

해남 우항리 대형 공룡발자국 화석 주변에 발달하는 변형특성을 이용한 고환경과 단열 생성원인 해석

김용형¹ · 김영석^{1,*} · 허민²

¹부경대학교 환경해양대학 지구환경과학과

²전남대학교 지구환경과학부

요약

한반도 남서부 지역의 정상누층군 백악기 퇴적암에는 다양한 화석들이 발견된다. 특히 전라남도 해남군 우항리 지역에서 관찰되는 우항리층 하부의 흑색 셰일에는 다양한 화석들(공룡-익룡-새 발자국 등)이 보존되어 있다. 이 지역에서 발견되는 화석 주변으로는 몇 가지 흥미로운 점이 관찰된다. 일반적으로 발자국 화석은 미고결 퇴적물에서 생성되고, 단열은 고화된 암석에서 취성변형과 관련되어 발달하는 구조로 잘 알려져 있다. 그런데 이곳 우항리 공룡발자국 화석산지에서는 공룡의 발자국 주위로 환상의 분포를 보이며 단열들이 발달하고 있다. 이러한 단열과 발자국이 함께 형성되는 발달 메커니즘과 환경은 쉽게 이해하기 어렵다. 따라서 본 연구는 공룡 발자국 화석과 주위에 발달하는 단열들에 대한 변형특성과 통계적 분석을 근거로 둘 사이의 연관성을 조사함으로써 단열발달의 역사와 고환경 정보를 취득하고자 하였다. 이를 위해 우리는 단열의 밀도, 방향, 분포양상 등의 특징들에 대하여 측정하고 분석을 수행하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다. 1) 이 지역에는 크게 4개조의 단열군이 발달하고 있다. 2) 3개의 단열군은 공룡발자국이 형성된 이후 암석화가 진행된 취성의 환경에서 발달하였으며, 공룡발자국 주변으로 환상의 분포를 보이는 단열군은 공룡의 발자국형성과 연관된 것으로 해석된다. 3) 이러한 환상의 단열군과 공룡발자국 주변의 만곡된 양상, 그리고 공룡발자국 주변의 굽힌 자국과 중심의 별모양 등은 호수의 물이 빠지면서 건조되어 가는 반취성 환경에서 공룡발자국이 형성되었다는 것을 강하게 지지하고 있다.

주요어: 해남 우항리, 공룡발자국, 단열, 변형, 고환경

Yong-Hyeong Kim, Young-Seog Kim and Min Huh, 2013, Interpretation of paleo-environment and origin of fractures based on deformation characteristics around Uhangri giant dinosaur footprints in Haenam, Southwest Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 6, p. 625-637

ABSTRACT: A large number of dinosaur footprints have been found in the Cretaceous sedimentary rocks of the Gyeongsang Supergroup in Haenam, the southeastern part of the Korean Peninsula. In particular, the Uhang-ri area, located in Haenam-gun, Jeollanam-do, has some very well preserved trace fossils. Dinosaur, pterosaur, bird, arthropod ichnites, wood fossils and fossilized bones have been observed in this area. Dinosaur footprints were mainly discovered in black laminated mudstone/shale. Furthermore, a few interesting fracture patterns have also been observed at this site. In particular, in the section around the big dinosaur footprints, some fractures with peculiar form, growing radially from the footprints, have been observed, which develop as a ring shape around the dinosaur footprints. Dinosaur footprints may be recorded in unconsolidated sediments, while fractures are geological structures related to brittle deformation in lithified rocks. Therefore, it is difficult to understand the mechanisms and conditions under which fractures and footprints could form together. The aim of this study is to understand the fracture developing mechanism, paleo-environments and the correlation between dinosaur footprint fossils and surrounding fractures, based on the characteristics of deformation through statistical analysis. For this purpose, we measured and analyzed the characteristics of distribution patterns, geometry, orientation, and density of fractures. The conclusions resulting from these analyses are as follows. 1) There are mainly four fracture groups developed in this area. 2) The three fracture sets of the four groups were developed in solidified brittle environments since the dinosaur footprints had already been formed. A fracture group with circular distribution around the big dinosaur footprints, however, are interpreted to be related with the formation of the footprints. 3) The circular

* Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

fracture group, the curved bulges around the footprint fossils, and the scratches and star-shapes within the footprints strongly indicate that the dinosaurs' footprint fossils were formed in a semi-brittle environment that occurred during a drying out phase of the lake.

Key words: Uhang-ri in Haenam, dinosaur footprints, fractures, deformation, paleo-environments

(Yong-Hyeong Kim and Young-Seog Kim, Dept. of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea; Min Huh, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences & Korea Dinosaur Research Center, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea)

1. 서론

화석은 주로 퇴적암에서 발견되는 과거 지질시대 생물들의 기록으로 각 화석마다 다양한 지질학적 의미를 내포하고 있다. 우리는 현재 주변에서 발견되는 화석을 통해 다양했던 과거의 지질학적 환경과 상황을 유추한다. 예를 들자면 어떤 지역에서 발견되는 화석과 화석이 발견되는 지층의 특징에 따라 퇴적 당시의 기후조건, 주변환경, 퇴적위치, 그리고 퇴적 시기 등을 대략적으로 유추할 수 있다.

한반도 남해 해안선을 따라 발달하는 경상누층군의 백악기 지층들에서 많이 발견되는 공룡발자국 화석들은 과거 생물들의 흔적화석으로 발자국 생성 당시의 환경을 나타내는 중요한 자료이다. 이에 국가적으로 발자국화석 산지를 천연기념물로 지정하여 관리하고 있으며, 추가적인 훼손을 방지하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

전라남도 해남의 우항리층에서는 공룡, 익룡, 새발자국 화석이 발견되어 1996년부터 1998년까지 발굴이 진행되었고, 이후 천연기념물로 지정되었으며, 2002년에는 유네스코 세계유산 잠정목록으로 지정되었다. 이 화석지에 대한 고생물학적, 퇴적학적 연구는 그동안 많은 연구자들에 의해 진행되었고, 특히 이 화석지에서 발굴된 공룡, 익룡, 새발자국 화석들 가운데 해남이크누스우항리엔시스(*Haenamichnus uhangriensis*)를 비롯한 3종은 신종 화석으로 기재되었다(Chun, 1987; Chun *et al.*, 1995; Huh *et al.*, 1996, 1997a, 1997b, 1998; Yang *et al.*, 1997; Lockley *et al.*, 1998; Hwang *et al.*, 2002, 2008; Lee and Huh, 2002; Thulborn, 2004; Lee and Lee, 2006; Song, 2010). 한편 이들 공룡발자국들 가운데 본 연구대상이 되고 있는 공룡발자국의 주인공에 대해서는 그동안 많은 논란이 있었다. 이는 이 발자국이 세계적으로 유래가 없는 매우 특이하고 완벽하게 보존

된 대형 발자국이라는 데에 있었다. 발자국화석만으로 정확한 발자국의 주인을 구별하기는 매우 어렵다. 다만 그 발자국의 주인이 어느 유형의 공룡인지(용각류, 조각류, 수각류), 그리고 때로는 좀 더 세부적인 종류의 분류도 가능하다. 이 발자국에 대한 초기 연구결과는 이것을 앞발로 수영하는 목 긴 용각류 공룡이 남긴 발자국으로 해석하였으나(Lee and Huh, 2002), 이후 Hwang *et al.* (2008)의 연구결과에 의해 이 발자국의 주인은 네 발로 걷는 조각류 공룡에 의해 남겨진 발자국으로 새롭게 해석되었다. 이 연구결과는 금번 연구의 중요성을 더하고 있다.

우리가 이번에 주목한 것은 발자국 화석이 나타나는 지층들 주변에 발달하는 단열들의 발달양상과 발자국 주변에서 나타나는 특성들이다. 일반적으로 단열들은 일정한 방향성을 갖는 단열군을 이루며 발달하고, 다양한 원인에 의해 생성된다. 따라서 우리는 이러한 단열군들의 특성을 이용하여 생성원인과 고응력장을 해석하게 된다. 발자국화석이 나타나는 우항리층에서도 몇몇 일정한 방향성을 보여주는 단열군들이 발달하고 있는데, 흥미로운 것은 이러한 일정한 방향성을 보이는 단열들 이외에도 특이한 형태의 단열들이 발달하고 있다는 것이다. 그것은 공룡 발자국을 중심으로 하여 나타나는 환상의 단열이다. 이러한 단열의 형태는 우항리의 공룡발자국들 중 대형공룡의 것으로 추정되는 공룡의 발자국들 주변에서만 나타나며, 다른 공룡발자국 화석지에서는 이런 형태의 단열이 관찰되지 않는다.

이외에도 이러한 발자국화석 주변으로 여러 특이한 구조들을 관찰 할 수 있다. 따라서 이번 연구에서는 이렇게 발자국화석 주변으로 나타나는 특이한 구조들의 형성과정에 대한 연구의 필요성에 따라 발자국과 단열과의 상관관계를 퇴적학이나 고생물학적 접근이 아니라 구조지질학적으로 접근하여 새로운 시각으로 이들의 관계를 규명하고자 하였다.

2. 연구 지역

연구지역은 전라남도 해남군 황산면 우항리 지역으로 백악기에 호수로 형성된 소분지 중 하나인 해남분지에 위치하고 있다. 해남 지역은 선캄브리아시대의 편마암류와 쥐라기 화강암을 기반으로 하여 하부로부터 백악기 화산암류 및 퇴적암류인 안산암질

응회암, 우항리층, 황산응회암, 진도유문암과 이들을 관입한 각섬석화강암과 석영반암으로 구성되어 있고, 그 위를 제4기층이 덮고 있다(Chun, 1987; Chun and Chough, 1995; 그림 1c). 연구지역은 호성 퇴적물과 화산쇄설성 퇴적물들이 주를 이루는 우항리층으로 구성되어 있다(Son *et al.*, 1980). 우항리층은 하부에서부터 흑색세일, 응회질 사암, 응회암

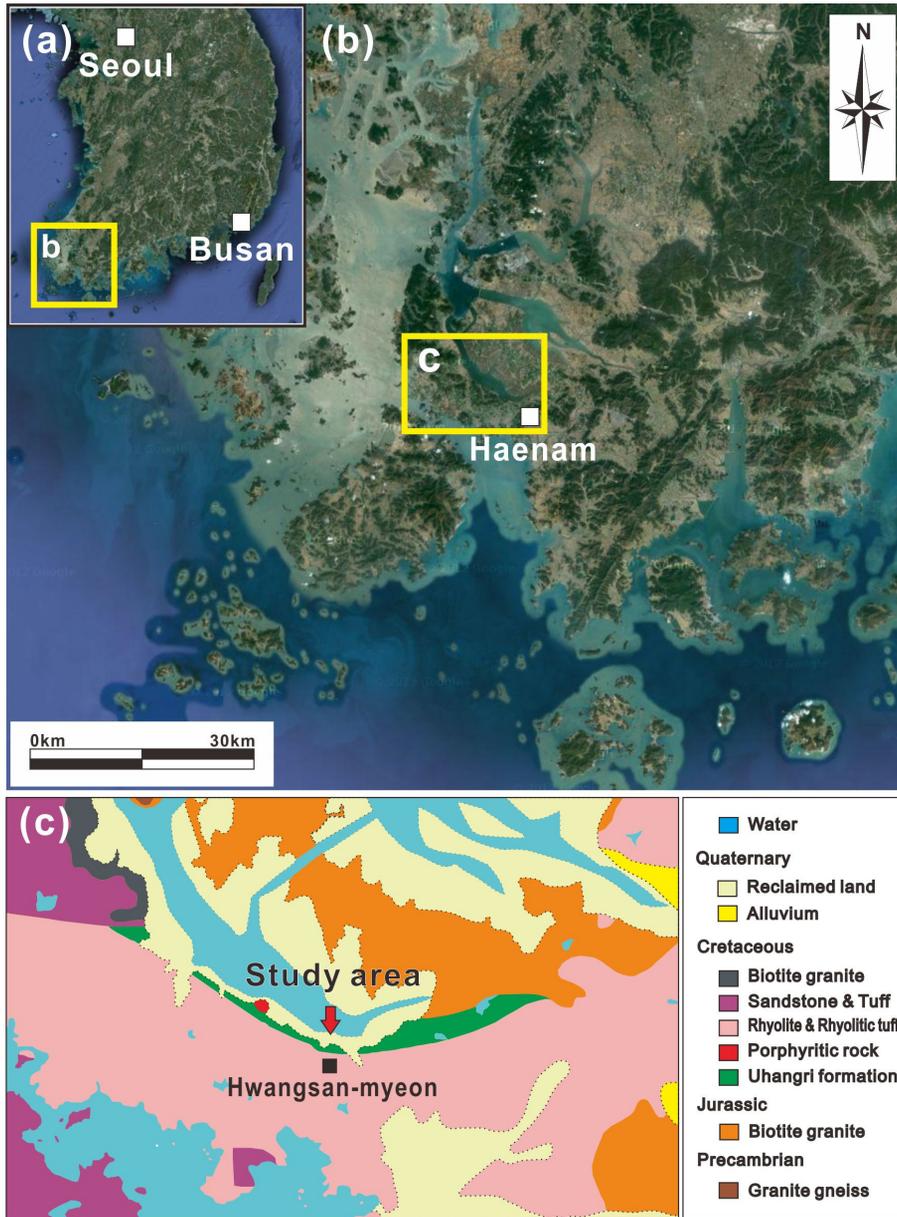


Fig. 1. (a) Satellite image of the Korean Peninsula. (b) Satellite image of Jeollanam-do. (c) Geological map of the study area (modified from Choi *et al.*, 2002).

으로 구성되어 있으며, 그 중 응회암은 7,000만 년에서 8,500만 년 전 사이에 퇴적된 것으로 알려져 있다 (Huh *et al.*, 1998). 일반적으로 발자국 화석은 흑색 셰일에서 많이 관찰되며, 우항리층에서도 공룡발자국이 주로 산출되는 지층은 흑색셰일층이다.

연구가 진행된 노두는 우항리 공룡박물관의 옥외 전시실 대형공룡관이다. 이곳은 우항리층의 흑색셰일 부분에서 대형공룡의 발자국이 주로 발견된 곳으로 그 외에도 다양한 발자국화석들이 발견되고 있다. 이 층은 육지 방향으로 경사하고 있으며, N68°W/19°SW의 주향과 경사를 갖는다(그림 2).

3. 연구방법

연구지역은 천연기념물로 지정되어 있는 곳으로 접근이 제한되어 있다. 따라서 본 연구를 위한 노두의 직접적인 관찰은 노두에 손상을 가져올 수도 있

다고 판단되어 사전동의를 구하고 최소한의 불가피한 부분에 대해서만 제한적으로 직접측정을 실시하였다. 노두에서의 직접측정을 최소화하기 위하여 사전에 측정할 부분에 대하여 충분한 논의를 거쳐, 노두 주변에서 최대한 많은 관찰과 촬영을 미리 실시하였다. 이후 노두에서는 직접측정이 불가피한 단열의 태위, 연장성 및 간격에 대하여 정밀측정 및 기재를 실시하였다.

이렇게 실외에서 획득한 자료를 실내에서 컴퓨터를 이용하여 스케치와 통계처리를 실시하였다. 야외 자료의 분석은 주로 단열들을 생성원인과 시기별로 구별하기 위한 분석을 실시하였고, 특이한 변형을 보이는 변형양상에 대해서는 정밀스케치를 통해 발달양상에 대한 상세한 기재와 기하학적 분석을 실시하였다. 특히 이러한 분석에서는 퇴적동시성의 구조와 퇴적이후에 생성된 구조들을 구분할 수 있는 특징과 증거를 찾는 데 주력하였다.

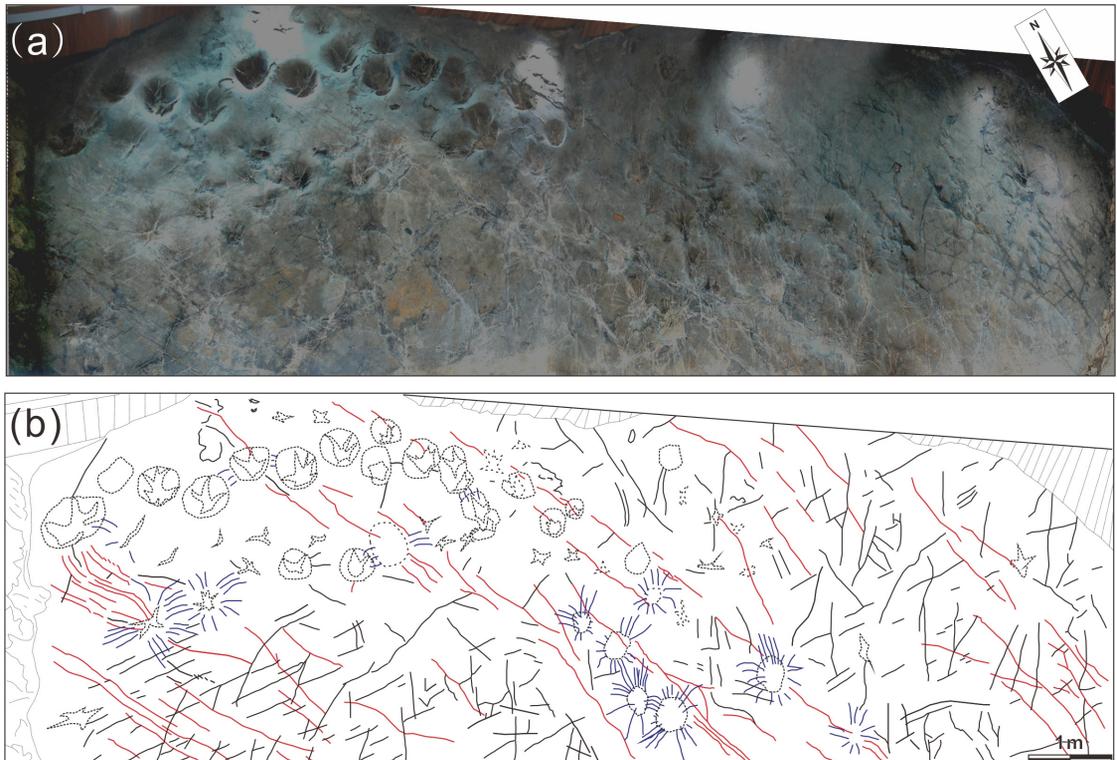


Fig. 2. Large herbivore dinosaur track site within the large dinosaurs' hall in Uhang-ri, Haenam. (a) Photograph of the large dinosaur footprint fossils. (b) Detailed sketch of the large dinosaur footprint fossils and associated fractures (Red line: fracture set A, Black line: fracture set B and C, Blue line: radial fractures, Black dash line: dinosaur footprint fossils).

4. 우항리 공룡발자국 주변에서 관찰되는 특이 지질구조

연구지역의 공룡발자국 화석은 특이한 몇 가지의 구조들을 발달시키고 있다. 이러한 구조들은 이 공룡발자국 형성당시의 고환경과 고생태를 유추하는데 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단되어 정밀한 기재와 분석을 실시하였다.

이곳에서는 먼저 각각의 특징적인 지질구조에 대해 설명을 하고자 한다. 가장 먼저 관찰되는 것은 발자국화석 주변에 발달하는 다양한 특성을 갖는 단열들이다. 이 노두 상에는 몇 개 조의 단열들이 발달하고 있는데 특히 대형 공룡발자국 주변으로 방사상의 형태를 보이며 발달하는 단열들이 매우 특징적이다. 또한, 발자국 주변의 솟아오른 둔덕, 발자국 내부의 별모양 구조, 함몰부 주변으로 발달하는 미끌림 흔적 등은 세계적으로도 유례가 드문 경우로 매우 특이하여 그 고환경적, 고생태적, 지질유산적 가치가 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 이들은 모두 공룡발자국 화석을 중심으로 하여 발달하고 있으며, 이 논문에서는 이러한 특이한 구조들의 생성환경을 이해하는데 그 목적이 있다.

4.1 방사상으로 나타나는 단열

연구지역의 노두에서 가장 눈에 띄게 발달하는 구조는 발자국 화석과 무수하게 발달한 단열들이다. 특히 단열들 중에서도 발자국을 중심으로 하여 나타나는 방사상의 단열들이 눈에 띈다. 이 방사상의 단열들은 발자국에서 멀어질수록 미약해짐을 보여준다(그림 3a, 3b). 이들은 대형공룡의 발자국 주변에서만 관찰되고 있으며, 그 중 방사상 단열이 뚜렷하게 발달하는 것은 발자국의 깊이와 넓이가 상대적으로 큰 것에서 관찰된다. 또한, 방사상의 단열들은 발자국의 크기가 커질수록 단열의 개수와 길이가 커지는 경향을 보여주고 있다(그림 4).

4.2 솟아오른 둔덕

몇몇 공룡발자국 화석을 중심으로 화석의 테두리 부분이 원래 지층 높이에 비해 볼록 솟아 있는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 관찰되는 공룡발자국 화석 주변에서는 눈으로 인지할 수 있을 정도의 융기된 부분을 관찰하기 어렵다. 하지만 이곳에서는 공룡발자

국 주변으로 환상의 솟아올라 있는 부분을 관찰할 수 있으며, 이는 비교적 지층이 많이 함몰된 큰 발자국 주변에서 많이 관찰된다(그림 3c, 3d). 따라서 이러한 구조는 주로 대형공룡의 발자국 화석에서 많이 관찰되며, 그 크기가 크고 깊게 들어갈수록 솟아 오른 높기도 높다. 이는 이러한 구조들이 공룡의 크기 및 공룡발자국의 형성과 연관이 있다는 것을 지시하고 있다.

4.3 미끌림 흔적

미끌림 흔적 또한 대형 공룡발자국에 수반되어 나타나는 구조로 발자국화석의 측면에서 관찰된다. 이들은 대부분 발자국의 바닥면과 고각을 이루며 발달한다. 이 흔적들은 발자국의 깊이가 깊고 발자국 화석의 측면이 수직에 가까운 것일수록 잘 관찰된다(그림 5). 이들은 단층조선과 유사한 빗살무늬를 보여주며, 이 조선의 침강은 대부분 바닥면을 향하고 있으며, 세일층이 덮고 있는 부분에서만 관찰되는 특징을 보이고 있다(그림 3e, 3f). 이들은 노두 상에 가장 연장성이 좋은 단열들(그림 6a, 6b)에 수반된 단층조선과 외견상 매우 유사한 양상(그림 6c, 6d)을 보이지만, 이는 단층조선과는 달리 공룡발자국의 뒷부분에서만 제한적으로 관찰된다는 점이 매우 흥미롭다. 따라서 이들은 공룡의 무게와 보행 그리고 퇴적물의 물성과 연관이 있음을 지시하고 있다.

5. 연구지역에서의 단열발달 특성

연구지역 내에서 단열은 크게 직선상의 단열과 방사상의 단열 두 가지로 나뉜다. 직선상의 단열은 크게 북동, 북서, 동서 3방향의 단열군이 관찰된다. 방사상의 단열은 위에서 언급했듯이 발자국 주변에서만 나타나는 단열이다. 이들 두 종류의 단열들은 각각 서로 뚜렷이 다른 특징을 보인다.

5.1 일직선상의 단열

일직선상의 단열은 노두 전반에 걸쳐 발달하고 있다. 이들의 방향성은 (A) N44°W, (B) N88°W, (C) N27°E 으로 대표되어 나타난다. 이들 중 단열군 (A)는 노두 상에서 가장 연장성이 좋으며 가장 확실한 변위를 보이는 정단층성의 단열이다. 최대 변위는 약 30mm이며 연장은 최대 약 9m를 보인다. 이 단열군 (A)의 특징은 정단층성의 변위를 보이는 것(그

림 6c, 6d) 이외에도 발자국 화석을 절단하며 발달하는 특징을 보인다는 것이다(그림 6a, 6b). 그 외에 단열군 (B)와 (C)는 노두 전반에 걸쳐 분산되어 나타나는 단열로 단열의 연장성이 단열군 (A)에 비해 좋지

못하며, 뚜렷한 변위를 나타내지 않는다.

5.2 방사상의 단열

방사상의 단열들은 각 발자국 화석 주변에서 높

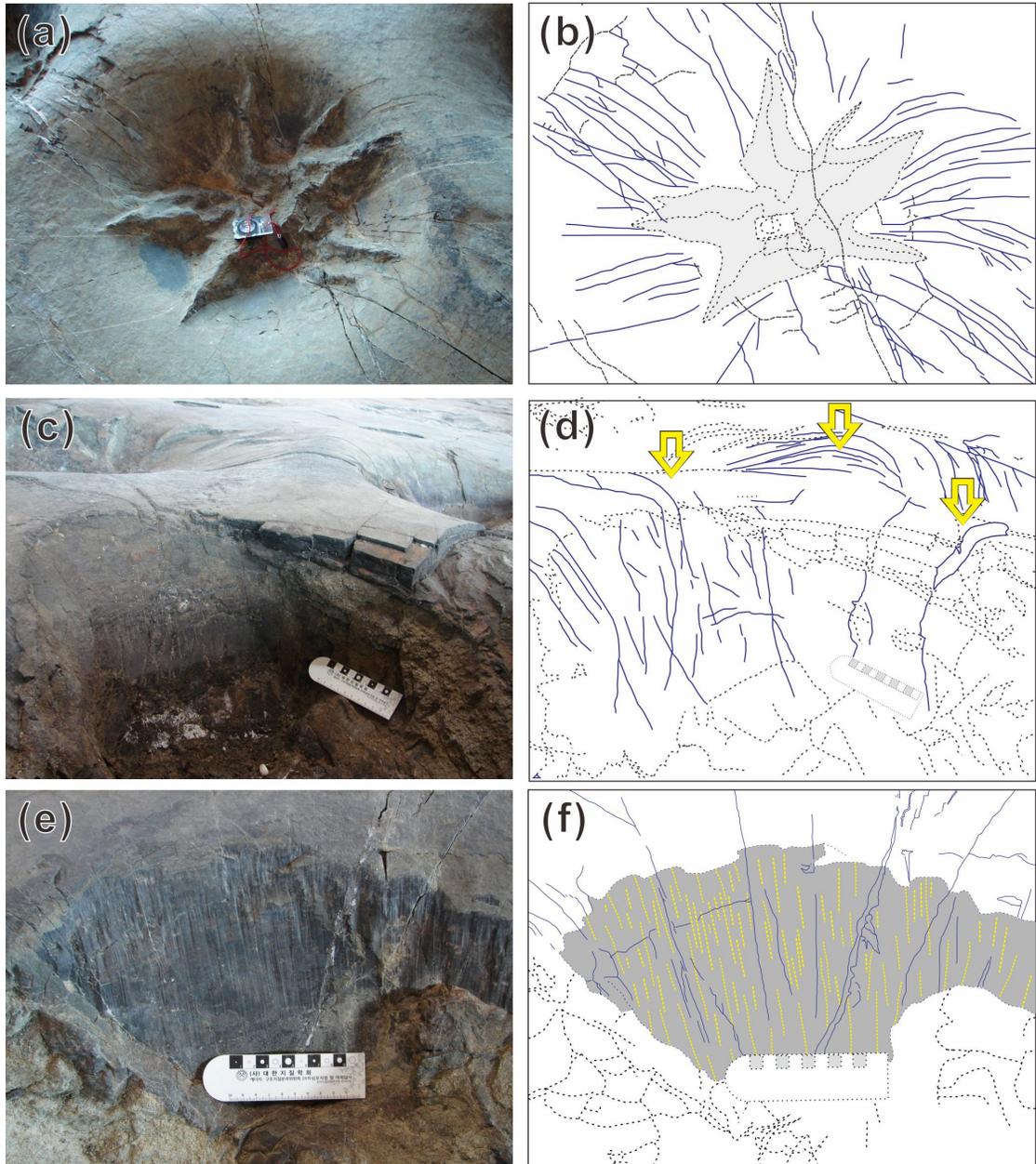


Fig. 3. Photographs and sketches of the characteristics around dinosaur footprints. (a) and (b) Star marks and radial fractures, (c) and (d) Bulges around footprints and (e) and (f) Slide marks on footprint sidewalls (Blue lines: radial fractures, Black lines: fracture sets B and C, Yellow dash lines: slide marks, Black dash lines: inner structures of dinosaur footprint fossils).

은 밀도로 발달하고 있다(그림 3a, 3b). 그 중 발자국 화석들 사이에 있는 단열들은 다른 부분보다 단열의 밀도가 높으며 풍화의 정도도 심하다(그림 3a). 이는 두 발자국 사이의 간섭효과에 의한 것으로 해석된다. 그리고 발자국 화석이 클수록 단열은 더 선명하게 나타남을 알 수 있는데 이는 발자국이 이 단열의 발달과 연관되어 있음을 지시하는 것으로 해석된다.

먼저 단열들의 방향성을 알아보기 위하여 화석 주변에 나타나는 단열을 조사 한 후 장미도로 측정 한 방향들을 도시하였다. 장미도에서 보여주는 바와 같이 단열들의 방향성은 어느 한 방향으로의 우세한 방향성을 보여주기 보다는 방사상으로 분산된 양상을 보여주고 있다(그림 7a, 7b). 일부는 어느 한 방향으로의 우세한 방향성을 지시하는 것들도 있지만, 이들은 인접한 발자국과 연결되는 방향으로 발달하고 있어서 이들 방향을 제외하면 거의 방사상의 분포를 보여주고 있음을 알 수 있다(그림 7c, 7d).

6. 토 의

6.1 발자국 주변의 특이구조와 형성시기

6.1.1 발자국 주변 단열의 생성시기

흥미롭게도 이 연구지역에서 발견된 발자국 주변의 단열구조들은 현생에서 고화가 진행되어 가는 콘

크리트에 남긴 동물의 발자국 주변에 발달하는 구조와 매우 유사함을 보여준다(그림 8). 이 사진에서의 방사상 주름은 공룡발자국 주변에서 관찰되는 방사상 단열과 매우 유사한 형태를 보여주고 있다(그림 3a). 이는 이 둘의 생성환경이 매우 유사할 수 있음을 지시하고 있다. 그러나 명확하게 이들 두 구조가 같다고 볼 수는 없기 때문에 퇴적동시성 구조가 아니라 발자국 생성 이후 지층의 진화과정에서 생성된 구조일 가능성도 배제 할 수는 없다. 따라서 이에 대해서는 다음 두 가지의 경우를 가정해 볼 수 있을 것이다.

- 가정 1) 발자국 생성과 동시에 발달
- 가정 2) 발자국 생성 이후에 건조에 의해 발달

먼저 발자국 생성과 동시에 발달했을 경우에는 다시 두 가지의 가정을 예상 할 수 있다. 1-1) 발자국이 찍힐 때 발생하는 주름들이 위에 있는 층에 의해 자신의 형태를 충분히 갖지 못하고 선의 형태로 나타날 가능성과 1-2) 발자국의 흔적이 생성될 당시 지층에 가해지는 응력에 의해 발자국을 중심으로 솟아 오른 둔덕에 발생한 인장력이 단열을 발생시키는 경우가 가능할 수 있다. 이러한 가정들이 맞다면 이러한 단열이 생성되기 위해서는 퇴적물이 어느 정도

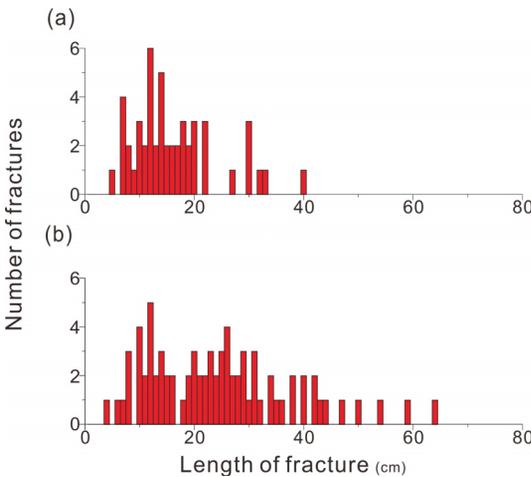


Fig. 4. Length and number of fractures around footprints. Footprints with slip marks show slightly longer fractures indicating higher pressure due to heavy weight. (a) Footprints without slip marks. (b) Footprints with slip marks.

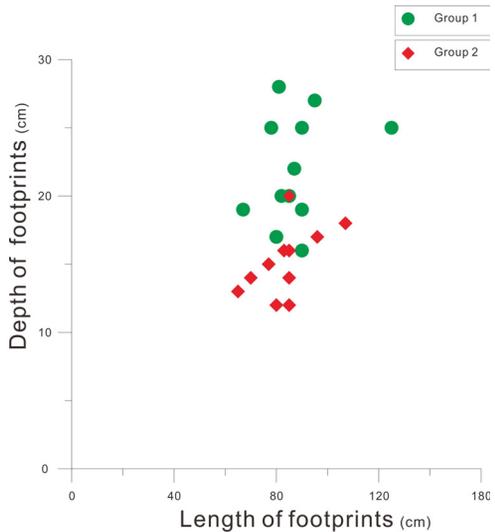


Fig. 5. Relationship between depth of footprint and length of footprint. Group 1: footprints with slide marks, Group 2: footprints without slide marks.

고화되거나 건조되어 있어야 하기 때문에 이 호수의 퇴적물이 퇴적되고 어느 정도 건기를 겪는 동안 공룡의 발자국이 기록된 것으로 해석된다. 그러나 이들의 형성에 대해서 현재로서는 명확한 답변을 내릴 수는 없다. 그러나 이들 두 경우 모두가 공룡발자국과 밀접한 관계가 있는 것만은 확실해 보인다.

두 번째로 발자국 생성이후에 건조에 의해 발달했을 경우에는 발자국의 생성이후 이 지층이 건조해가면서 건열과 유사한 기작에 의해 형성되었을 가능성이 있다. 이 경우는 건조에 의한 단열의 발달이 과연 이와 같은 방사상의 형태를 보일 수 있을 지에 대한 검증이 필요하다.

6.1.2 솟아오른 둔덕

이미 기술한 바와 같이 발자국화석의 테두리 부분

은 주변 같은 층에 비해 볼록 솟은 것이 뚜렷이 관찰된다(그림 3c, 3d). 발자국 화석을 중심으로 하여 솟아오른 이 부분은 발자국의 생성 당시 눌러진 퇴적물들이 주변으로 압력을 가하면서 밀려 올라 간 것으로 해석되며, 이를 통해 공룡발자국이 기록될 당시에 퇴적물들은 완전히 고화된 취성의 상태가 아닌 반연성의 상태였음을 지시한다. 그리고 솟아오른 둔덕에 나타나는 단열을 관찰하면 몇몇 단열에서 틈이 관찰되는데 둔덕의 최상부에서 그 폭이 가장 넓음을 인지할 수 있다. 이는 이들 둔덕의 형성과 단열의 형성이 밀접히 연관되어 있음을 지시하지만 이는 위에서 가정한 2가지의 경우 모두에서 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

첫 번째의 경우 발자국의 형성 당시에 솟아오른 지층은 상대적으로 탄성이 좋은 세일층이었을 것이고 이들은 굴곡과 동시에 수분의 상태에 따라 인장단열

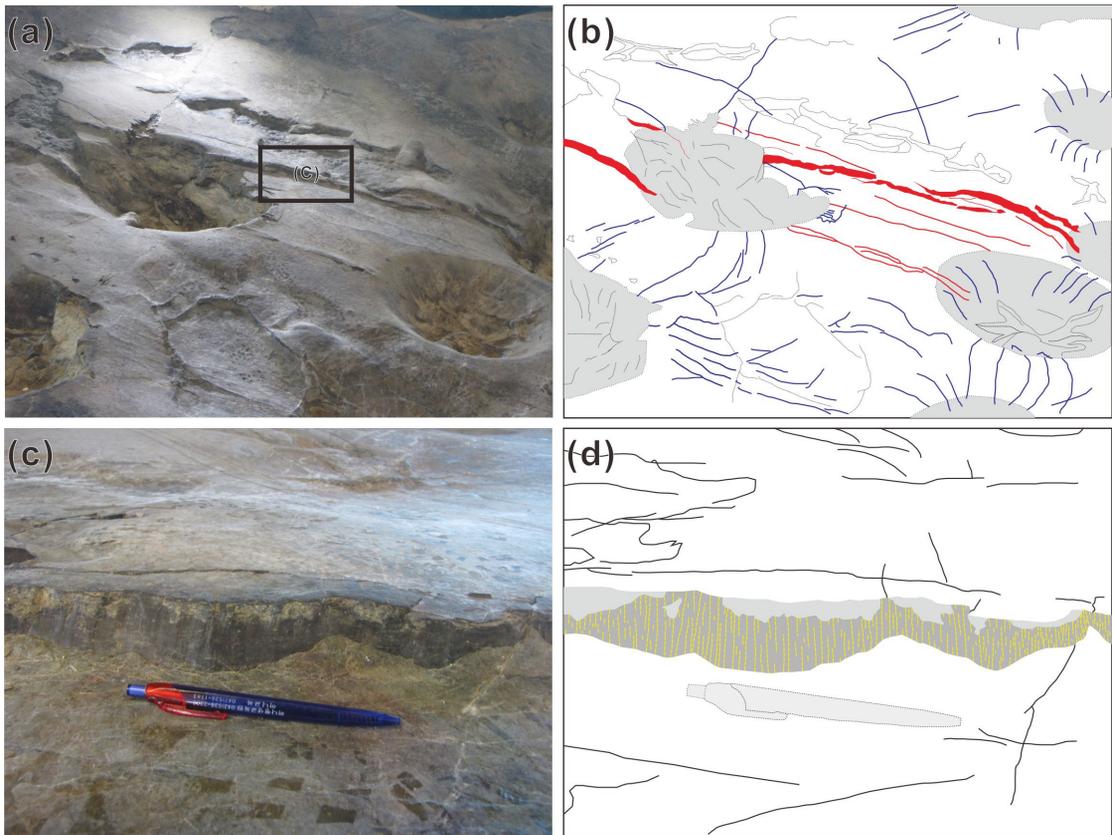


Fig. 6. Relationship between dinosaur footprints and fractures. (a) and (b) Dinosaur footprints are crosscut by later fractures. (c) and (d) Detailed photograph and sketch of the fracture A in (a). (Red line: fracture set A, Black line: fracture set B and C, Blue line: radial fractures, Black dash line: dinosaur footprint fossils, Yellow line: slickenlines of fracture set A, Gray: dinosaur footprint fossils or eroded surfaces).

이 발달할 수 있을 것이기 때문이다. 또한 두 번째의 경우를 고려한다 하더라도 비록 초기에 단열로 발달하지 않았다 하더라도 건조과정에서 만곡된 부분에서 더 많은 인장을 경험할 가능성이 존재하기 때문에 두 경우 모두 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

6.1.3 미끌림 흔적

거대 공룡발자국에서 잘 관찰되는(그림 3e, 3f) 이 흔적들은 발자국이 깊고, 발자국 화석의 측면이 수직에 가까운 것일수록 관찰이 용이하다. 전체 발자국 화석들의 최대 길이와 화석의 깊이를 나타낸 그래프에서 미끌림 흔적이 나타나는 발자국을 도시해보면 그림 5의 군집1과 같이 도시된다. 이는 미끌림 흔적이 나타나는 발자국은 상대적으로 깊은 발자국 들인 것을 지시하며, 이는 공룡의 크기나 몸무게뿐만 아니라 보행양식과도 연관되어 있을 가능성을 지시하고 있다. 그리고 이들의 외견상 모습은 단층조선과 유사하지만 단층을 따라 발달하는 것이 아니라

발자국 내부의 굴곡된 일부 측면에서만 발달한다. 이러한 양상은 또한 공룡발자국 생성 당시의 지층 물성에 대한 중요한 정보를 제공하는데, 이는 이들 지층이 미끌림 흔적을 남길 수 있을 정도의 균기를 갖는 반건조 상태였다는 것을 강하게 지시하고 있다.

6.1.4 발자국 바닥의 별모양 구조

이곳에서 발견되는 또 다른 특이한 구조는 공룡발자국 바닥의 별모양 구조이다(Lee and Huh, 2002; Kim *et al.*, 2003; Thulborn, 2004; Hwang *et al.*, 2008; 그림 3a, 3b). 이는 발자국의 바닥 중심부에서 별모양 또는 불가사리의 형태를 보이는 것이 많은데 이는 또한 이 당시의 지층의 환경을 유추하는데 중요한 정보가 될 수 있다. 이들은 발자국생성 당시 약간 고화된 유동성의 층이 공룡의 하중에 의해 공룡발자국 사이의 깨어진 틈을 따라 주입된 구조로(Hwang *et al.*, 2008), 이들 지층이 비록 물위로 노출되어 있었지만 아래에서는 아직 수분을 함유하고 있

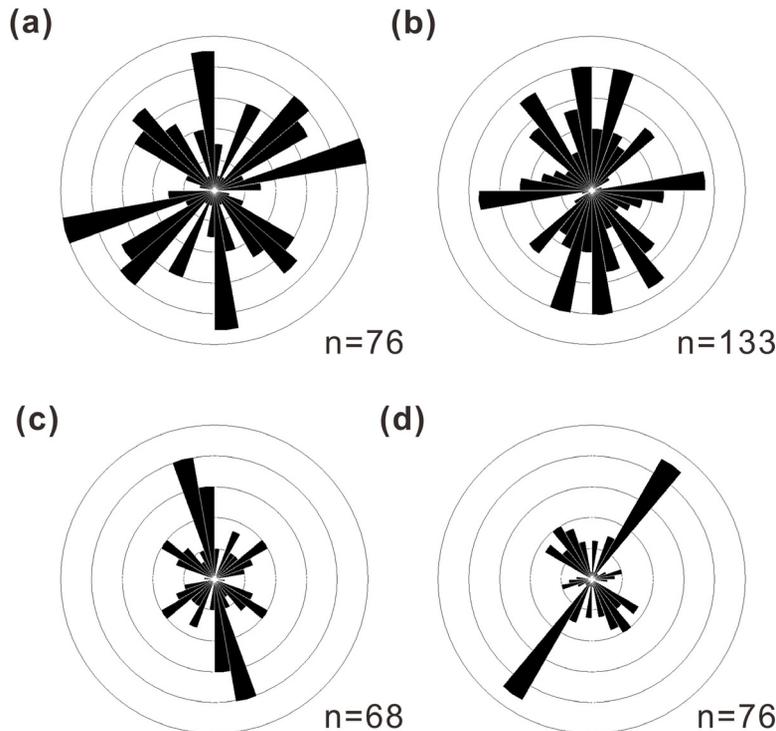


Fig. 7. Rose diagrams for the orientation of radial fractures around each footprints. (a) and (b) show almost complete radial patterns of fracture orientations. (c) and (d) show some dominant fracture orientations, which indicate connecting fractures between footprints.

었다는 것을 지시하고 있다. 따라서 수분이 증발하면서 점토층들이 건조해져 가는 상황에서 상부의 지층들은 취성으로 변해 약간의 탄성을 갖게 되고 하부에서는 아직 수분이 남아 있는 상태를 유지하였던 것으로 판단된다. 이때 육중한 무게의 공룡이 강한 하중으로 이들 지층을 밟고 지나가면서 반건조 상태의 점토층에서 반연성 또는 반취성의 이러한 특이한 구조들이 형성된 것으로 해석된다.

6.2 단열발달사

노두 상에 나타나는 단열은 크게 방사상의 단열과 단열군 (A), (B), (C) 등 크게 4개로 구분이 가능하다. 이들 단열의 선후 관계를 알아보기 위해서 앞서 기술한 특징들을 종합해 보았다. 노두 상에서 명확한 선후관계를 나타내는 것은 발자국화석과 단열군 (A)이다. 그림 6a, 6b를 보면 단열군 (A)가 발자국 화석을 절단하고 지나가는 것을 확인할 수 있다. 발자국 화석에 변위를 발생시키면서 지나가는 단열군 (A)는 광역적으로 나타나며 정단층의 변위를 뚜렷이 보이고 있어 발자국 생성 이후에 지체구조적 응력에 의해 형성된 것임을 나타낸다. 만약 발자국 화석과 방사상의 단열이 동시에 생성되었다면 방사상

단열의 생성 이후 단열군 (A)가 생성되었을 것이다. 그리고 방사상의 단열이 발자국 생성 이후에 발생했을 경우도 단열군 (A)의 양쪽에서 방사상의 단열들이 존재하기 때문에 단열군 (A)가 생성되기 이전에 방사상의 단열들이 존재하고 있었음을 지시한다. 그 외에 단열군 (B), (C)에 대해서는 명확한 선후관계의 구분이 어렵다.

6.3 발자국 생성환경

퇴적동시성 변형구조인 발자국 화석은 일반적으로 퇴적물이 퇴적되고 고화되기 이전에 동물의 보행에 의해 형성되는 연성의 혼적화석 구조이다. 이들은 퇴적물이 고화되어 암석화가 이루어진 이후인 취성의 환경에서는 형성되기 어렵다. 취성의 구조와 연성의 구조가 동시에 나타나는 것을 반취성 또는 반연성이라 하는데 고화된 암석에서는 온도와 압력이 증가하거나 암석의 물성이 반연성을 띄는 암석에서 이러한 조건이 형성되어 안행상 인장단열과 같은 구조들이 형성되기도 한다. 그러나 공룡의 발자국이 뚜렷이 기록될 정도의 미고화된 퇴적물에서 취성의 특성을 갖는 구조들이 동시에 형성되기는 쉽지 않다.



Fig. 8. A similar example of radial fractures around some unknown animal footprints preserved in wet concrete.

하지만 연구지역의 노두에서는 두 특성이 동시에 발견되며, 이들은 서로 연관성을 갖고 있는 것으로 해석된다. 동시에 발생할 수 없을 것으로 예상되는 두 특성이 동시에 생성될 수 있는 몇 가지 상황의 추정이 가능하며, 그 중 하나가 당시 퇴적층의 상태가 공룡발자국이 화석으로 기록될 수 있을 정도의 연성적인 특징을 갖는 동시에 단열이 발달할 수 있을 만큼의 취성적인 특성도 갖는 반취성-반연성의 환경을 가정할 수 있다. 이는 기후 조건이나 주변 환경이 변화할 때 있을 수 있으며, 기후적으로는 습윤했던 환경이 건조한 환경으로 변화하던 시기로 예상할 수 있다. 이 때 점토층이 차별적으로 건조되면서 두 특성을 동시에 나타낼 수 있는 조건이 형성되었을 것으로 해석된다.

따라서 이 지역은 상대적으로 습윤한 환경에서 건조한 환경으로 변해가는 호수였던 것으로 판단된다. 호수의 물이 줄어들어 가고 퇴적물의 퇴적이 상당기간 동안 이루어지지 않아 상부가 노출되어 있는 상태에서 공룡들은 물을 찾아 이곳을 찾았을 것이다. 이

때 육중한 공룡들이 반건조 상태의 이곳 지층들을 밟고 이동하면서 이곳에는 취성과 연성의 성질을 동시에 갖는 특이한 구조들이 발달한 것으로 해석된다(그림 9). 이러한 구조는 확률적으로 생성되기가 매우 어렵기 때문에 그 자연사적 가치가 매우 높으며, 세계적으로도 그 유례를 찾아보기 힘들 것으로 판단되어 더욱 심도 있는 연구가 필요해 보인다. 아울러 본 연구결과는 그동안 논란이 되어 온 발자국 주인에 대한 더욱 정확한 정보를 제공하게 되었다.

7. 결론

본 연구에서는 전라남도 해남군 우항리에서 나타나는 대형공룡의 발자국화석 주변에서 나타나는 단열을 비롯한 다양한 특이구조에 대한 분석을 통해 단열과 발자국 화석 간의 연관성과 생성 당시의 환경을 알아보려고 하였다. 이번 연구는 퇴적암에서 나타나는 화석과 주변의 양상들을 지질구조적인 관점에서 접근하였으며, 이를 바탕으로 하여 다음과

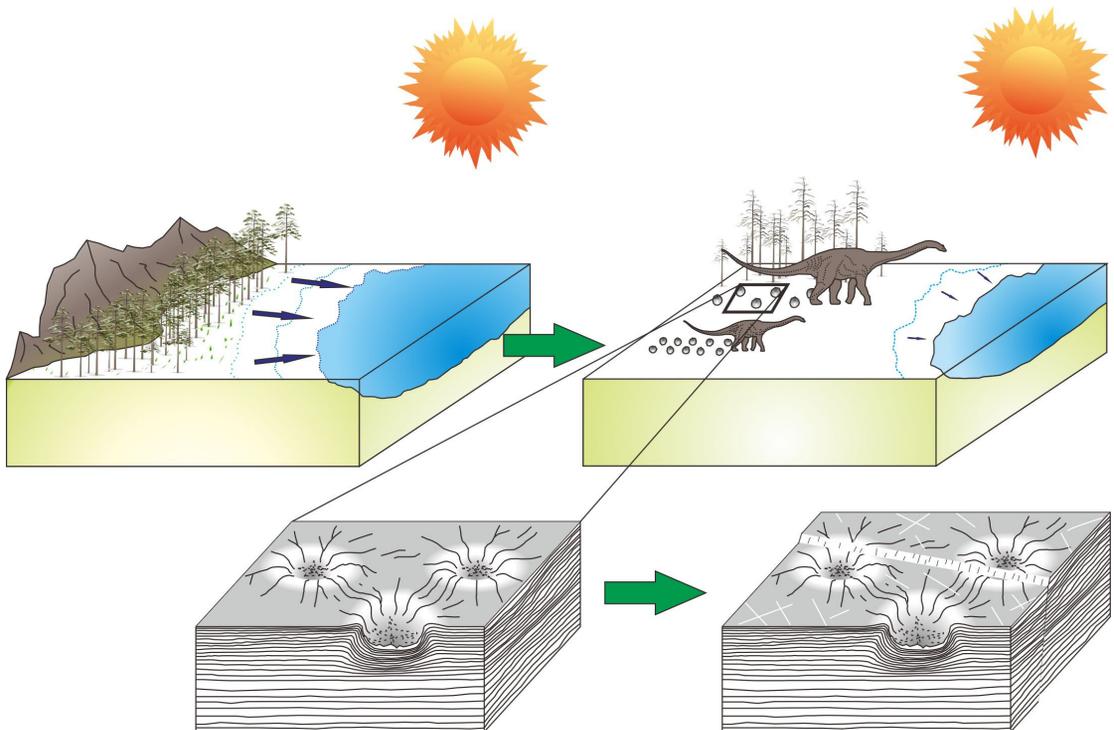


Fig. 9. Schematic diagrams showing progressive generations of dinosaur footprints and fractures around the footprints in the study area. These unusual structures and material properties may be due to climatic change - drying conditions.

같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 직선상으로 발달하는 단열들은 노두 전반에 걸쳐 나타나며 이들 중 몇몇 단열은 발자국화석과 방사상의 단열을 절단하는 모습을 보여준다. 이는 직선으로 나타나는 단열들이 발자국 화석의 생성 이후에 만들어졌음을 의미한다.

2) 방사상의 단열은 발자국의 주위에서만 관찰되며, 발자국 주위의 솟아오른 둔덕 부분에서 더 넓은 간극을 보이는 것으로 보아 발자국화석의 생성과 관련되어 발달하였을 것으로 판단된다. 또한 현생의 유사구조를 살펴보면 생성과 동시에 방사상의 구조가 형성되는 것을 보여주고 있어 본 연구지역에서 관찰된 단열이 이와 매우 유사한 기작에 의해 형성되었을 것으로 해석된다.

3) 발자국 화석의 측면에서 발견되는 미끄럼 자국은 발자국 생성 당시의 지층의 굳기가 공룡의 발에 의한 미끄럼 흔적을 보존할 수 있을 정도로 고화되어 있었다는 것을 나타내며, 발자국 화석 주변으로 나타나는 솟아오른 둔덕은 그 당시 지층이 완전히 암석화 되지는 않은 탄성의 상태였음을 지시하는 것으로 해석된다. 이는 이러한 공룡발자국의 생성환경이 퇴적물이 퇴적되고 건조기후에 의하여 지표에 노출되어 고화가 진행되던 상황이었지만 완전히 암석화가 진행되기 이전이었음을 지시한다.

이러한 발자국 화석 주변에 나타나는 단열, 둔덕, 미끄럼 흔적 등 특이한 현상들은 과거 이러한 공룡 발자국이 생성될 당시의 환경을 지시하는 매우 유용한 정보이며, 이들은 고환경을 해석하는데 매우 중요한 자료를 제공할 수 있다. 향후 화석 주변에서 발달하는 단열의 분포, 연장성, 밀도 등에 대한 보다 정밀한 통계학적 분석을 실시하여 공룡발자국 화석과 단열 사이의 상관관계를 좀 더 면밀히 해석하고, LiDAR를 이용한 공룡발자국의 3차원적 분석을 실시한다면, 고환경과 공룡의 보행특성, 무게 등을 비롯한 고생태의 해석에 매우 유용할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구를 위하여 노두에서 자료를 취득할 수 있도록 허락하여 주신 해남공룡박물관에 감사를 드리며, 기존의 다양한 연구자료를 제공하여 주신 용병주 학예 연구사에게도 진심으로 감사를 드린다. 또한 이 논문

을 꼼꼼하게 검토하여 좋은 의견을 주신 이희권 교수님과 공달용 박사님께도 감사를 드린다. 이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구이며(PK-2012-0566), 이에 감사를 드린다.

REFERENCES

- Choi, P.Y., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kee, W.S., Koh, H.J., Kim, Y.B., Lee, B.J., Song, K.Y., Kim, J.C. and Choi, Y.S., 2002, Explanatory note of the Mokpo and Yeosu sheets (1:250,000). KIGAM, 1-45.
- Chun, S.S., 1987, The Uhangri Formation: Sedimentary facies and facies associations. Master's Thesis, Seoul National University, 1-201.
- Chun, S.S. and Chough, S.K., 1995, The Cretaceous Uhangri Formation, SW Korea: lacustrine margin facies. *Sedimentology*, 42, 293-322.
- Huh, M., Lee, Y.N., Lim, S.K. and Hwang, G.K., 1998, Research Report on the Haenam Dinosaur Site, Korea. Chonnam National University Museum · Chollanam-do · Haenam-gun, 491 p (in Korean).
- Huh, M., Lim, S.K., Yang, S.Y. and Hwang, K.G., 1997a, A preliminary report of Cretaceous dinosaur tracks from the Uhangri Formation, Haenam, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 1-16.
- Huh, M., Lim, S.K., Yang, S.Y., Paik, K.H., Chun, S.S. and Cheon, D.Y., 1996, Research Midway Report on the Dinosaur Site, Uhangri, Haenam. Chonnam National University Research Institute for Basic Sciences, Chollanam-do Haenam-gun, 40 p.
- Huh, M., Lim, S.K., Chun, S.S. and Cheon, D.Y., 1997b, Research Report on the Dinosaur Site, Uhangri, Haenam. Chonnam National University Research Institute for Basic Sciences, Chollanam-do Haenam-gun, 117 p.
- Kim, C.B., Huh, M., Cheong, C.S., Lockley, M.G. and Chang, H.W., 2003, Age of the pterosaur and web-footed bird tracks associated with dinosaur footprints from South Korea. *Island Arc*, 12, 125-131.
- Hwang, K.G., Huh, M., Lockley, M., Unwin, D. and Wright, J.L., 2002, New pterosaur tracks (Pterachinidae) from the Late Cretaceous Uhangri Formation, SW Korea. *Geological Magazine*, 139, 421-435.
- Hwang, K.G., Lockley, M.G., Huh, M. and Paik, I.S., 2008, A reinterpretation of dinosaur footprints with internal ridges from the Upper Cretaceous Uhangri Formation, Korea. *Palaeoecology*, 258, 59-70.
- Lee, Y.N. and Lee, H.J., 2006, A sauropod trackway in Donghae-Myeon, Goseong County, South Gyeongsang Province, Korea and its paleobiological implications of Uhangri manus-only sauropod tracks. *Journal of*

- the Paleontological Society of Korea, 22, 1-14.
- Lee, Y.N. and Huh, M., 2002, Monus-only sauropod tracks on the Uhangri formation (Upper Cretaceous), Korea and their paleobiological implications. *Journal of the Paleontological Society of Korea.*, 76, 558-564 p.
- Lockley, M.G., Kim, J.Y., Kim, K.S., Kim, S.H., Matsukawa, M., Rihui, L., Jianjun, L. and Yang, S.Y., 1998, Minisauripus-the track of a diminutive dinosaur from the Cretaceous of China and South Korea: implication for stratigraphic correlation and theropod foot morphodynamics. *Cretaceous Research*, 29, 115-130
- Son, J.D., Yoo, H.S., Kim, H.Y., Ko, M.J., Cho, D.H., Koo, J.H. and Kim, S.G., 1980, Geology, geochemical and geophysical exploration for the Cretaceous strata containing oily shale in Haenam and Mokpo area. *Bulletin of Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 21, 1-51 (in Korean).
- Song, J.Y., 2010, A reinterpretation of unusual Uhangri dinosaur tracks from the view of funtional morphology. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 26, 95-105.
- Thulborn, T., 2004, Extramorphological Features of Sauropod Dinosaur Tracks in the Uhangri Formation (Cretaceous), Korea. *Ichnos*, 11, 295-298.
- Yang, S.Y., Lockley, M., Lim, S.K. and Chun, S.S., 1997, Cretaceous bird tracks of Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, Special publication 2, 33-42.

투 고 일 : 2013년 12월 20일

심 사 일 : 2013년 12월 20일

심사완료일 : 2013년 12월 31일