

경남 마산시 호계리 부근의 백악기 진동층에서 발견된 새발자국 화석 : 산상 및 고환경적 의미

김현주¹ · 백인성^{1,*} · 이정은¹ · 허민²

¹부경대학교 환경 · 해양대학 환경지질학과

²전남대학교 자연과학대학 지구환경과학부

요 약

경남 마산시 호계리 부근의 상부 백악기 진동층의 호수주변부 퇴적층에서 다양한 새발자국 화석이 발견되었다. 새발자국 화석은 얇은 층 내지 엽층으로 발달된 세립사암 내지 실스트톤과 이암의 호층암상에서 산출된다. 이 퇴적층에서는 용각류 공룡발자국 화석과 작은 무척추동물의 생흔구조가 수반되며, 다각상의 건열구조, 연흔구조, 증발광물 캐스트가 관찰되었다. 이들은 새발자국 화석이 산출된 퇴적층이 건조한 기후의 이질평원에서 퇴적되었다는 것을 지시한다. 연구지역에서 새발자국 화석은 크기 및 형태를 바탕으로 세 종류가 확인되었다. *Koreanaornis hamanensis* (K형 발자국)는 발자국 길이가 1.9-3.4 cm (평균 2.4 cm), 폭이 2.4-4.4 cm (평균 3.0 cm)이다. K형 발자국의 발가락 II와 IV의 평균 사잇각은 119°이며, 발자국 길이와 폭의 비는 약 0.81이다. *Jindongornipes kimi* (J형 발자국)는 발자국 길이가 3.3-7.2 cm (평균 5.6 cm), 폭이 3.7-8.5 cm (평균 6.4 cm)이다. 발가락 II와 IV의 평균 사잇각은 138°이며, 발자국 길이와 폭의 비는 약 0.79이다. J형 발자국은 보통 뒤꿈치와 hallux가 선명하나 간혹 희미한 뒤꿈치 자국과 hallux가 나타나지 않아 발가락은 떨어져서 나오기도 한다. 물갈퀴가 있는 새발자국(W형 발자국)은 발자국의 길이는 4.0-5.4cm (평균 4.8 cm), 폭은 4.7-7.3 cm (평균 5.3 cm)이다. W형 발자국의 발가락 II와 IV의 평균 사잇각은 122°이며, 발자국 길이와 폭의 비는 약 0.9이다. W형 발자국은 크기에 있어서는 *Hwangsanipes choughi*와 유사하나, hallux가 나타나지 않는다는 점과 발가락 II와 IV의 끝이 안쪽으로 휘어 있지 않다는 점에서 *Hwangsanipes choughi*와 다르다. 뿐만 아니라 연구지역의 W형 발자국은 이전 국내에서 보고된 물갈퀴 새발자국 화석과도 다르다. 이는 연구지역의 물갈퀴 새발자국 화석이 새로운 종일 가능성이 있음을 시사한다. K형 발자국은 연구지역에서 가장 많이 산출된다. K형 발자국은 산출 밀도가 높아 때때로 보행열을 인지하기가 어렵다. 이는 K형 발자국을 만든 종이 한 지역에서 무리지어 서식하였거나, 몇 마리들이 높은 활동성을 가지고 있었던 것으로 여겨진다. 건조한 이질평원 퇴적층이 발달된 호계리 새발자국 화석지는 좁은 지역에서 다양한 새발자국 화석과 공룡발자국 화석, 무척추동물의 생흔구조가 함께 산출되는 독특한 기록지이다. 이는 백악기 당시 호계리 이질평원이 현생의 사바나 지역과 같이 건기 동안 공룡, 새, 무척추동물 등 다양한 생물들이 서식하는 생태공간으로의 역할을 했음을 시사하는 것이다.

주요어: 백악기, 진동층, 이질평원, 새발자국 화석, 물갈퀴 새발자국

Hyun Joo Kim, In Sung Paik, Jeong Eun Lee and Min Huh, 2008, Bird footprint fossils from the Upper Cretaceous Jindong Formation at Hogyeri, Masan city, Gyeongsangnamdo, Korea : occurrences and paleoenvironmental implications. Journal of the Geological Society of Korea. v. 44, no. 6, p. 729-745

ABSTRACT: Diverse types of bird footprint fossils were found in a small area (less than 400 m²) consisting of the lake margin deposits of the Upper Cretaceous Jindong Formation at Hogyeri, Masan city, Korea. The bird footprints occur in the thin-bedded and interlaminated fine-grained sandstone and siltstone-mudstone. Sauropod dinosaur tracks and small invertebrate trace fossils are associated, and polygonal mud cracks, symmetrical and asymmetrical ripple marks, and evaporite mineral casts were observed in these deposits. They suggest that bird footprints-bearing deposits were deposited on a dry mudflat. The bird footprint fossils at study area were classified into three ichnospecies based on the size and morphology of the footprints. *Koreanaornis hamanensis* (K type tracks) range from 1.9 to 3.4 cm in length (2.4 cm in average) and from 2.4 to 4.4 cm in width (3.0 cm in average). The average divarication angle between digits II and IV is about 119° (90-140° in range), and the length/width

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

ratio is about 0.81 in average. *Jindongornipes kimi* (J type tracks) range from 3.3 to 7.2 cm in length (5.6 cm in average) and from 3.7 to 8.5 cm in width (6.4 cm in average). The average divarication angle between digits II and IV is about 138° ($103\text{--}163^\circ$ in range), and the length/width ratio is about 0.79 in average. J type tracks usually display vivid heels and hallux impressions. However, digit impressions are separated due to the development of subtle heels and hallux impressions are occasionally absent. Web-footed bird tracks (W type tracks) range from 4.0 cm to 5.4 cm in length (4.8 cm in average) and from 4.7 cm to 7.3 cm in width (5.3 cm in average). The average divarication angle between digits II and IV is about 122° ($100\text{--}144^\circ$ in range), and the length/width ratio is about 0.9 in average. W type tracks are similar to *Hwangsaniipes choughi* in size. However, webbed footprints of the study area are different from *Hwangsaniipes choughi* in the aspects of the absence of hallux impressions and curved inward digits II and IV. Web-footed tracks of the study area are different from previously reported webbed footprints in Korea in size and morphology, which suggests that W type tracks are a new ichnotaxon. K type tracks are the most abundant at study area. In places it is difficult to identify trackways of K type due to their high track density. The abundance and high density of K type tracks at study area suggest that trackmaker of K type inhabited in group at an area or had a higher level of activity of a few individuals. The cooccurrence of diverse bird footprint fossils associated with small invertebrate traces and dinosaur tracks in a small area like Hogyeri fossil sites is unique in the Mesozoic bird footprint records. It implies that Hogyeri dry mudflat was one of the vital ecosite exploited by dinosaurs, birds, and invertebrates during the draught season like as in recent Savannah area.

Key words: Cretaceous, Jindong Formation, mudflat, bird footprint fossils, web-footed bird tracks

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

1. 서 론

중생대의 새발자국 화석은 Mehl (1931)가 미국의 콜로라도 다코타층군에서 최초로 보고하여 *Igonotornis mcconnelli*로 명명한 이후, 1981년 캐나다에서 보고된 *Aquatilavipes swiboldae* (Currie, 1981)와 1986년 아르헨티나에서 보고된 *Yacoraitichnus avis* (Alonso and Marquillas, 1986)를 비롯하여 최근 들어 중국, 일본을 포함한 아시아뿐만 아니라 미국과 캐나다를 포함한 북미지역 등 전 세계적으로 발견, 보고되고 있다(Matsukawa, 1991; Tomida and Azuma, 1992; Shuonan *et al.*, 1995; Lee, 1997; Azuma *et al.*, 2002; Coria *et al.*, 2002; White *et al.*, 2001; Lockley *et al.*, 2004; Rihui *et al.*, 2005; Lockley *et al.*, 2006b; Zhang *et al.*, 2006).

우리나라 새발자국 화석의 경우 김봉균(1969)이 경남 함안군 칠원면에 분포하는 중생대 백악기 함안층에서 최초로 보고하여 *Koreanaornis hamanensis*으로 명명한 이후, 최근 들어 백악기 퇴적층에서 다양한 양상으로 보고되고 있다. Lockley *et al.* (1992)에 의해 경남 고성군 덕명리 해안에 분포하는 진동층에서 *Jindongornipes kimi*가 보고되었고, 전남 해남군 황산면 우항리층에서 Yang *et al.* (1995)에 의해 물갈퀴가 있는 *Uhangrichnus chuni*와 *Hwangsaniipes choughi*

가 보고되었다. 또한 백광석, 양승영(1998)은 경남 진주시 진성면 가진리 경남과학교육원 공사현장의 함안층에서 소형 수각류의 발자국과 함께 수많은 새발자국 화석을 보고하였으며, 이들 새발자국 화석은 물갈퀴가 있는 *Uhangrichnus chuni*를 포함하여 *Koreanaornis hamanensis*와 *Jindongornipes kimi*로 확인되었다. *Jindongornipes kimi*는 경남 고성군 동해면 일대의 진동층에서도 공룡발자국화석과 함께 보고되었으며(백광석, 서승조, 1998), 경남 고성군 덕명리의 진동층에서는 Lockley *et al.* (2006a)에 의해 희미하게 반물갈퀴(semipalmate)가 발달된 *Goseongornipes markjonesi*라고 명명된 새로운 종이 보고되었다. 또한 최근에는 Kim *et al.* (2006)에 의해 백악기 함안층이 분포하는 경남 남해군 창선도와 사천시 신수도에서 아시아에서 가장 오래된 물갈퀴 새발자국 화석이 보고되었으며, 이는 새롭게 *Igonotornis yangi*이라는 이름으로 명명되었다.

우리나라의 남해안 지역에 분포하는 백악기 지층에서는 많은 새발자국 화석이 발견되고 있는데, 현재까지 총 6종의 새발자국 화석이 보고 되었으며, 그 가운데 물갈퀴가 있는 것이 무려 4종에 달한다(그림 1, 그림 2). 이처럼 새발자국 화석이 우리나라에서 다수 보고 되고 있다는 것은 우리나라가 중생대 백악기 새발자국 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.

앞서 언급한 바와 같이 과거 중생대의 새발자국 화석에 관한 보고는 최근 들어 국내외에서 비교적 활발하게 수행되고 있으나, 공룡발자국화석에 비해서는 많지 않은 편이다. 또한 수행된 새발자국 화석에 관한 연구들 역시 주로 고생물학적 연구로서 종을 파악하고 분류하는 것에 집중되어 있고 지질시대 동안 존재했던 새들의 습성, 서식지 등을 포함한 고생태환

경 해석에 관한 연구는 다소 미흡하다. 이에 관한 이해를 돕기 위해서는 새발자국 화석의 고생물학적 연구와 함께 새발자국 화석을 함유하고 있는 퇴적층의 퇴적학적 특성에 관한 연구가 병행되어야 할 것이다.

이 연구에서는 경남 마산시 호계리 지역에 분포하는 백악기 진동층에서 발견된 새발자국 화석을 보고하고, 산출되는 새발자국 화석을 크기와 형태에 따라 세 종류로 구분하였다. 또한 새발자국 화석 산출지층의 퇴적특성과 새발자국 화석의 산상을 바탕으로 고환경적 의미를 해석하였다.

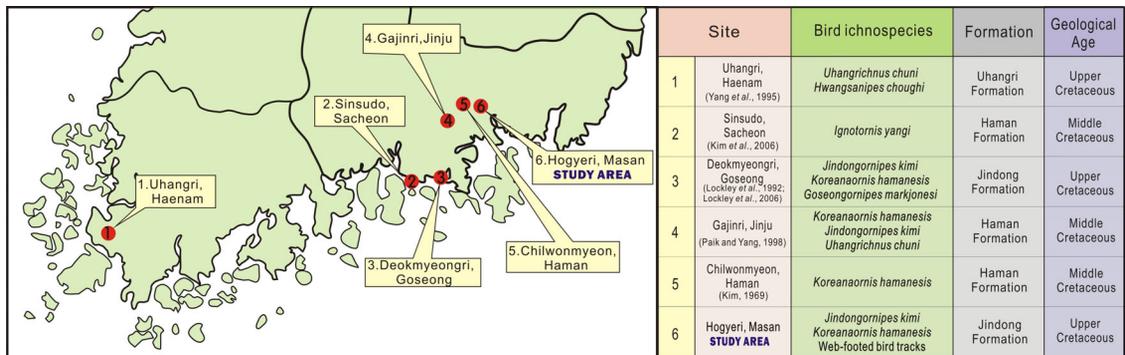


Fig. 1. Distribution map of the bird tracksites of Korea.

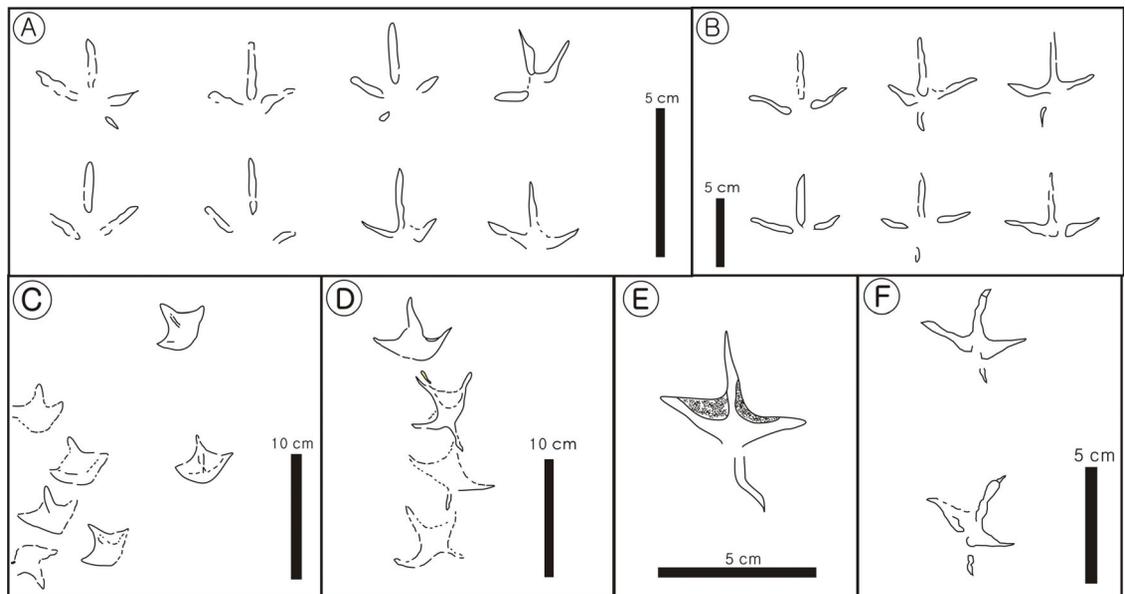


Fig. 2. Bird ichnospecies reported in Korea. A. *Koreanaornis hamanesis* (Kim, 1969), B. *Jindongornipes kimi* (Lockley et al., 1992), C. *Uhangrichnus chuni* (Yang et al., 1995), D. *Hwangsanipes choughi* (Yang et al., 1995), E. *Ignotornis yangi* (Kim et al., 2006), F. *Goseongornipes markjonesi* (Lockley et al., 2006).

2. 지질개요

진동층은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군의 최상부층으로 경상분지의 남서부에 분포되어 있다. 진동층의 구성 암석은 암회색 내지 흑색 셰일과 실트스톤의 호층이 지배적이며 간헐적으로 사암과 석회질암이 협재되어 있고, 백악기 말의 화성활동에 의한 화성암류의 관입 또는 분출에 의해 도처에서 혼펠스화 되어 있는(엄상호 외, 1983) 것으로 알려져 있다.

진동층은 일반적으로 호성기원퇴적층으로 알려져 있는데, 최근 퇴적학적 연구를 통해 진동층의 고환경에 관한 다양한 해석이 이루어지고 있다. 경남 고성군 덕명리에 분포하는 진동층의 퇴적상 및 퇴적환경 연구에서 진동층의 고환경이 호수주변부 이질평원 내지 얇은 호수로 해석되었으며, 기후 변화로 인한 윤회퇴적작용이 확인되었다(김현주, 백인성, 2001). 또한 진동층에서 산출된 증발잔류광물의 흔적을 바탕으로 진동층 퇴적초기에 염호가 존재하였을 것으로 해석되었다(백인성 외, 2004; Paik *et al.*, 2007). 최근 Paik and Kim (2006)은 증발잔류광물의 흔적들, 복잡한 다각상의 건열구조, 우흔, 토양기원 탄산염암의 발달, 무척추동물의 생흔화석과 척추동물인 공룡과 새의 발자국화석 등을 바탕으로 진동층을 플라야호 및 층상범람퇴적층으로 해석하였다. 이외에도 진동층 내에서는 사층리, 연흔, 생흔화석(윤선, 손양은, 1995) 등 다양한 퇴적구조들이 보고된 바 있으며, 특히 경남 고성군 하이면 덕명리를 비롯한 여러 지역에서 다수의 공룡발자국화석(양승영, 1982; 임성규, 1990; 김항목, 1993; 백광석, 서승조, 1998; 황구근 외, 2004)과 새발자국 화석(백광석, 서승조, 1998; Lockley *et al.*, 1992; Lockley *et al.*, 2006a)이 보고된 바가 있다.

진동층 내에서는 척추동물의 발자국을 제외하고 시대를 짐작하게 하는 화석들은 거의 발견되지 않아 생층서에 의한 지질시대가 정확히 대비되어 있지 않으나, 지정만 외(1983)는 인접 지역 지층들과 비교하여 백악기 초기 내지 중기에 대비되는 것으로 기술하였다. 장기홍 외(1998)는 함안층 상부에 발달한 구산동응회암 내의 저어콘을 대상으로 한 CHIME 연령자료($113.6 \pm 10\text{Ma}$)를 바탕으로 함안층의 상위에 놓이는 진동층을 Albian 초기의 지층으로 보았다. 그러나 김현주와 백인성(2001)은 경남 고성군 덕명리

에서 산출된 화산쇄설기원 역질 사암에서 화산쇄설기원의 역들을 대상으로 K-Ar 절대연령을 측정(약 86~85Ma)하여 진동층의 퇴적시기가 백악기 후기인 Santonian에 이르는 것으로 해석하였다. 또한 좌용주 외(2004)에 의해 수행된 구산동응회암에서 산출되는 저어콘에 대한 U-Pb 연대측정은 구산동응회암의 분출시기를 97~96Ma로 한정하여 진동층의 연령이 장기홍 외(1998)가 제시한 것보다 젊은 것으로 보았다.

최근의 경상누층군의 연대측정과 관련된 다양한 연구를 통해서 진동층군의 지질시대가 Late Aptian-Late Albian (Lee *et al.*, 2008)으로, 유천층군과 하양층군의 경계가 81~80Ma (김찬수 외, 2005)로 제안되는 등, 우리나라 중생대 백악기 경상누층군의 연령이 짧게 나타나고 있다는 사실들을 고려할 때 진동층의 지질시대는 백악기 후기일 것으로 여겨진다.

연구지역은 경상남도 마산시 회원구 내서읍 호계리 부근의 구마고속도로 내서 IC의 도로변에 노출되어 있는 사면으로, 이 지역에는 진동층이 분포되어 있다(그림 3A, 3B). 연구지역의 진동층은 비록 노출된 층은 두껍지 않으나 주로 암회색 내지 회색을 띠는 염층 내지 얇은 층으로 발달한 세립사암 내지 실트스톤과 이암의 호층암상의 표면이 비교적 넓게 노출되어 있다. 연구지역에서는 황구근 외(2002)에 의해 용각류 공룡발자국화석과 보행열이 보고된 바가 있다.

3. 새발자국 화석 산출지층의 퇴적특성

연구지역에 노출된 퇴적층은 수직절리를 따라 일어난 침식에 의해 3개의 면으로 나누어진다. 이 3개의 면을 편의상 하부 서측을 A구역, 하부 동측을 B구역, 상부를 C구역로 설정하여 노출된 지층을 조사하였다(그림 3C, 3D). 이 가운데 A구역에서는 공룡발자국이, B구역에서는 공룡발자국과 새발자국이, C구역에서는 새발자국 화석이 산출되었다.

연구지역에서 새발자국 화석이 발견되는 층은 진동층의 퇴적암상중 가장 지배적으로 발달하는 염층 내지 얇은 층으로 발달한 세립사암 내지 실트스톤과 이암의 호층암상이다(그림 4, 그림 5). 이러한 암상은 호수주변부 이질평원 퇴적층으로 해석되었다(김현주, 백인성, 2001; Paik and Kim, 2006).

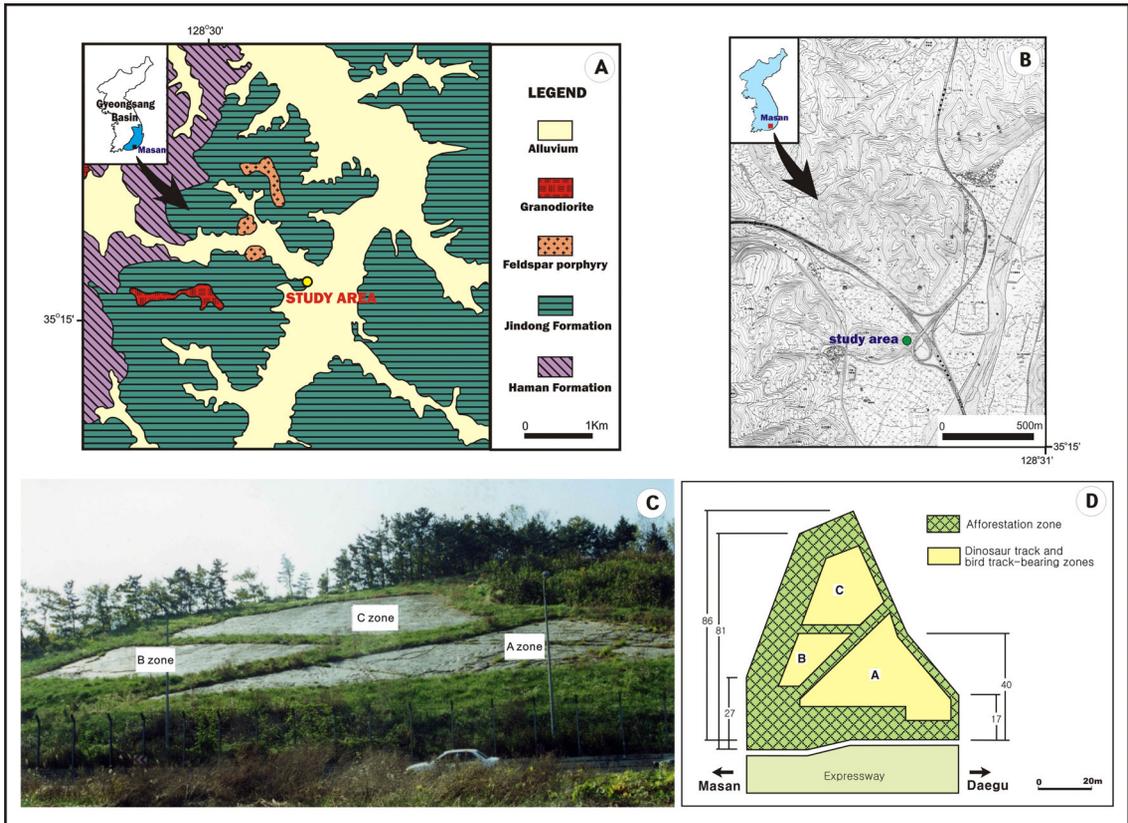


Fig. 3. Geological map (Kim and Kim, 1963; Choi and Kim, 1963) (A) and location map (B) of study area. Overall view (C) and plan map (D) of study area. Dinosaur tracks occur in A & B zones and bird footprints occur in B & C zones.

3.1 A구역

A구역에서는 새발자국 화석은 산출되지 않으나 공룡발자국 화석이 집중적으로 산출된다(그림 4, 그림 6A). A구역에 노출되어 있는 퇴적층의 두께는 약 50 cm 정도로, 엽층 또는 얇은 층으로 발달한 담회색의 세립사암 내지 실트스톤과 암회색 이암의 호층암이 산출된다(그림 5A). 세립사암 내지 실트스톤을 구성하는 입자들은 주로 석영립이며, 교질광물은 방해석이 지배적이다. 대체적으로 실트스톤과 이암의 호엽층보다는 세립사암과 이암의 호엽층이 주를 이루며, 공룡발자국은 이 호엽층의 이질층 표면에서 산출한다. 전반적으로 엽층리의 발달은 불규칙한 편이며, 이는 퇴적이후의 다짐작용에 의한 변형에 따른 것으로 여겨진다. 사질부에서 상부의 이질부로 변화하는 경계는 대체로 점이적이며, 이질부에서 사질부로 변화하는 경계는 침식적이거나 뚜렷한 경계를 갖는다(그림 5C). 때때로 얇은 층으로 발달된 사질부에는

연흔과 사엽층리가 발달되며(그림 5B), 이암으로 된 인트라클라스트들이 함유되어 있다(그림 5D). 이들 인트라클라스트들은 대체로 평평의 형태를 띠며, 층리에 평행한 배열을 보이거나 국부적으로 인편구조의 발달을 보인다. 사질층의 표면에서는 국부적으로 연흔이 관찰되는데, 파랑연흔과 유수연흔 모두 나타난다. 연흔의 파장은 2 내지 5 cm 정도이고 파고는 대체적으로 1 cm 내외이며, 연정선의 굴곡은 전반적으로 미약한 편이다(그림 6B).

이질층에는 건열이 흔히 발달되어 있는데, 이는 대부분 다각상을 이루고, 건열의 교차 형태는 3교 또는 4교상이 주를 이룬다. 건열의 폭은 대체로 1 내지 3 mm 정도이나, 상부 퇴적층에 발달된 건열은 폭이 1 cm 내외이고 다각형의 크기도 직경이 수십 cm에서 1 m에 달한다. 이 퇴적층에 발달된 건열의 일부에서는 동일한 건열 내에서 수회회 건열과 층진의 반복에 의해 만들어지는 수직층리가 관찰되며(그림 6D),

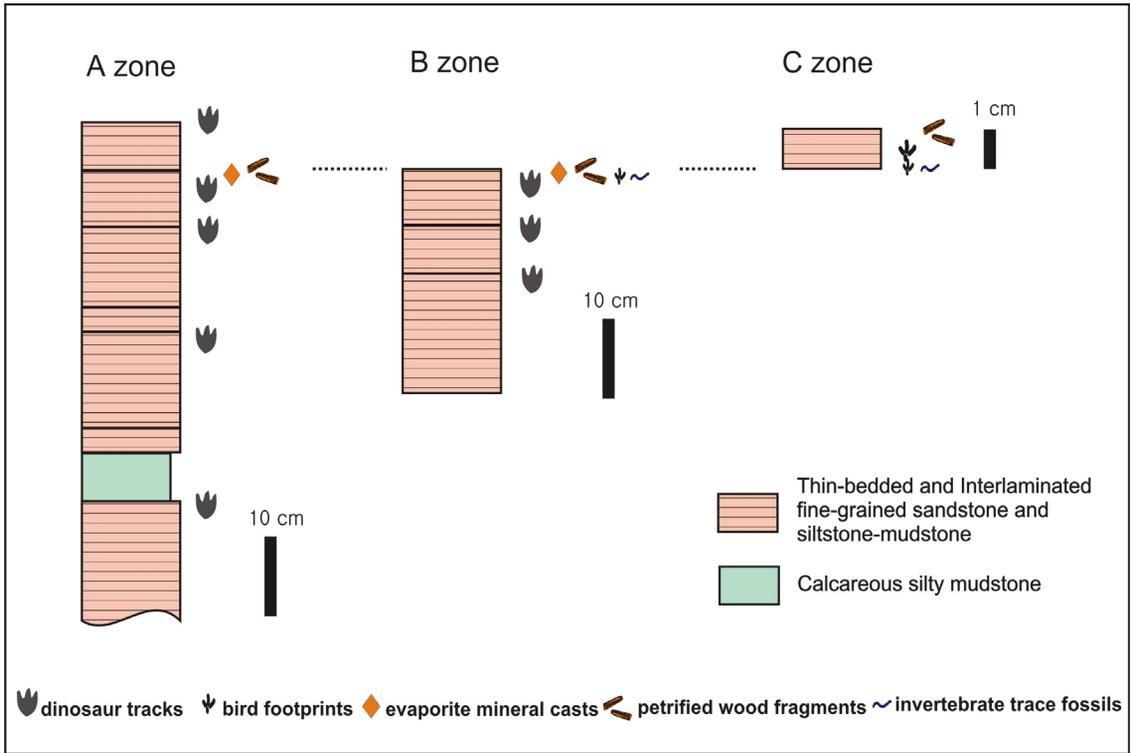


Fig. 4. Stratigraphic sections of study area.

불완전한 비다각상의 건열도 부분적으로 관찰된다. 한편 공룡발자국에 수반되어 있는 건열의 경우, 발자국 위에 건열이 발달되어 있어, 이질층 표면 위에 발자국이 찍힌 후 건열이 형성되었음을 지지하여 준다.

이질층 표면에는 사립으로 충전된 직경 수 mm 내지 1 cm 내외의 캐스트들이 산출하는데, 일부 캐스트들은 양추형, 능형, 육면체형 등의 형태를 띤다(그림 6I, 6J). 따라서 이 캐스트들은 부산의 황령산 지역 백악기 호성퇴적층에서 보고된 증발암 광물의 캐스트(Paik and Kim, 1998)와 동일한 기원의 것으로 해석된다. 즉 건조한 기후조건 하에서 호수주변부 이질평원 표면 이질층 위에 얇게 덮인 호수물이 계속 증발하면서 염도가 높아짐에 따라 증발광물이 이질층 표면에서 결정화되었고, 이후의 우기 시에 층상범람에 의하여 이질평원 위에 유입된 담수에 의하여 증발광물이 용해된 후, 이들 범람에 의하여 유입된 사질퇴적물이 용해된 공간을 충전한 것으로 해석된다. 또한 A구역에서 진동층에서는 산출이 드문 규화목편이 발견되었다.

3.2 B구역

B구역에 노출되어 있는 퇴적층의 두께는 약 30 cm 정도로, 엽층 또는 얇은 층으로 발달한 담회색의 세립사암 내지 실트스톤과 암회색 이암의 호층암상이 발달되어 있다. B구역의 최상부는 A구역의 최상부로부터 6 cm 하위에 놓이는 규모가 큰 건열이 발달된 퇴적층과 동일한 퇴적층이다. A구역과 마찬가지로 대체적으로 실트스톤과 이암의 호염층보다는 세립사암과 이암의 호염층이 주를 이루며, 전반적으로 엽층리의 발달이 불규칙한 편이다. 사질층의 일부에서는 연흔층리가 나타나며, 사질층의 표면에서도 국부적으로 연흔이 관찰된다(그림 6C). 파랑연흔과 우수연흔 모두 나타나며, 연흔의 파장은 5 내지 7 cm 정도이고 파고는 대체적으로 1 cm 내외이며, 연정선의 굴곡은 A구역과 마찬가지로 전반적으로 미약한 편이다. B구역에서도 공룡발자국화석이 산출되었는데, 공룡발자국을 충전한 퇴적물 위에서도 연흔이 부분적으로 관찰된다(그림 6F).

이질층에는 건열이 흔히 발달되어 있으며, 대부분 다각상을 이루고, 건열의 교차형태 역시 3교 또는 4

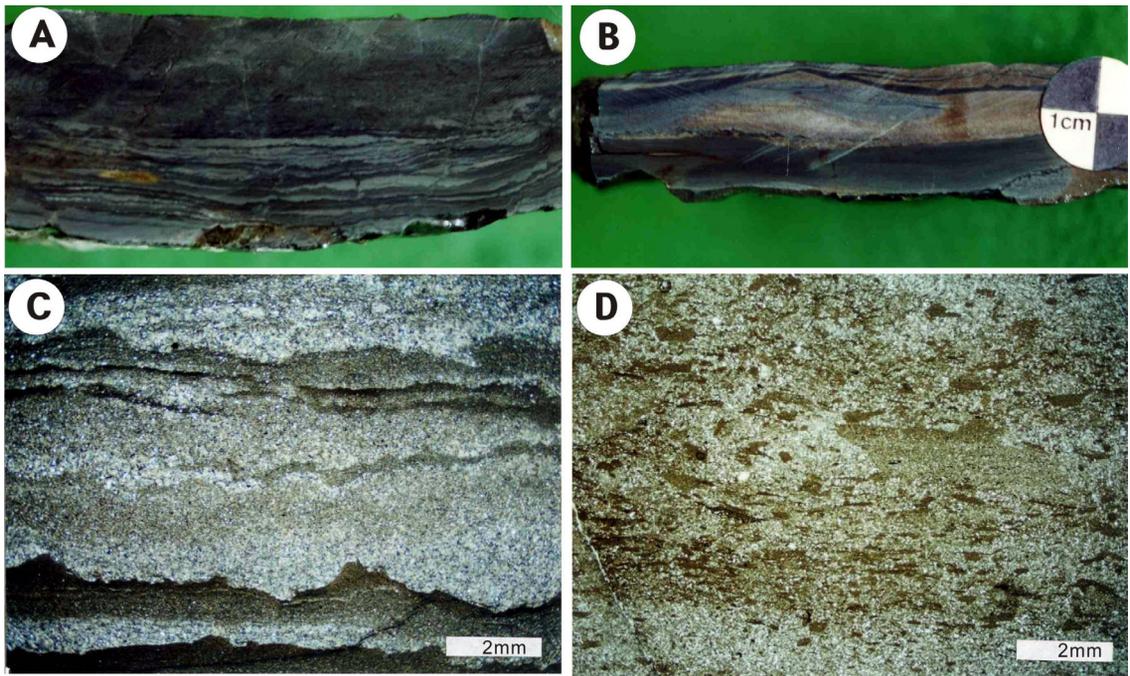


Fig. 5. A, B. Etched rock slabs of thin-bedded and interlaminated fine-grained sandstone and siltstone- mudstone lithofacies. Lamination (A) and ripple mark (B) are observed in this facies. C, D. Thin-section photomicrographs of thin-bedded and interlaminated fine-grained sandstone and siltstone- mudstone lithofacies. Micrograding (C) and subparallel orientation of intraformational mudstone clasts to the bedding plane (D).

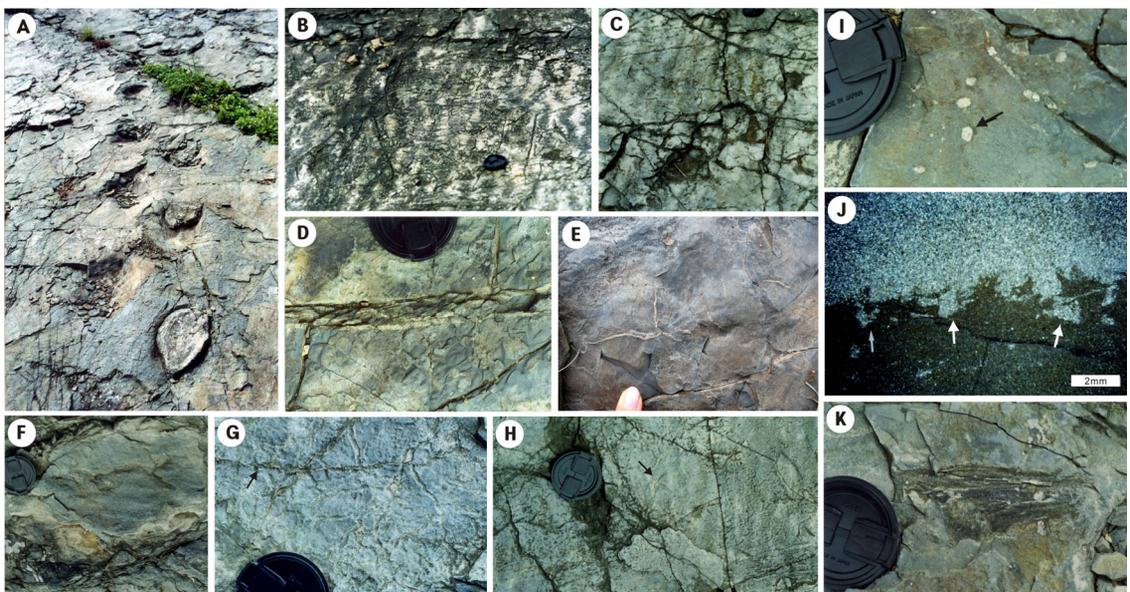


Fig. 6. Sedimentological and biological records at study area (A zone: A, B, D, I & J. B zone: C, E & F. C zone: G, H & K). A. Dinosaur trackway. B, C. Ripple marks. D. Polygonal mud cracks. E. Incomplete lenticular mud cracks. F. Ripple marks preserved in the upper deposits containing dinosaur track. G, H. Small invertebrate trace fossils. Polygonal mud cracks (arrow in G) and bird footprints (arrows in H) are associated. I, J. Evaporite mineral casts preserved in the mudstone layer. I. Bipyramidal casts (arrow). J. Rhombic casts observed in thin-section photomicrograph (arrows). K. Petrified wood fragment.

교상이 주를 이룬다. 건열의 폭은 대체적으로 1 내지 2 mm 정도이나, 최상부 퇴적층에 발달된 건열은 A 구역과 마찬가지로 폭이 1 cm 내외이고 다각형의 크기도 직경이 수십 cm에서 1 m에 달한다. 또한 A 구역과 마찬가지로 불완전한 비다각상의 건열도 부분적으로 관찰된다(그림 6E). 한편 공룡발자국에 수반되어 있는 건열의 경우, 발자국 위에 건열이 발달되어 있어, 이질층 표면 위에 발자국이 찍힌 후 건열이 형성되었음을 지시하여 준다. 이러한 산출특성은 A 구역과 동일하다. 이질층 표면에는 A 구역에서도 관찰되는 증발광물 기원의 사립으로 충전된 직경 수 mm 내지 1 cm 내외의 캐스트들이 산출한다.

B 구역 지층의 최상부로부터 약 1 cm 하위에 발달한 퇴적층의 표면에서는 새발자국 화석과 함께 무척추동물에 의한 생흔구조가 흔히 관찰된다. 이 구역에서 관찰된 생흔구조는 주로 무척추동물이 기어간 자국으로 폭은 보통 약 2 mm 내외에 달하고 길이는 다양하다.

3.3 C 구역

A 및 B 구역과는 달리 C 구역에 노출되어 있는 퇴적층의 두께는 수 cm 정도으로써, 노출된 층면의 대부분은 B 구역의 최상부 지층에 대비된다. C 구역을 이루는 지층 역시 A 및 B 구역과 마찬가지로 엷층 또는 얇은 층으로 발달한 담회색의 세립사암 내지 실트스톤과 암회색 이암의 호층암상이다. 사질층의 일부에서는 연흔층리가 나타나며, 사질층의 표면에서도 국부적으로 연흔이 관찰된다. 연흔의 파장은 2 내지 6 cm 정도이고 파고는 대체적으로 1 cm 내외이며, 연정선의 굴곡은 A 및 B 구역과 마찬가지로 전반적으로 미약한 편이다. 노출면에는 수십 cm 직경의 다각상 건열구조가 집중적으로 산출함이 특징이며, 일부에서는 불완전한 비다각상의 건열도 관찰된다.

C 구역 지층의 최상부로부터 약 1 cm 하위에 발달한 퇴적층의 표면에서는 B 구역에서 관찰되는 무척추동물에 의한 생흔구조와 새발자국 화석이 산출한다.(그림 6G, 6H) 이 구역의 생흔구조는 B 구역에서 관찰되는 것과 동일한 특성을 보인다. C 구역에서도 규화목편이 일부 발견되었다(그림 6K).

4. 새발자국 화석의 종류 및 산상

새발자국 화석은 연구지역 퇴적층의 두 층준에서

발견되었으며(그림 4), 이들 새발자국 화석의 종류를 구분하고 형태적 특성을 기술하기 위해 새발자국 화석을 계측하였다. 새발자국의 계측은 Thulborn (1990)의 공룡발자국 계측법을 기준으로 하여 실시하였다. 측정항목은 발자국 길이, 발자국 폭, 각 발가락의 길이, 발가락 사잇각이고, 보행열을 보이는 경우에는 걸음 거리(pace), 걸음 각(pace angle), 보폭 거리(stride), 발자국 수, 보행방향 등을 추가로 측정하였다. 각 항목별 계측방법은 그림 7에 간략히 표현되어 있다.

새발자국 화석은 B 및 C 구역에서 산출되었고, 새발자국 화석이 산출되는 층준이 부분적으로 표면에 노출되어 있어 육안으로 관찰이 가능하였다. B 구역에서는 35개의 새발자국 화석이 확인되었고, C 구역에서는 이보다 훨씬 많은 90개의 새발자국 화석이 확인되었으며, 이외에도 보존상태가 불완전한 다수의 새발자국이 관찰되었다. 이들 새발자국은 여러 부분에 산포되어 나타나는데, 한 부분에 적게는 2~3개, 많게는 수십 개의 발자국이 밀집된 양상이 관찰된다. 또한 새발자국 화석이 산출되는 층준에는 무척추동물의 생흔구조가 함께 산출되며 어떤 경우는 새발자국과 중첩되는 경우도 관찰되었다. 이 때문에 새발자국 화석을 기재하는데 다소 어려움이 있었으나 이들 노출면에서 관찰되는 새발자국 가운데 계측이 용이한 가장 선명한 것을 우선하여 계측하였다.

연구지역의 새발자국 화석은 발자국의 크기와 형태를 바탕으로 크게 세 가지 종류로 구분되었고, 이들 새발자국 화석 가운데 두 종류는 진동층에서 보고된 바 있는 *Koreanaornis hamanesis* 와 *Jindongornipes kimi*이며, 나머지 한 종류는 진동층에서 처음으로 보고되는 물갈퀴가 있는 새발자국이다. 이 연구에서는 기재의 편의상 각각을 K형, J형 및 W형 발자국으로 구분하여 기술하였다. 또한 계측된 새발자국 가운데 B 구역에서는 1개의 보행열과 C 구역에서는 6개의 보행열이 확인되었다.

4.1 K형 발자국 (*Koreanaornis hamanesis*)

K형 발자국은 하부 층준에서 산출되며, 연구지역에서 가장 우세하게 산출되는 유형으로 세 유형 가운데 가장 크기가 작다(그림 8, 표 1). 평균 발자국 길이는 2.4 cm (범위 1.9~3.4 cm)이고 발자국 폭은 3.0 cm (범위 2.4~4.4 cm)로 길이보다 폭이 더 크다. 또

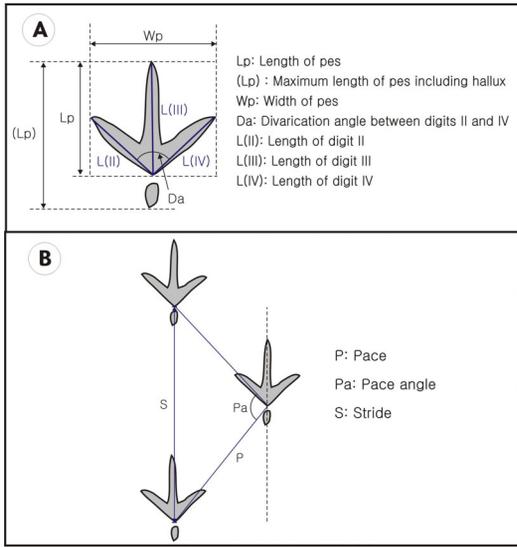


Fig. 7. Measurements of bird footprint and bird trackway (modified from Thulborn (1990)).

한 발가락 사잇각은 평균 119° (범위 90~140°)이다. 발가락 사잇각은 대부분 110~120° 사이이나, 간혹 130~140° 범위를 보이는 것이 관찰된다. K형 발자국은 발뒤꿈치가 잘 나타나지 않아 흔히 떨어져서 나오고(그림 8A), 발가락 I (hallux)이 뚜렷하게 나타나는 경우는 흔하지 않으며 대부분 세 개의 발가락만 나타난다. 간혹 hallux가 뚜렷하게 나타나는 경우가 있으나 이는 휘어져 있다(그림 8C). 때때로 날카로운 발톱의 흔적도 나타난다(그림 8D). 발가락 III을 중심으로 하여 발가락 II와 발가락 IV은 흔히 대칭적인 모양을 보이며, 이는 발가락 II와 III의 사잇각과 발가

락 III과 IV의 사잇각의 차이가 세 유형 중 가장 적게 나타난다는 점에서도 알 수 있다(표 1). 연구지역에서 발견된 새발자국 중 가장 산출밀도가 높아 발자국 끼리 중첩되어 나타나는 경우도 있다(그림 8B). K형 새발자국은 흔히 소형 무척추동물의 생흔구조와 수반되며(그림 8B) 간혹 W형 발자국과 함께 산출된다.

이 유형에서는 4개의 보행열이 관찰되었다(표 2, 그림 8A). 걸음 거리는 짧게는 4 cm에서 길게는 7 cm 까지 나타나며, 보폭 거리는 짧게는 6 cm에서 길게는 13 cm까지 나타난다. 걸음 각은 140~150°의 범위를 갖는다. 보행열에 따라 각각의 측정된 값이 차이가 나는 것은 보행속도의 차이인 것으로 추정된다. 빠르게 보행했을 경우 걸음 거리와 보폭 거리는 길게 나타날 것이며, 느리게 보행했을 경우는 짧게 나타날 것이다. 보행열을 보이는 경우 발자국이 안쪽으로 휘어져 나타나는 경우도 있으며, 보행방향은 다소 산발적으로 나타난다(그림 11).

4.2 J형 발자국 (*Jindongornipes kimi*)

대부분 상부 층준에서 산출되는 J형 발자국은 연구지역에서 K형 발자국 다음으로 우세하게 산출되는 종으로 크기 면에서 K형 발자국과 확연히 구분이 된다(표 1). 평균 발자국 길이가 5.1 cm (범위 3.3~7.2 cm)이며, 발자국 폭은 6.4 cm (범위 3.7~8.5 cm)로 흔히 길이보다 폭이 더 크나 hallux가 나타나는 경우 그 길이를 포함하면 평균 7.0 cm으로 폭보다 더 길다. 발가락 사잇각은 평균 138°(범위 103~163°)로 넓은 것이 특징이며, 간혹 발뒤꿈치가 희미하고 발가락은 떨어져서 나오는 경우가 있으나 대부분 발뒤꿈

Table 1. Measurements of bird footprints at study area

Types	Number of measured footprints		Range (Average)					Lp/Wp	Ichnospecies
	B zone	C zone	Lp (cm)	Wp (cm)	Da (°)	A1(II/III) (°)	A2(III/IV) (°)		
K type	19	66	1.9-3.4 (2.4)	2.4-4.4 (3.0)	90-140 (119)	34-83 (56)	30-103 (63)	0.81	<i>Koreanaornis hamanensis</i>
J type	12	21	3.3-7.2 (5.1)	3.7-8.5 (6.4)	103-163 (138)	23-81 (61)	50-109 (77)	0.79	<i>Jindongornipes kimi</i>
W type	4	3	4.0-5.4 (4.8)	4.7-7.3 (5.3)	100-144 (122)	45-73 (55)	52-77 (67)	0.9	New web-footed bird

* Lp=Length of pes; Wp=Width of pes; Da=Diverication angle between digits II and IV; A1(II/III)=Angle between digits II and III; A2(III/IV)=Angle between digits III and IV.

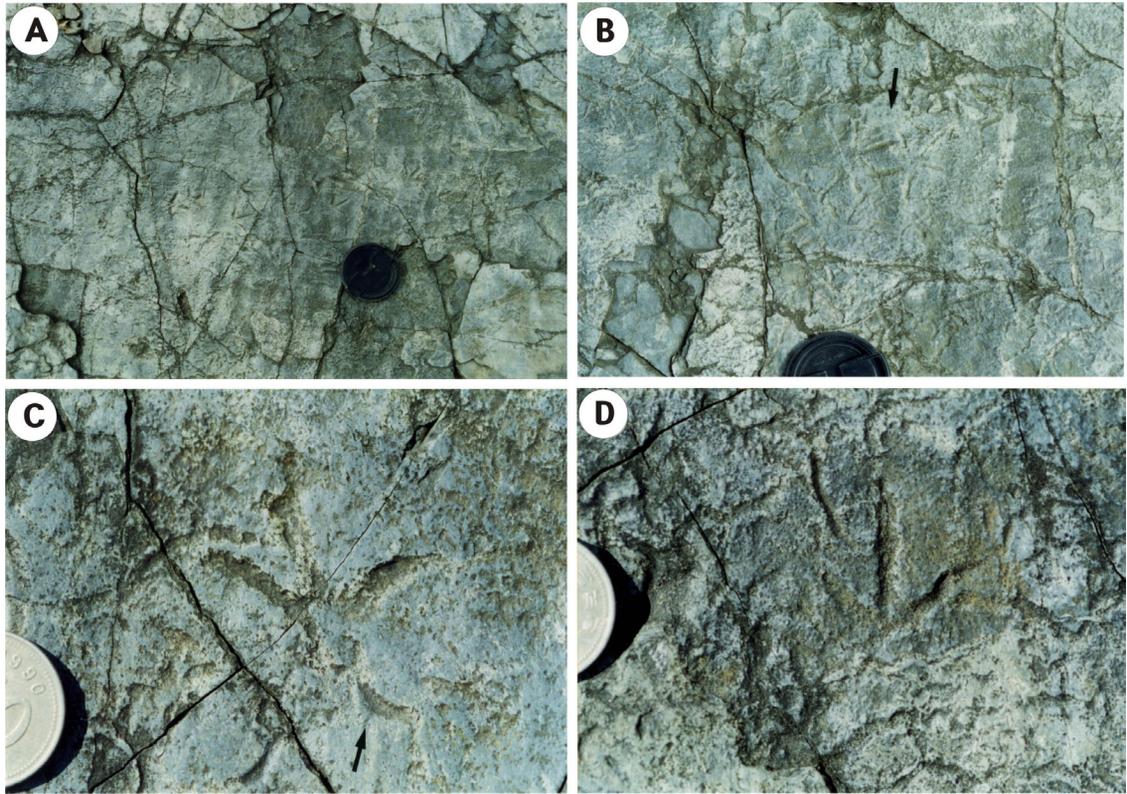


Fig. 8. K type bird footprints of study area. K type tracks are identical with *Koreanaornis hamanensis*. A. Trackway of K type footprints. B. Dense K type tracks (arrow). Mud cracks are associated with bird footprints. C. Curved hallux (arrow). D. K type footprint showing pointed claw. Small invertebrate trace fossils are associated.

Table 2. Measurements of bird trackways at study area

Types	Zone	P (cm)	S (cm)	Pa (°)	Number of tracks	Orientation of trackway
J	B	15-16	26	135	6	280
J	C	10	18-23	145	9	2
J	C	16	30	180	5	240
K	C	4.5	8.5	145	5	321
K	C	7	12-13	150	13	3
K	C	4.5-7	9-10	140	8	280
K	C	4-6	6-9	140-150	12	348

* P=Pace; S=Stride; Pa=Pace angle.

치와 hallux가 뚜렷하게 나타나는 것도 특징이다(그림 9A, 9B). hallux는 직선이거나 휘어져 나타난다(그림 9A, 9B). 주로 뒤꿈치는 약간 오목한 형태를 보이고 발가락 끝은 뾰족하다(그림 9C). 대부분 발가락 III을 중심으로 비대칭적인 모양을 보이며, 발가락 II와 III 사잇각은 발가락 III과 IV 사잇각에 비해 훨씬 작아 그 차이는 세 유형 중 가장 크다(표 1). 보행열을

보이는 경우 발자국이 안쪽으로 휘어져 나타나는 경우도 있으며(그림 9C) 발가락 사잇각이 컸다가 점차 줄어드는 경우도 관찰되었다. J형 발자국은 K형 발자국과 무척추동물의 생흔구조와 간혹 함께 산출된다(그림 9D).

이 유형에서는 3개의 보행열이 측정되었다(표 2, 그림 9C, 9D). 걸음 거리는 짧게는 10 cm에서 길게

는 16 cm 까지 나타나며 보폭 거리는 짧게는 18 cm 에서 길게는 30 cm까지 나타난다. 걸음 각은 135~180°의 범위를 갖는다. 이 값은 K형에 비해 훨씬 크게 나타나는데, 이는 발자국의 크기가 훨씬 큰 것을 고려해 볼 때 당연한 결과일 것으로 여겨진다. 역시 보행열에 따라 각각의 측정된 값이 차이가 나는 것은 보행속도의 차이인 것으로 추정된다. 보행방향은 K형과 마찬가지로 다소 산발적으로 나타난다(그림 11).

4.3 W형 발자국 (Web-footed bird tracks)

연구지역에서 가장 적게 산출되는 새발자국으로 발가락 II와 III, 발가락 III과 IV 사이에 물갈퀴 자국이 나타나는 것이 특징이며 발가락 I (hallux)은 관찰되지 않는다(그림 10A). 평균 발자국 길이는 4.8 cm (범위 4~5.4 cm)이며 발자국 폭은 5.3 cm (범위 4.7~7.3 cm)로 길이보다 폭이 크다. 발가락 사잇각은 평균 122°(범위 100~144°)이다(표 1). 뒤꿈치 부분은 오목하며, 보통 발가락 III이 다른 발가락에 비해 길고, 발가락 III을 기준으로 약간 비대칭적이다. W형 발자국은 K형 발자국과 수반되며 소형 무척추동물의 생흔구조와 함께 산출된다(그림 10B, 10C).

물갈퀴가 있는 새발자국 화석은 반물갈퀴가 있는

새발자국 화석을 포함하여 국내에서는 4종, 즉 *Uhangrichmus chuni*와 *Hwangsanipes choughi* (Yang et al., 1995), *Ignotornis yangi* (Kim et al., 2006), *Goseongornipes markjonesi* (Lockley et al., 2006a)가 보고되어 있다. 이 가운데 *Hwangsanipes choughi*는 크기가 가장 크고 *Uhangrichmus chuni*에 비해 발가락 사이의 각도가 크며, hallux가 나타나는 것이 특징이다. *Uhangrichmus chuni*는 *Hwangsanipes choughi*와 비교했을 때 크기는 작으나 분명한 물갈퀴가 나타나며 hallux는 관찰되지 않는다. *Ignotornis yangi*는 *Hwangsanipes choughi*에 비해 크기는 작으며 hallux가 잘 나타난다. 그리고 *Goseongornipes markjonesi*는 크기면에서는 다른 물갈퀴가 있는 새발자국 화석 가운데 작은 편에 속하고 희미하게 반물갈퀴가 발달되어 있다는 점이 특징이다.

연구지역의 W형 발자국은 크기와 형태에서 다소 *Hwangsanipes choughi*와 유사해 보이나, hallux의 흔적은 나타나지 않고 발가락 II와 IV의 끝이 안쪽으로 휘어진 모습은 나타나지 않는다. 또한 연구지역의 W형 발자국은 국내에서 이미 보고된 물갈퀴가 있는 새발자국 화석과는 크기나 형태에 있어서 다르다. 이는 물갈퀴가 있는 이 유형의 새발자국 화석이 국내에 보고된 바가 없

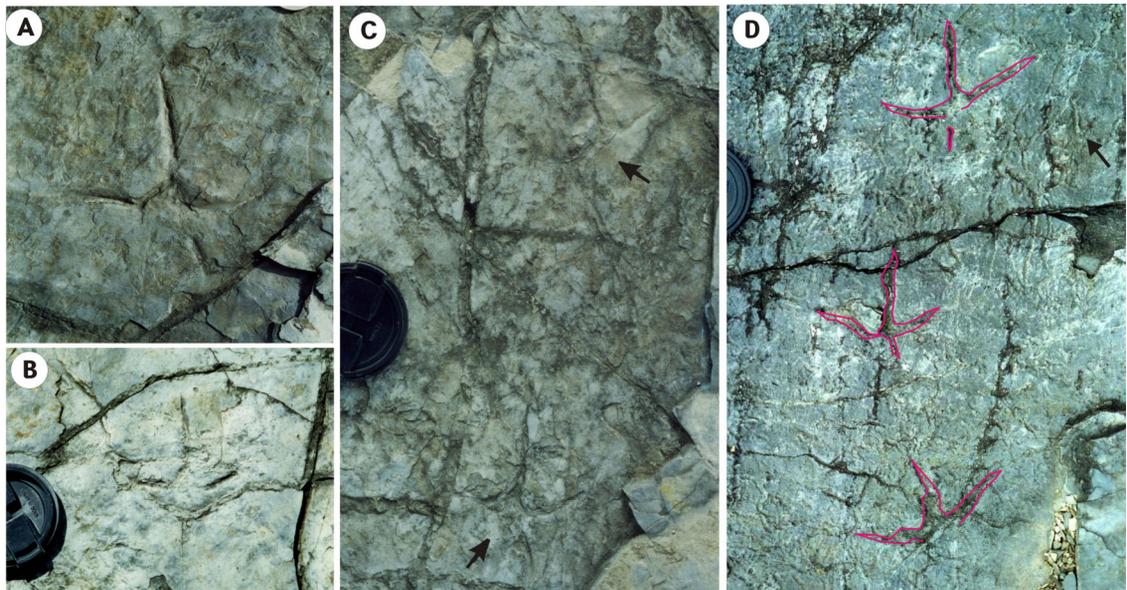


Fig. 9. J type bird footprints of study area. J type tracks are identical with *Jindongornipes kimi*. A, B. Hallux impressions are well preserved. C. Trackway of J type footprints (arrows). Vivid heels and hallux impressions are usually displayed. Mud cracks are associated. D. Trackway of J type footprints. K type tracks (arrow) and small invertebrate trace fossils are associated with J type bird tracks.

는 새로운 종일 가능성이 있음을 시사한다.

5. 토의 및 결론

연구지역인 경남 마산시 호계리 부근에 분포하는 상부 백악기 진동층에서 많은 새발자국 화석이 산출되었다. 새발자국 화석이 산출되는 지층은 실트스톤 내지 세립사암과 이암이 엇층으로 교호하고 있는 암상이다. 이 암상은 호수주변부 이질평원환경의 층상 범람 퇴적층으로 해석되었다(김현주, 백인성, 2001; Paik and Kim, 2006). 또한 연구지역 새발자국 산출

퇴적층에서는 다각상의 건열구조, 연흔구조 및 증발 광물 캐스트 등이 수반되었고, 뿐만 아니라 무척추동물의 생존구조와 공룡발자국 화석이 산출되었다. 이는 새발자국 화석이 건조한 기후의 호수주변부 이질 평원환경에서 형성된 것임을 뒷받침하는 것이다.

연구지역에서 산출된 새발자국 화석은 형태 및 크기에 따라 세 종류, 즉 K형, J형 및 W형 발자국으로 구분되었다. 백악기 진동층에서는 세 종류의 새발자국, 즉 *Koreanaornis hamanensis*와 *Jindongornipes kimi* (Lockley et al., 1992), *Goseongornipes markjonesi* (Lockley et al., 2006)가 산출되는 것으로 보고되어

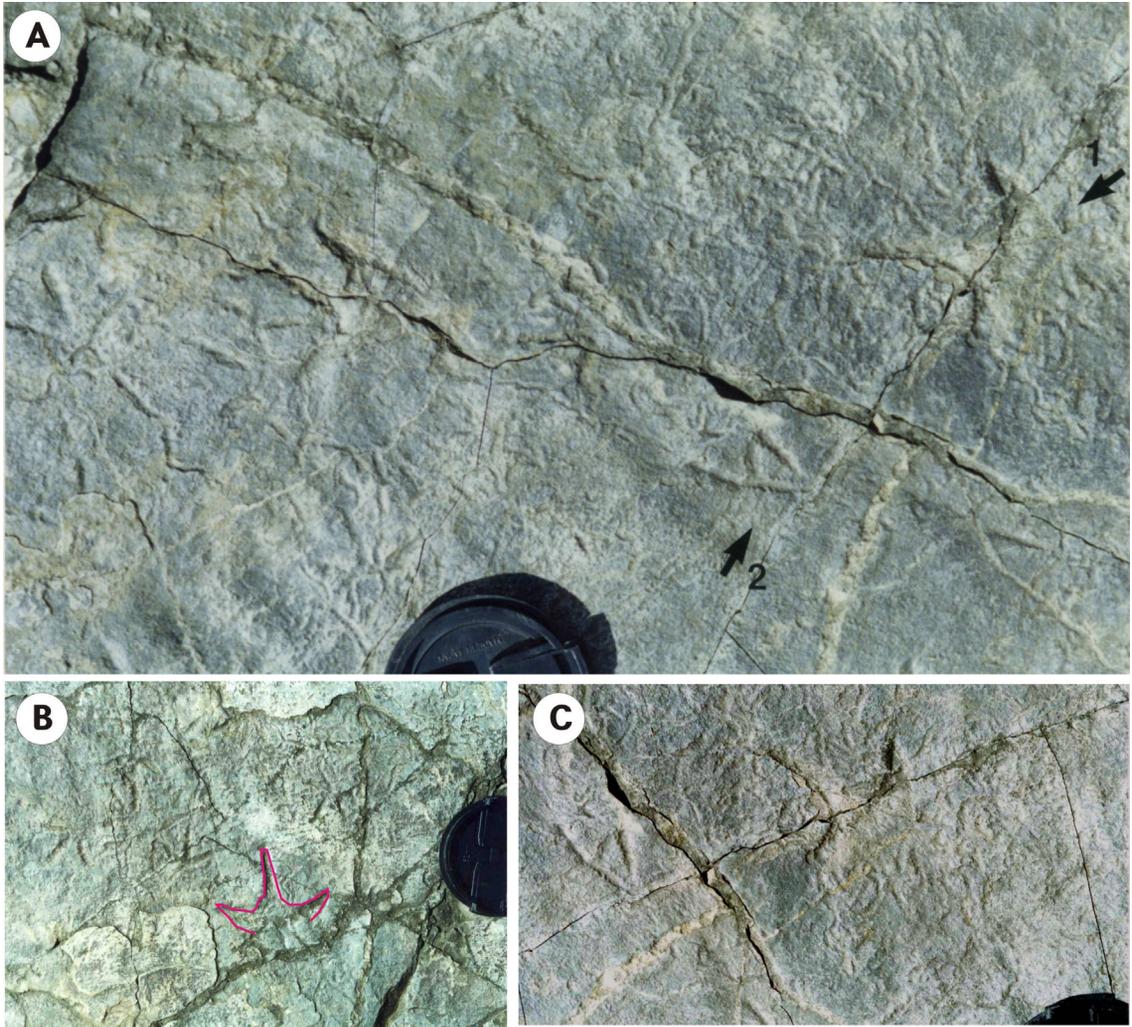


Fig. 10. W type bird footprints of study area. W type tracks are characterized by web-footed tracks. W type tracks are similar to *Hwangsaniipes choughi* in size. However, W type tracks are different from *Hwangsaniipes choughi* in morphology. A, B, C. W type tracks (arrow 1 in A). K type tracks (arrow 2 in A), small invertebrate trace fossils and mud cracks are associated.

있다. 연구지역인 경남 마산시 호계리에서 관찰되는 K형 발자국은 *Koreanaornis hamanensis*에 해당하며, J형 발자국은 *Jindongornipes kimi*에 해당한다. 이와 함께 연구지역에서는 W형 발자국인 물갈퀴가 있는 새발자국 화석이 발견되었다. 이것은 이미 진동층에서 보고된 바가 있는 *Goseongornipes markjonesi*와는 형태와 크기에 있어서 전혀 다르다. 크기에 있어서는 *Hwangsanipes choughi*와 유사하나 이 역시 형태에 있어서는 다소 차이를 보인다. 연구지역의 물갈퀴 새발자국 화석은 *Hwangsanipes choughi*에서 관찰되는 hallux는 나타나지 않는다. 또한 *Hwangsanipes choughi*와 같이 발가락 II와 IV의 끝부분이 안으로 휘어진 형태를 보이지 않는다. 이러한 점에서 연구지역에서 산출된 물갈퀴 새발자국 화석을 형성한 새가 새로운 종일 가능성에 대해서도 고려해 보아야 할 것으로 여겨진다.

연구지역의 새발자국 화석 중 K형 발자국이 가장 산출량이 많았으며, 다음으로 J형과 W형 순으로 산출되었다(표 1). 특히 K형 발자국은 밀집도가 높게 나타나는데, 이는 K형 발자국을 만든 새들이 무리지어 서식하였을 가능성이 높거나 몇몇 개체들의 활동성이 비교적 높아 많은 발자국을 만들었을 것으로 여겨진다(Yang *et al.*, 1995).

또한 연구지역의 새발자국 화석은 두 층준에서 발견되었는데(그림 4), 소형인 K형 발자국은 하부 층준에서 산출되며 대형인 J형 발자국은 대부분 상부 층준에서 산출되어 다소 상호 배타적인 양상을 보인다. 드물게 K형 발자국이 나타나는 하위 층준에서 J형 발자국이 나타나는 경우도 있으며, W형 발자국은 K형 발자국과 함께 나타난다. K형 발자국과 J형 발자국이 다른 층준에서 각각 우세하게 산출되는 상호배타성에 대한 이유는 확실치 않으나 동물의 크기, 수심 및 먹이 채취의 습관 등과 관련 있는 것으로 여겨진다(Lockley *et al.*, 1992).

새발자국 화석 산출구역인 B구역과 C구역에서 두 구역 간에 다른 종류의 새발자국 화석이 우세하게 나타난다거나 하는 식의 새발자국 화석 산출 특성의 차이는 인지할 수 없었다. 물갈퀴가 있는 새발자국 화석의 경우는 B구역의 경우가 더 많이 산출되었으나, 이러한 사실만으로 당시 새가 서식했던 환경의 차이라거나 서식했던 새의 생태적인 차이 등을 언급하기엔 측정된 발자국의 개수가 부족하고, 또한 두 구역

간의 거리가 가깝고 새발자국 화석이 산출되는 층의 퇴적학적 특성이 동일하여, 이러한 현상은 특별한 의미가 없는 것으로 여겨진다.

연구지역에서는 총 7개의 새발자국 보행열이 확인되었다. 이 가운데 4개는 K형 발자국이고 3개는 J형 발자국에 해당한다. 이 보행열들은 다양한 방향에서 산발적으로 산출되어 뚜렷한 방향성을 보이지는 않는 것으로 나타났다(그림 11). 새발자국 화석과는 달리 연구지역의 용각류 공룡발자국 보행열의 경우는 뚜렷한 방향성을 보이는데, 호안선의 방향과 보행열의 방향이 대체적으로 평행하게 나타나는 것으로 보고되었으며(황구근 외, 2002), 이는 당시 공룡들이 호안선을 따라 이동한 것으로 해석되었다.

연구지역의 진동층은 호수주변부 이질평원의 퇴적층이다. 또한 다소 건조하고 염도가 높았던 호수환경임을 지시하는 증발광물 캐스트도 산출된다. 이는 백악기 진동층이 과거 척추동물 발자국이 산출되는 지층들과 유사한 환경조건이었음을 지시하는 것으로(Cohen *et al.*, 1991), 이러한 환경조건이 백악기 진동층에 많은 공룡발자국과 새발자국 등이 보존될 수 있게 해 준 것으로 여겨진다. 또한 연구지역의 새발자국 화석은 무척추동물의 기어간 자국과 흔이 수반된다. 이러한 무척추동물의 생존구조는 당시 발자국을 만든 새들의 먹이가 될 만한 무척추동물이 서식했음을 지시하는 것과 함께 이들 무척추동물의 활동으로 인해 새발자국들이 보존되지 않고 훼손되었거나 소멸되었을 가능성도 잠재되어 있음을 시사한다. 실제로 야외에서 새발자국과 무척추동물의 생존구조들이 서로 뒤섞여 새발자국 화석을 분명히 인지할 수 없었던 경우도 관찰되어 생물학적 과정에 의한 훼손 및 소멸 가능성을 뒷받침한다. 뿐만 아니라 연구지역에서는 새발자국 화석과 함께 연흔과 건열이 산출된다. 이러한 사실은 Cohen *et al.* (1991)이 제시한 물리적 요인 또는 생물학적 활동에 의해 새발자국이 소멸되었을 가능성을 뒷받침한다.

Cohen *et al.* (1991)은 호안선에서 먼 곳일수록 척추동물 발자국의 보존력은 감소하고, 호안선과 가까운 곳일수록 척추동물 발자국의 보존력은 증가함을 제시하였다. 일반적으로 호안선에서 먼 곳은 척추동물 발자국이 보존된다 할지라도 대형 척추동물 발자국의 보존가능성이 높으며, 호안선과 인접한 곳은 소형과 대형 척추동물 발자국이 함께 보존되고, 얇은

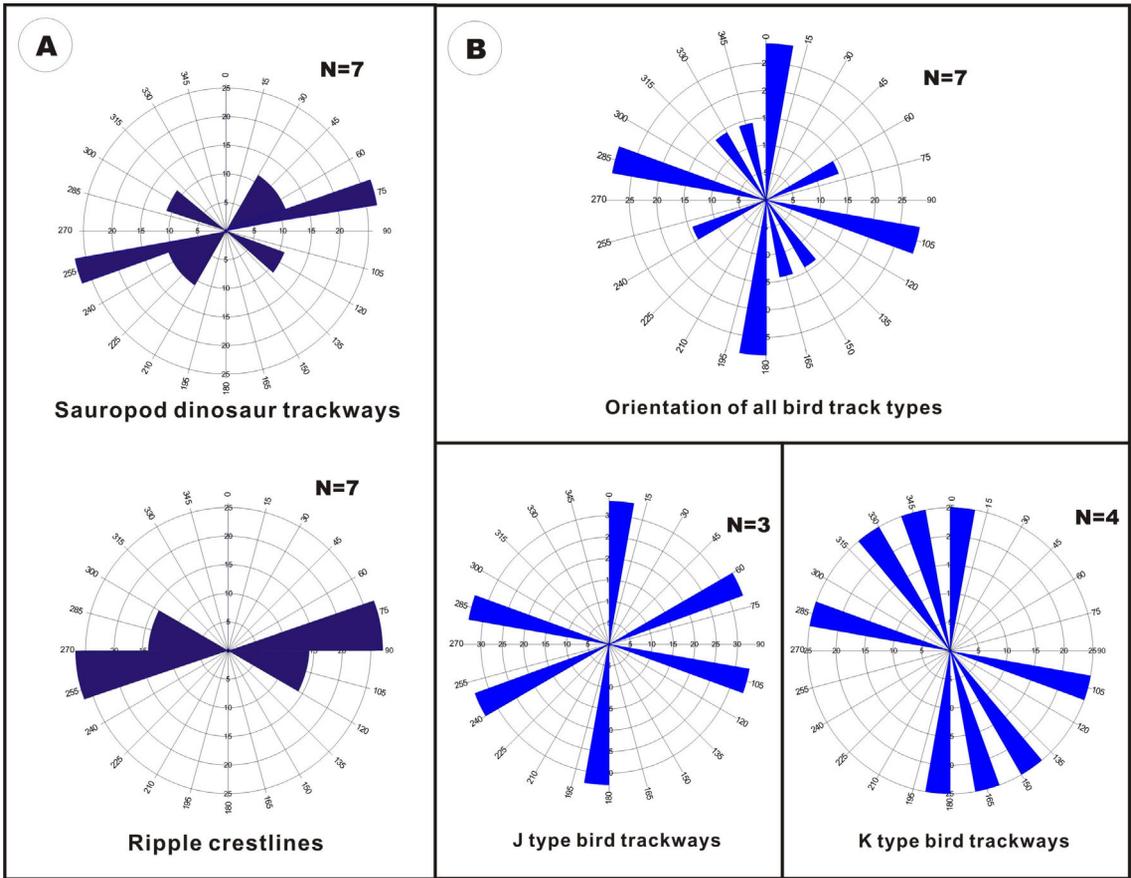


Fig. 11. A. Rose diagram showing the orientations of dinosaur trackways and crestlines of the ripples in the Hogyeri fossil site (Hwang *et al.*, 2002). B. Rose diagram showing the orientation of bird trackways at study area.

호수의 물속에는 대형 척추동물의 발자국의 보존 가능성이 높음이 Cohen *et al.* (1991)의 연구를 통해 분석되었다. 연구지역에서는 공룡발자국과 새발자국이 함께 산출된다. 비록 이들이 같은 층준에서 동시에 산출되지는 않으나 산출층 간의 두께가 얇으며, 산출되는 암상이 동일한 점으로 미루어 대형과 소형 척추동물 발자국의 보존력이 가장 좋은 호안선과 인접한 곳에서 보존된 것으로 해석될 수 있다. 이러한 사실은 호수주변부 이질평원으로 해석된 새발자국 화석 산출지층의 암상 및 퇴적학적 특성을 통해서도 확인되었다.

우리나라 남해안 지역에 분포하는 백악기 퇴적층에서는 다양한 새발자국 화석이 산출되었다(그림 1, 그림 2). 그 가운데 전 세계적으로도 산출밀도가 높은 것으로 알려진 경남 진주시 가진리의 함안층에서

도 세 종류의 새발자국 화석, 즉 *Koreanaornis hamanensis*와 *Jindongornipes kimi*, *Uhangrichnus chuni*가 산출된다(백광석, 양승영, 1998). 함안층은 보통 판상 사암 내지 실트스톤 위를 붉은색 이암이 얇게 피복하고 있는 암상이 주를 이루는데, 이들은 백악기 당시 아열대 내지 열대기후의 충적평원환경에서 퇴적된 지층으로서, 퇴적당시 하천의 발달이 없고 분지의 가장자리에 우기 시 간헐적으로 하천이 발달하면서 판상류에 의해 퇴적작용이 일어났던 것으로 해석되었다(장기홍, 1978; 엄상호 외, 1983; Choi, 1986). 경남 진주시 가진리의 새발자국 화석층 역시 일반적인 함안층의 특성을 잘 보여준다.

가진리 지역은 다양한 새발자국 화석이 한 지역에서 산출된다는 점에서 호계리 지역과 유사성을 보이나, 새발자국 산출층의 암상과 수반되는 퇴적구조 등

의 특성에 있어서 차이가 있고, 뿐만 아니라 새발자국의 밀도에 있어서도 다소 차이가 있다. 가진리 함안층의 새발자국 화석은 사암을 얇게 피복하고 있는 붉은색 이암에서 산출되는데 반해, 연구지역인 호계리 진동층의 새발자국 화석은 엽층으로 발달하는 세립사암과 이암의 교호암상 내 회색 내지 암회색 이암에서 산출된다. 가진리의 새발자국 화석 산출층에서는 연흔구조, 생흔구조가 간혹 수반되나 호계리의 새발자국 화석은 건열구조, 증발잔류광물의 흔적과 더불어 많은 소형 무척추동물의 생흔구조가 흔히 수반된다.

호계리의 새발자국 화석은 가진리 함안층의 새발자국 화석에 비해 밀도는 떨어진다. 이 두 지역 간 새발자국 화석의 산출 밀도의 차이는 당시 각 지역을 찾아온 새들의 개체수와 활동력과 같은 습성에 의해서 기인한 것으로 생각해 볼 수 있다. 그러나 두 지역에서 산출 밀도가 가장 높은 새발자국 화석은 모두 *Koreanaornis hamanensis*이라는 점을 고려할 때 발자국의 산출 밀도는 새들의 습성에 따른 것이기 보다는 개체수에 기인되었을 가능성이 더 컸던 것으로 여겨진다. 또한 두 지역 간 퇴적환경에 있어서의 차이와 새발자국 화석의 보존력의 차이 또한 영향을 미쳤을 것으로 여겨진다.

연구지역에 다양한 종의 새발자국 화석이 산출되고 이와 함께 공룡발자국과 무척추동물의 생흔구조가 수반되며, 증발잔류광물의 흔적이 산출되는 사실은 백악기 당시 새들이 건조한 기후에 물을 마시기 위해 멀리 지어 호수를 찾아왔거나, 호수주변 이질평원에서 무척추동물을 먹이로 하여 일시적으로 서식하였을 가능성을 제시하는 것이다. 뿐만 아니라 한

지역 내 좁은 공간에서 서로 다른 형태를 보이는 새발자국 화석이 산출되고, 이와 함께 공룡발자국과 무척추동물의 생흔구조들이 함께 산출되는 것은 우리나라 백악기 후기 호계리 진동층의 이질평원환경이 현생의 사바나환경과 같이 건조한 시기동안 새 뿐만 아니라 공룡, 그리고 무척추동물 등 다양한 생물들이 서식하는 생태공간(그림 12)으로서의 역할을 했음을 시사한다.

중생대 새발자국 화석에 관하여 수행되었던 과거 연구 가운데 우리나라에서 산출된 것에 대한 보고가 많은 부분을 차지하고 있다. 이것은 우리나라가 세계적으로도 중요한 중생대 새발자국 화석지임을 뒷받침하여 주는 것이다. 또한 연구지역과 같이 좁은 공간(면적 약 400 m², 그림 3D)에서 다양한 형태를 보이는 새발자국 화석이 함께 산출되는 것은 전세계적으로도 드문 경우이다. 이것은 같은 시대, 같은 장소에서 다양한 새들이 함께 서식하며 공존했음을 의미하는 것으로, 백악기 당시 한반도에 서식하던 새의 종의 다양성을 보여주는 것이다. 호계리 새발자국 화석지는 국내에서 새발자국 화석의 또 하나의 산지로 보고됨과 동시에 우리나라가 새발자국 화석의 연구지로서 가치가 있음을 뒷받침하는 추가적인 기록이 될 것으로 여겨진다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(KOSEF R01-2008-000-20056-0)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드린다. 이 논문의 기초자료가 된 표품

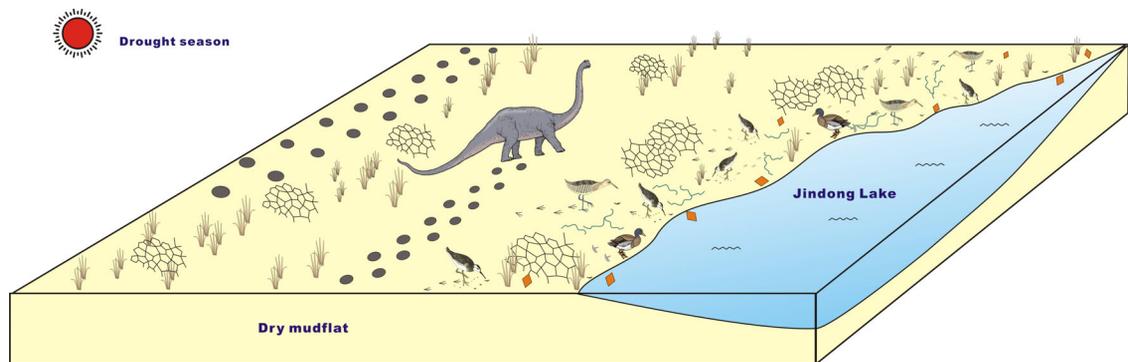


Fig. 12. Summarized diagram of the paleoecological environment of study area. Hogyeri dry mudflat was one of the vital ecosite exploited by dinosaurs, birds, and invertebrates during drought season like as in recent Savannah area.

의 채취와 시편제작에 도움을 준 부경대학교 환경지질학과 지구고환경연구실의 실험실원께도 고마움을 전하며, 이 논문의 개선을 위해 건설적인 비평과 유익한 도움말을 주신 한국교원대학교 김정률 교수님과 경북대학교 이성주 교수님께도 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김봉균, 1969, 함안층에 발달하는 솔마크에 관한 연구. 지질학회지, 5, 243-258.
- 김정환, 김정택, 1963, 한국지질도(1:50,000), 마산도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 26 p.
- 김찬수, 박계현, 백인성, 2005, 백악기 신라역내 화산암력의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 및 하양층군의 퇴적시기에 대한 고찰. 암석학회지, 14, 38-44.
- 김항목, 1993, 한국 공룡골격의 화석성인론에 관한 연구. 자연사환경, 1, 39-64.
- 김현주, 백인성, 2001, 경상남도 고성군에 분포하는 백악기 진동층의 퇴적상 및 퇴적환경. 지질학회지, 37, 235-256.
- 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, 이정은, 소윤환, 황구근, 허민, 2004, 경상남도 창녕군 도천리의 진동층에 발달된 중발암광물 캐스트에 대한 예비연구. 대한지질학회 제 59차 추계학술발표회(초록), 155 p.
- 양승영, 1982, 상부 경상누층군에서 발견된 백악기 공룡의 족흔화석에 관하여. 지질학회지, 18, 37-48.
- 윤선, 손양은, 1995, 경상남도 덕령리 해안과 고현리 해안의 진동층의 퇴적구조와 고환경. 고생물학회지, 11, 79-99.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 곽영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구. 한국동력자원연구소 연구보고 36, 124 p.
- 임성규, 1990, 한국 고성 백악기 진동층의 생흔화석. 경북대학교 대학원 박사학위 논문, 126 p.
- 장기홍, 1978, 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조(II). 지질학회지, 14, 120-135.
- 장기홍, 이윤중, 스즈키 카즈히로, 박순옥, 1998, 백악기 구산동응회암 저어콘 결정들의 형태 CHIME 연령 및 지사적 의의. 지질학회지, 34, 333-342.
- 좌용주, 이용일, Orihashi, Y., 2004, 구산동 응회암과 진동 화강암에서 산출되는 저어콘에 대한 U-Pb 연대와 진동층 퇴적시기에 대한 고찰. 대한지질학회 제 59차 추계학술발표회(초록), 73 p.
- 지정만, 김형식, 오인섭, 김학천, 1983, 한국지질도(1:50,000), 삼천포도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 12 p.
- 최유구, 김태열, 1963, 한국지질도(1:50,000), 의령도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 7 p.
- 황구근, 허민, 백인성, 2002, 마산시 호계리 부근의 백악기 진동층에서 산출된 용각류 공룡발자국화석. 지질학회지, 38, 361-375.
- 황구근, 허민, 백인성, 2004, 경상남도 창녕군 도천리의 백악기 진동층에서 산출된 용각류 공룡의 보행열. 지질학회지, 40, 145-159.
- Alonso, R. N. and Marquillas, R. A., 1986, Nueva localidad con huellas de dinosaurios y primer hallazgo de huellas de Aves en la Formacion Yacoraite (Masstrichtian) del Norte Argentino. Actas, IV Congreso Argentino de Paleontologia y Biostratigrafia, Mendoza, 2, p. 33-41.
- 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.
- 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., 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), Neuquen, Argentina. Ameghiniana, 39, 453-463.
- Currie, P. J., 1981, Bird footprints from the Gething Formation (Aptian, Lower Cretaceous) of northeastern British Columbia, Canada. Journal of Vertebrate Paleontology, 1, 257-264.
- 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.
- Lee, Y. I., Choi, T. J., Lim, H. S. and Orihashi, Y., 2008, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, SE Korea: Implications for a new view on the depositional age and provenance. 63rd Symposium of Geological Society of Korea (Abstracts), 25 p.
- Lee, Y. N., 1997, Bird and dinosaur footprints in the Woodbine Formation (Cenomanian), Texas. Cretaceous Research, 18, 849-864.
- 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.
- Lockley, M. G., Nadon, G. and Currie, P. J., 2004, A diverse dinosaur-bird footprint assemblage from the Lance

- Formation, Upper Cretaceous, eastern Wyoming: implications for ichnotaxonomy. *Ichnos*, 11, 229-249.
- Lockley, M. G., Houck, K., Yang, S. Y., Matsukawa, M. and Lim, S. K., 2006a, Dinosaur-dominated footprint assemblages from the Cretaceous Jindong Formation, Hallyo Heasang National Park area, Goseong County, South Korea; evidence and implications. *Cretaceous Research*, 27, 70-101.
- Lockley, M. G., Matsukawa, M., Ohira, H., Li, J., Wright, J., White, D. and Chen, P., 2006b, Bird tracks from Lianjiang Province, China: New insights into avian evolution during the Jurassic-Cretaceous transition. *Cretaceous Research*, 27, 33-43.
- Matsukawa, M. (ed), 1991, Lower Cretaceous non-marine and marine deposits in Tetori and Sanchu, Honshu. IGCP-245 Field Trip Guide Book., Fukuoka, Japan: Fukuoka International Symposium, Kyushu University. 116 p.
- Mehl, M. G., 1931, Additions to the vertebrate record of the Dakota Sandstone. *American Journal of Science*, 5, 21, 441-452.
- Paik, I. S. and Kim, H. J., 1998, Subaerial lenticular cracks in Cretaceous lacustrine deposits, Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 68, 80-87.
- 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., 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.
- Rihui, L., Lockley M. G. and Mingwei, L., 2005, A new ichnotaxon of fossil bird track from the Early Cretaceous Tianjialou Formation (Barremian-Albian), Shandong Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 50, 1149-1154.
- Shuonan, Z., Jianjun, L., Baokun, Z., Wei, C. and Songlin, Z., 1995, Dinosaur and bird footprints from the Lower Cretaceous of Emei County, Sichuan, China. *Memoirs of Beijing Natural History Museum*, 54, 105-120.
- Tomida, Y. and Azuma, Y., 1992, The earliest known bird footprints from the lowermost Cretaceous, Tetori Group, Japan. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 12 (3, Suppl.), 56A.
- Thulborn, R. A. 1990. *Dinosaur tracks*. Chapman & Hall, London, 166-173.
- White, D., Lockley, M. G., Wright, J., Lu, F., Hong, L. and Jianjun., 2001, Bird tracks and running theropods from the Lower Cretaceous of Inner Mongolia. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 21 (3, Suppl), 113.
- 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 : 2008년 11월 17일

심 사 일 : 2008년 11월 20일

심사완료일 : 2008년 12월 24일