*, 2001b, 2004)의 특성 및 환경이 다름에서 기인한 것으로 여겨진다. 또 다른 이유로 연구지역이 당시 새들이 알을 낳고 둥지를 트는 번식지가 아니라 물과 먹이를 찾아서 이동해온 방문지였을 가능성도 고려해 볼 수 있다. 일반적으로 철새들은 번식을 위해 둥지를 짓고 알을 낳는 번식지와 계절을 나거나 먹이를 위한 서식지를 구분한다(Berthold, 2001). 이러한 점을 고려할 때 우리나라에서 새의 뼈나 알화석이 산출되지 않는 것은 백악기 당시 우리나라가 새들의 번식지라기보다는 물과 먹이를 찾아서 이동해온 철새들의 방문지였기 때문인 것으로 여겨진다.

우리나라는 연구지역인 함안층 뿐만 아니라 진동층(백광석과 서승조, 1998; 김현주 외, 2008; Lockley

et al., 1992, 2006), 성포리층(김항목 외, 1998; 양승영 외, 2008), 우항리층(Yang *et al.*, 1995) 등 백악기 시대의 여러 지층에서 다양한 새 발자국 화석이 산출된다. 이와 같은 다양한 퇴적암상으로부터 높은 산출도를 보이는 것(백광석과 서승조, 1998; 백광석과 양승영, 1998; 김현주 외, 2008; Lockley *et al.*, 1992; Yang *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2006)은 단순히 이례적인 보존의 의미뿐만이 아니라 고생태적인 측면에서도 시사하는 바가 있음을 말해 준다(Lockley *et al.*, 2007). 우리나라의 경우는 새 발자국 화석의 산출도가 높을 뿐만 아니라 밀집도 또한 높은 경우가 많다. 이러한 새 발자국 화석이 한국의 여러 지역의 퇴적층의 다양한 퇴적암상과 퇴적환경, 그리고 한 지층 내에서의 다양한 종의 산출, 한 장소 내에서 여러 종의 산출, 동일한 층군 내에서 여러 종의 동시산출 등은 한국이 새들의 서식에 적절한 환경적 요인을 가지고 있었고 새들에게 좋은 서식 공간을 제공했음을 시사한다. 또한 이들 새 발자국 화석층에서는 공룡 발자국 화석이나 익룡 발자국 화석들이 산출된다. 이는 백악기 당시 우리나라가 다양한 생명체들로 이루어진 육성생태계를 이루었고, 새와 공룡, 익룡과 같은 생명체들에게도 좋은 서식 환경을 제공했음을 의미한다.

사 사

이 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2010-0027501)이며, 이에 감사를 표한다. 또한 관찰과 사진촬영에 도움을 주신 경남과학교육원에도 깊은 감사를 드린다. 이 논문의 초고를 읽고 유익한 도움말을 주셨던 서울대학교 이용일 교수님과 부경대학교 박계현 교수님, 김영석 교수님께도 감사를 드린다. 아울러 이 논문의 개선을 위해 적절한 지적과 도움말을 주신 한국교원대학교 김정률 교수님과 강원대학교 정대교 교수님께 진심으로 감사드린다.

참고문헌

- 국립문화재연구소, 2007, 2007 천연기념물 화석지 모니터링 조사 보고서. p. 51-61.
김정률, 김경수, 임종덕, 2009, 중생대 새의 낙원 한반도 경상분지에서 산출되는 새 발자국 화석. 문화재, 42, 40-61.

- 김중환, 김정택, 1963, 한국지질도(1:50,000), 마산도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 26 p.
- 김찬수, 박계현, 백인성, 2005, 백악기 신라역암 내 화산암력의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 및 하양층군의 퇴적시기에 대한 고찰. 암석학회지, 14, 38-44.
- 김항목, 이상헌, 서승조, 백광석, 1998, 진주시 가진리 및 거제군 갈곶리의 전기 백악기 철새도래지에 관한 연구. 대한지질학회 제53차 정기총회 및 학술발표회(초록), 부산 부산대학교, 11월 6-7일, 24 p.
- 김현주, 백인성, 2001, 경상남도 고성군에 분포하는 백악기 진동층의 퇴적상 및 퇴적환경. 지질학회지, 37, 235-256.
- 김현주, 백인성, 이정은, 허민, 2008, 경남 마산시 호계리 부근의 진동층에서 발견된 새 발자국 화석: 산상 및 고환경적 의미. 지질학회지, 44, 729-745.
- 박노영, 지정만, 1963, 한국지질도(1:50,000), 진동리 지질도폭 설명서. 국립지질조사소, 24 p.
- 백광석, 서승조, 1998, 경남 고성군 동해면 일대 진동층에서 발견된 공룡 생흔화석. 고생물학회지, 14, 81-98.
- 백광석, 양승영, 1998, 한국 함안층 하부에서 발견된 백악기 새발자국에 관한 일차보고. 지질학회지, 34, 94-104.
- 백인성, 1998, 신동층군에 발달된 버티줄고도양: 산상과 고환경 및 층서. 지질학회지, 34, 58-72.
- 백인성, 김현주, 1997, 경상누층군의 고기후적 특성. 박희인교수 정년퇴임 기념집, p. 111-118.
- 백인성, 소윤환, 김현주, 이호일, 윤호일, 임현수, 허민, 2009, 여수 지역의 백악기 호성층에 발달한 윤회퇴적층의 특성 및 기원. 지질학회지, 45, 85-105.
- 소윤환, 백인성, 김현주, 김숙주, 2007, 경남 사천시 신수도의 함안층(백악기)에 발달된 윤회퇴적층: 산상 및 기원. 지질학회지, 43, 1-19.
- 양승영, 최현일, 서승조, 김정률, 김경수, 2008, 남해안 화석지 조사 연구 보고서(V). 문화재청, 133 p.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 광영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고, 36, 124 p.
- 윤철수, 백광석, 정형석, 2004, 경남 사천시 신수도에서 발견된 공룡알 화석. 고생물학회지, 20, 31-37.
- 장기홍, 1967, 백악기 화석및자국의 한 산출. 지질학회지, 3, 64-67.
- 장기홍, 1978, 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조(II). 지질학회지, 14, 120-135.
- 장기홍, 고인석, 이재영, 김상욱, 1977, 한국지질도(1:50,000), 구산동 도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 25 p.
- 장기홍, 이윤중, 스키카즈히로, 박순옥, 1998, 백악기 구산동층암암 저어른 결정들의 형태 CHIME 연령 및 지사적 의미. 지질학회지, 34, 333-342.
- 최유구, 김태열, 1963, 한국지질도(1:50,000), 의령 지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 7 p.
- Azuma, Y., Arakawa, Y., Tomida, Y. and Currie, P. J., 2002, Early Cretaceous bird tracks from the Tetori Group, Fukui Prefecture, Japan. Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum, 1, 1-6.
- Berthold, P., 2001, Bird Migration: A General Survey. New York, Oxford University Press, 253 p.
- Calvo, J. P., Alonso Zarza, A. M. and García Del Cura, M. A., 1989, Models of Miocene marginal lacustrine sedimentation in response to varied depositional regimes and source areas in the Madrid Basin (Central Spain). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 70, 199-214.
- Cheneval, J., 1989, Fossil bird study, and paleoecological and paleoenvironmental consequences: example from the Saint-Gérard-Le-Puy deposits (Lower Miocene, Allier, France). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 73, 295-309.
- Chiappe, L. M. and Calvo, J. O., 1994, *Neuquenornis volans*, a new Cretaceous bird (Enantiornithes, Avisauridae) from Patagonia, Argentina. Journal of Vertebrate Paleontology, 14, 230-246.
- Choi, H. I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. Journal of Geological Society of London, 143, 29-40.
- Cohen, A., S., Halfpenny, J., Lockley, M. and Michel, E., 1993, Modern vertebrate tracks from lake Manyara, Tanzania and their paleobiological implications. Paleobiology, 19, 433-458.
- Cohen, A. S., Lockley, M., Halfpenny, J. and Michel, A. E., 1991, Modern vertebrate track taphonomy at Lake Manyara, Tanzania. Palaios, 6, 371-389.
- Coria, R. A., Currie, P. J., Eberth, D. and Garrido, A., 2002, Bird footprints from the Anacleto Formation (Late Cretaceous) in Neuquén Province, Argentina. Ameghiniana (Rev. Asoc. Paleontol. Argent.), 39, 1-11.
- Diedrich, C., 2008, Millions of reptile tracks - Early to Middle Triassic carbonated tidal flat migration bridges of Central Europe - reptile immigration into the Germanic Basin. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 259, 410-423.
- Doyle, P., Wood, J. L. and George, G. T., 2000, The shorebird ichnofacies: an example from the Miocene of southern Spain. Geological Magazine, 137, 517-536.
- Eberth, D. A., Berman, D. S., Sumida, S. S. and Hoff, H., 2000, Lower Permian terrestrial paleoenvironments and vertebrate paleoecology of the Tambach Basin (Thuringia, Central Germany): The upland holy grail. Palaios, 15, 293-313.
- Erickson, B. R., 1967, Fossil bird tracks from Utah. In Terrestrial Trace Fossils (ed. Sarjeant, W. A. S.), Hutchinson Ross Publishing Company, Pennsylvania, 140-146.
- Falk, A. R., Hasiotis, S. T. and Martin, L. D., 2010, Feeding traces associated with bird tracks from the Lower Cretaceous Haman Formation, Republic of Korea. Palaios, 25, 730-741.

- Genise, J. F., Melchor, R. N., Archangelsky, M., Bala, L. O., Straneck, R. and Valais, S., 2009, Application of neoichnological studies to behavioural and taphonomic interpretation of fossil bird-like tracks from lacustrine settings: The Late Triassic-Early Jurassic? Santo Domingo Formation, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 272, 143-161.
- Hardie, L. A., Smoot, J. P. and Eugster, H. P., 1978, Saline lakes and their deposits. In: Matter, A. and Tucker, M. E. (eds.), *Modern and Ancient Lake Sediments*. Special Publication of International Association of Sedimentologist, 2, 7-42.
- Jwa, Y. J., Lee Y. I. and Orihashi, Y., 2009, Eruption age of the Kusandong Tuff in the Cretaceous Gyeongsang Basin, Korea. *Geosciences Journal*, 13, 265-273.
- Kim, B. K., 1969, A study of several sole marks in the Haman Formation. *Journal of Geological Society of Korea*, 5, 243-258.
- Kim, J. Y., Kim, H. S., Kim, K. S. and Lockley, M. G., 2006, The oldest record of webbed bird and pterosaur tracks from South Korea (Cretaceous Haman Formation, Changseon and Sinsu Islands): More evidence of high avian diversity in East Asia. *Cretaceous research*, 27, 56-69.
- Kim, J. Y., Kim, K. S., Lockley, M. G. and Seo, S. J., 2010, Dinosaur skin impressions from the Cretaceous of Korea: New insights into modes of preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 293, 167-174.
- Kurochkin, E. N., 1988, Cretaceous birds from Mongolia and their importance for elaborating the Phylogeny of the class aves. *Paleontol, Ekspeditsii*, 34, 33-42.
- Lee, Y. I., 2008, Paleogeographic reconstructions of the East Asia continental margin during the middle to late Mesozoic. *The Island Arc*, 17, 458-470.
- Lee, Y. I., Choi, T. J., 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.
- Lim, J. D., Zhou, Z., Lockley, M. D., Baek, K. S. and Yang, S. Y., 2000, The oldest known tracks of web-footed birds from the Lower Cretaceous of South Korea. *Naturwissenschaften*, 87, 256-259.
- Lockley, M. G., Chin, K., Houck, K., Matsukawa, M. and Kukihara, R., 2009, New interpretations of *Ignotornis*, the first-reported Mesozoic avian footprints: implications for the paleoecology and behavior of an enigmatic Cretaceous bird. *Cretaceous Research*, 30, 1041-1061.
- Lockley, M. G., Houck, K., Yang, S. Y., Matsukawa, M. and Lim, S. K., 2006, Dinosaur-dominated footprint assemblages from the Cretaceous Jindong Formation, Hallyo Haesang National Park area, Goseong County, South Korea; evidence and implications. *Cretaceous Research*, 27, 70-101.
- Lockley, M. G., Hunt, A. P. and Meyer, C. A., 1994, Vertebrate tracks and the ichnofacies concept: implications for paleoecology and palaeostratigraphy. In Donovan, S. K. (ed.), *The Palaeobiology of Trace Fossils*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 241-268.
- Lockley, M. G., Li, R., Harris, J. D., Matsukawa, M. and Liu, M., 2007, Earliest zygodactyl bird feet: evidence from Early Cretaceous roadrunner-like tracks. *Naturwissenschaften*, 94, 657-665.
- Lockley, M. G., Yang, S. Y., Matsukawa, M., Fleming, F. and Lim, S. K., 1992, The track record of Mesozoic birds: evidence and implications. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, B 336, 113-134.
- Marsicano, C. A., Mancuso, A. C., Palma, R. M. and Krapovickas, V., 2010, Tetrapod tracks in a marginal lacustrine setting (Middle Triassic, Argentina): Taphonomy and significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi:10.1016/j.palaeo.2010.03.009.
- Matsukawa, M., Saiki, K., Ito, M., Obata, I., Nichols, D. J., Lockley, M. G., Kukihara, R. and Shibita, K., 2006, Early Cretaceous terrestrial ecosystems in East Asia based on food-web and energy-flow models. *Cretaceous Research*, 27, 285-307.
- Milàn, J. and Bromley, R. G., 2006, True tracks, undertracks and eroded tracks, experimental work with tetrapod tracks in laboratory and field. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231, 253-264.
- Milàn, J. and Bromley, R. G., 2008, The impact of sediment consistency on track and undertrack morphology: experiments with emu tracks in layered cement. *Ichnos*, 15, 18-24.
- Paik, I. S., Huh, M. and Kim, H. J., 2004, Dinosaur egg-bearing deposits (Upper Cretaceous) of Boseong, Korea: occurrence, paleoenvironments, taphonomy, and preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 205, 155-168.
- Paik, I. S., Huh, M., Yang, S. Y., So, Y. H., Lee, J. E. and Jeong, H. S., 2005, Paleoenvironments and preservation of dinosaur egg-bearing deposits in the Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea. *Annual meeting (2005) of Geological Society of Korea (Abstracts)*, Daejeon, p. 184.
- Paik, I. S. and Kim, H. J., 2003, Palustrine calcretes of the Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea: Varication and paleoenvironmental implications. *Island Arc*, 12, 110-124.
- Paik, I. S. and Kim, H. J., 2006, Playa lake and sheetflood

- deposits of the Upper Cretaceous Jindong Formation, Korea: Occurrences and palaeoenvironments. *Sedimentary Geology*, 187, 83-103.
- Paik, I. S., Kim, H. J. and Huh, M., 2010, Impressions of dinosaur skin from the Cretaceous Haman Formation in Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39, 270-274.
- Paik, I. S., Kim, H. J. and Lee, Y. I., 2001a, Dinosaur track-bearing deposits in the Cretaceous Jindong Formation, Korea: occurrences, palaeoenvironments and preservation. *Cretaceous Research*, 22, 79-92.
- Paik, I. S., Kim, H. J., Park, K. H., Song, Y. S., Lee, Y. I., Hwang, J. Y. and Huh, M., 2001b, Palaeoenvironments and taphonomic preservation of dinosaur bone-bearing deposits in the Lower Cretaceous Hasandong Formation, Korea. *Cretaceous Research*, 22, 627-642.
- Reineck, H. E. and Singh, I. B., 1973, *Depositional Sedimentary Environments with Reference to Terrigenous Clastics*. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 439 p.
- Scott, J. J. Renaut, R. W., Owen, R. B. and Sarjeant, W. A. S., 2007, Biogenic activity, trace formation, and trace taphonomy in the marginal sediments of saline, alkaline Lake Bogoria, Kenya Rift Valley. In Bromley, R., Buatois, L. A., Mángano, G., Genise, J. F., Melchor, R. N. (eds), *Sediment-Organism Interactions: A Multifaceted Ichnology*. SEPM, Special Publication 88, p. 309-330.
- Smith, R. M. H., 1993, Sedimentology and ichnology of floodplain paleosurfaces in the Beaufort Group (Late Permian), Karoo Sequence, South Africa. *Palaios*, 8, 339-357.
- Smoot, J. P. and Lowenstein, T. K., 1991, Depositional environments of nonmarine evaporites. In: Melvin, J. L. (ed.), *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources. Developments in Sedimentology*, 50, Elsevier, New York, 189-347.
- Yang, S. Y., Lockley, M. G., Greben, R., Erickson, B. R. and Lim, S. K., 1995, Flamingo and duck-like bird tracks from the Late Cretaceous and Early Tertiary: evidence and implications. *Ichnos*, 4, 21-34.
- Zhang, J., Li, M., Lockley, M. G. and Bai, Z., 2006, Diverse dinosaur-, pterosaur-, and bird-track assemblages from the Hakou Formation, Lower Cretaceous of Gansu Province, northwest China. *Cretaceous research*, 27, 44-55.

투 고 일 : 2011년 3월 18일

심 사 일 : 2011년 3월 23일

심사완료일 : 2011년 4월 26일