

한반도 공룡발자국에 의한 백악기 공룡 생태 복원 기초 연구(1): 수각류 공룡발자국 형태 연구

곽세건¹, 허민¹, 김보성², 백인성³

¹전남대학교 지구환경과학부, 한국공룡연구센터

²목포자연사박물관

³부경대학교 환경지질학과

요약: 본 연구는 한반도에서 발견되는 조각류, 수각류, 용각류 등 다양한 공룡발자국 가운데 육식공룡 수각류 발자국 형태에 관한 연구이다. 본 연구를 위해 수각류 공룡발자국이 풍부하게 산출되고 보존상태 및 보행렬이 잘 발달된 전남 화순, 여수, 경남 고성 및 창녕의 네 지역이 선택되었고, 이들 지역에서 총 96개의 보행렬을 대상으로 연구를 진행하였다. 네 곳의 화석지에서 산출되는 수각류 발자국의 형태는 대부분이 tridactyl, mesaxonic 형태의 발자국이 주를 이루고 있고 normal digitigrade posture 또는 elevated digitigrade posture의 보행 자세로 나타나고 있다. 발가락의 형태는 straight, tapered and curved digits 등 다양한 특징을 보이며, 드물게 hallux(뒷 발가락이 있는) 발자국이 보이기도 한다. 수각류의 전형적인 특징을 나타내는 날카로운 형태의 발톱자국(craw marks)을 쉽게 찾아볼 수 있다. 화순, 여수, 창녕에서는 소형 수각류가 주를 이루고 있으며, 고성 지역은 대형 수각류가 대부분이다.

주제어: 수각류, 발자국, 형태, 백악기, 생태

서론

공룡발자국 화석은 우리나라에서 공룡골격화석에 비하여 매우 풍부하게 산출된다. 한반도는 공룡발자국에 있어서 세계적인 산지로 정평이 나 있다. 공룡의 발자국 화석은 뼈나 이빨 화석 등 공룡골격화석 못지않게 중요하다. 골격화석은 공룡의 모양과 크기 등의 공룡자체에 정보를 제공하지만 공룡발자국 화석은 공룡의 걸음걸이, 보행자세, 보행능력, 보행속도 및 이동, 방어, 공격 등 행동습성과 발자국 주인 공룡의 크기와 형태 등을 대한 귀중한 자료를 제공해 준다. 골격화석만으로는 알 수 없는 행동양식에 대하여 발자국으로 이루어진 보행렬은 공룡의 생태학적 모습을 재현하는데 매우 귀중한 자료로 활용된다. 독립된 개개의 공룡발자국화석들은 공룡의 대략적 크기와 발바닥의 형태에 대한 직접적인 정보만을 제공하여 주며 이 발자국들이 일련의 규칙을 갖고 연속적으로 나타난 보행렬(trackway)은 공룡의 보행자세, 걸음걸이등 보행에 관한 생태학적인 양상까지 유추해 낼 수 있다는 점에 있어서 매우 중요한 자료로서 사용된다(Norman, 1985).

공룡의 생태에 관한 연구는 공룡발자국으로부터 알 수 있는 공룡의 크기, 몸무게, 이동속도, 보행속도, 보행넓이와 보행 방향 등의 연구와 공룡알과 알둥지에서 부하능력, 공룡의 식생과 양, 이빨에 대한 연구, 공룡의 감각, 소리, 후각능력, 시력 등 다양한 과제로 연구되고 있다. 경우에 따라 배설물인 분화석과 위속의 소화작용을 도왔던 위석으로도 공룡의 생태를 파악할 수 있다. 이러한 증거들을 통하여 공룡의 실체에 다가갈 수 있다.

한반도에서는 약 20 곳 이상의 지역에서 공룡발자국들이 산출되고 있으며 주요 화석지는 백악기 경상분지를 비롯한 여러 소분지들에서 발견되고 있다(Huh *et al.*, 2003). 주로 발견되는 공룡발자국 종류로는 조각류가 가장 많이 발견된다. 조각류발자국은 대부분이 넓은 발굽(hoof)을 갖는 대형 조각류 발자국인 캐리리클리움(*Caririchnium*)의 이구아노돈 종류와 하드로스아우루스 종류들로 주로 동정되고 있다(Huh *et al.*, 2003). 수각류발자국은 화순 능주분지에서 가장 우세하고 발견되고, 그것들은 소형 또는 중형 크기의 새발자국 타입(유형) 발자국(small or medium-sized bird-like footprints), 다른 대형 수각류발자국(large theropod foot-

prints) 등 여러 가지 타입(유형)으로 분류되었다(Huh *et al.*, 2006). 용각류 발자국은 크기, 형태, 보행렬의 패턴에 있어서 다양성을 보이고(Huh *et al.*, 2003), 한반도에서 여러 종류의 용각류가 살았던 것으로 증거되고 있다. 이러한 증거는 한반도가 백악기동안 크고 작은 여러 지역에 분포된 호숫가에서 다양한 종류의 공룡들이 번성하였음을 시사하고 있다.

이번 연구는 한반도에 분포하는 공룡발자국 화석을 통해서 백악기 고생태환경을 복원하는 첫 번째 시도로 한반도 공룡발자국화석 가운데 육식공룡 수각류 발자국의 다양한 형태를 분류하는데 주요한 목적이 있다. 이러한 연구는 공룡발 골격모양과 퇴적물과의 관계를 알 수 있는 기초단계의 연구이며, 장차 발자국 보행렬을 통하여 백악기 공룡의 걸음걸이와 속도를 정밀하게 유추 할 수 있는 기본 단계의 연구라 할 수 있다. 본 연구를 위해서 백악기 수각 공룡발자국이 풍부하게 발견되는 지역인 전남 화순 서유리, 전남 여수 사도, 추도, 낭도 일대, 경남 고성군 하이면 일대, 그리고 경남 창녕을 포함한 네 지역이 선택되어 연구되었다.

연구 방법

발자국 형태에 관한 연구

지층에 나타나는 공룡 발자국의 형태를 측정을 위하여 다음과 같은 방법이 이용된다. 먼저 발자국 하나하나를 자세히 관찰하여 각각이 갖는 특색들을 파악한 다음 발자국 보행렬을 정밀하게 분석한다. 발자국들은 기본적인 형태와 퇴적물에서 야기되어 나타난 이상 형태 발자국, 그리고 공룡들의 습성에서 알 수 있는 발자국의 찍힌 면적 등이 종합적으로 검토된다. 특히, 한반도 용각류 공룡발자국은 앞발과 뒷발이 비정상적으로 퇴적물에 찍힌 경우가 허다하다하기 때문에 정밀한 측정이 요구 된다 (Hwang *et al.*, 2003). 이러한 연구는 발자국 형태를 규명하고 발자국 종류가 밝혀지는 기본적인 연구이다. 이들을 측정하는데 있어 야외에서 발톱의 흔적이거나 발가락의 윤곽선이 매우 잘 보존된 경우는 공룡 종류를 구별하는데 별로 어렵지 않다. 이들은 발자국 길이와 폭의 비율, 발가락의 모양, 발가락의 폭, 발가락의 곡률, hallux(뒷발가락)의 방향 등에 의해 인지된다.

공룡발자국 형태에 대한 분류학적인 기술은 발톱자국, 뒷굽치자국(heel-marks)과 같은 특징과 함께 발가락(impressions of fingers or toes)의 수, 크기, 형태 그리고 배열을 고려하여야 한다. 발자국 화석은 앞발과 뒷발이 있으나 본 연구 대상은 2족보행을 하는 수각류로서 뒷발(pes, hind foot)만을 보행에 이용하였기 때문에 앞발에 대한 내용은 제외시켰다.

발가락의 수(Number of digits) : 일반적으로 공룡 발자국은 세 개의 발가락(Ⅱ~Ⅳ번)으로 구성되며 이를 tridactyl 이라고 기술한다. 이 밖에도 tetradactyl(4개의 발가락), pentadactyl(5개의 발가락)이 있기도 하며, didactyl(2개의 발가락)과 monodactyl(한 개의 발가락) 발자국도 화석에서 발견된다(Thulborn, 1990). Pentadactyl 발자국에서 1번 발가락은 hallux로 표현된다(Fig. 2a-c).

발가락의 크기(Size of digits) : 일반적으로 공룡의 발가락은 Ⅲ번 발가락이 가장 길며 Ⅱ, Ⅳ번 발가락은 Ⅲ번 발가락보다 작다. Ⅲ번 발가락이 가장 긴 일반적인 형태를 mesaxonic이라고 기술한다. 만약 가장 긴 발가락이 바깥쪽에 있는 발가락(Ⅳ or Ⅴ)중의 하나라면 ectaxonic, 안쪽에 있는 것(Ⅰ or Ⅱ) 중 하나라면 entaxonic으로 기술한다(Fig. 2d-g; Fig. 3a-f; Fig. 5).

발가락의 형태(Shape of digits) : 하나의 발자국에서 발가락은 비정형의 형태를 갖고, 다양한 크기를 갖는다. 보통 발가락은 직선형(straight)이나, 때로는 하나 또는 그 이상의 발가락이 뚜렷하게 휘어져(curved) 있다(Fig. 2h,i). 어떠한 경우의 발가락은 평행한 변의 외각선(outline)을 갖는 U-shaped한 형태를 취하기도 하고, 다른 경우는 뾰족한 끝(pointed tip)을 갖는 각지거나(angular) V자 형태(V-shaped)한 형태를 갖는다(Fig. 3j, k). 발가락의 끝에는 종종 발톱자국(craw mark)가 인지되기도 하는데 그 형태에 따라 long or short, narrow or broad, straight or curved, V-shaped or U-shaped로 표현한다.

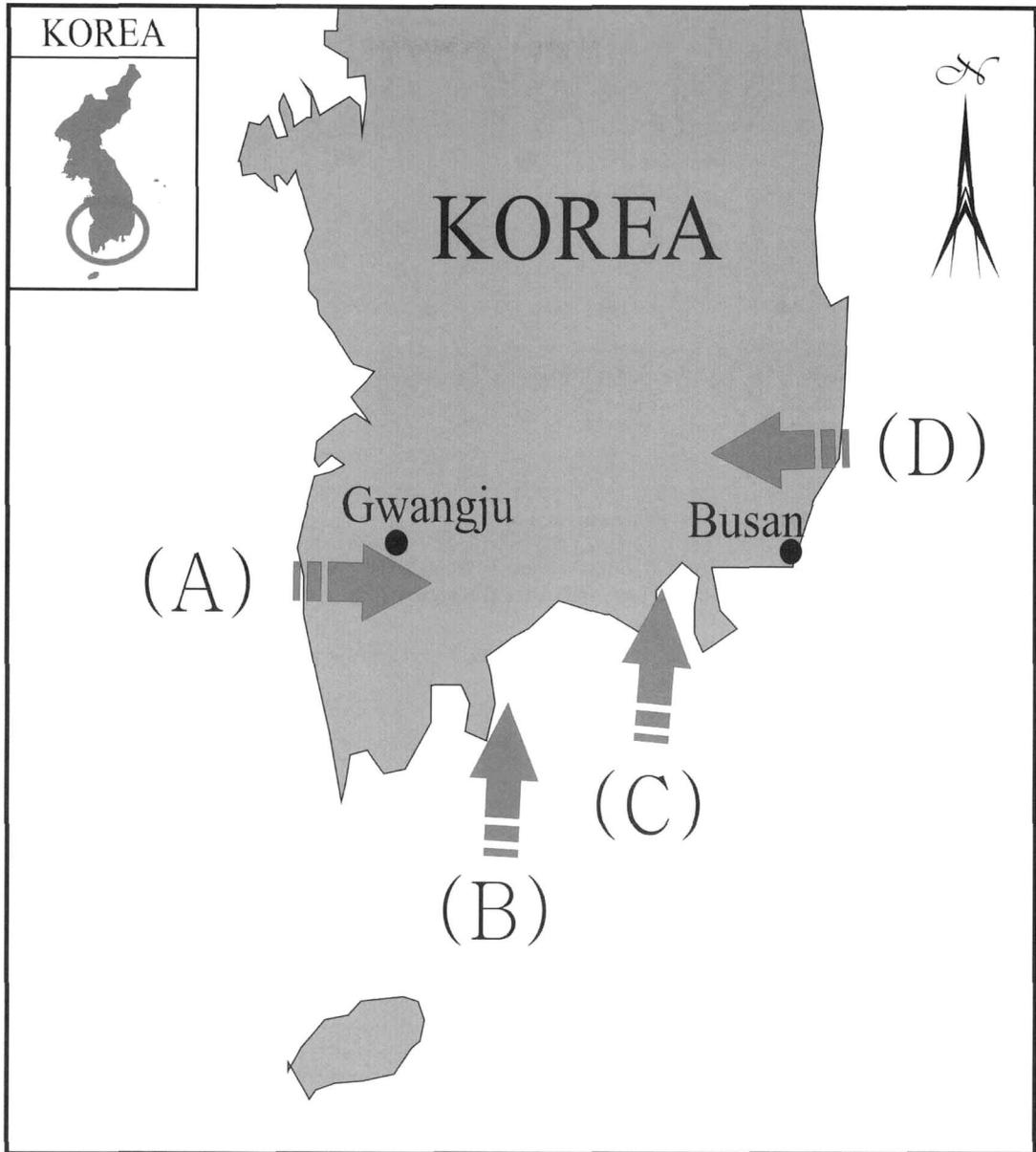


Fig 1. Location map showing the study area (A) Hwasun, (B) Yeosu, (C) Goseong, (D) Changnyeong.

발바닥(Metapodium) : 대부분의 공룡은 땅바닥에 평평하게 퍼지는 지행성(digitigrade) 보행을 한다. 공룡이 발가락과 발바닥을 이용해 정상적으로 걸었는지(normal digitigrade posture)(Fig. 5a), 공룡이 발가락만을 이용해 보행을 하였는지(elevated digitigrade posture)(Fig. 5b), 또는 발바닥과 뒷꿈치 모두를 사용해 걸었는지(plantigrade or flat-footed posture)(Fig. 5c)를 알 수가 있다.

수각류의 인식 기준

야외에서 발톱의 흔적이나 발가락의 윤곽선이 매우 잘 보존된 경우에는 수각류(theropod)와 조각류(ornithopod)의 구별이 그리 어렵지 않을 것이다. 그러나 경우에 따라 풍화가 많이 되어 구분이 애매한 경우

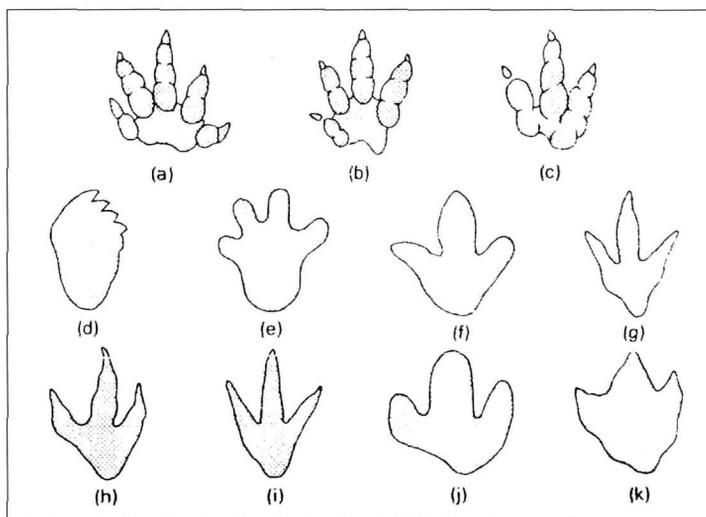


Fig. 2. Number, size and shape of digits in dinosaur footprints. (a) Pentadactyl print. (b) Tetradactyl print. (c) Tridactyl print. (d-g) Variation in the length of digits, from extremely short (d) to very long (g). (h) Curved digits. (i) Straight digits. (j) Rounded or U-shaped digits. (k) Pointed or V-shaped digits. All the diagrams are based on actual footprints(After Thulborn, 1990).

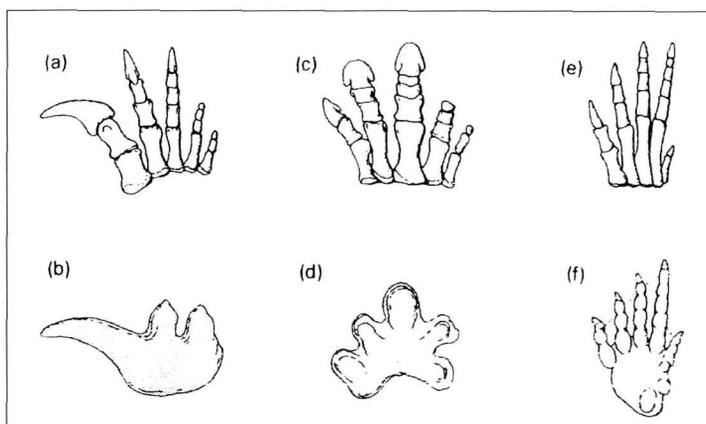


Fig. 3. Footprint symmetry. (a,b) Entaxonic foot structure and corresponding footprint, with the largest digit on the inner side. (c,d) Mesaxonic foot structure and a comparable footprint, with digit III the largest. (e,f) Extaxonic foot structure and corresponding footprint, with the largest digit towards the exterior(After Thulborn, 1990).

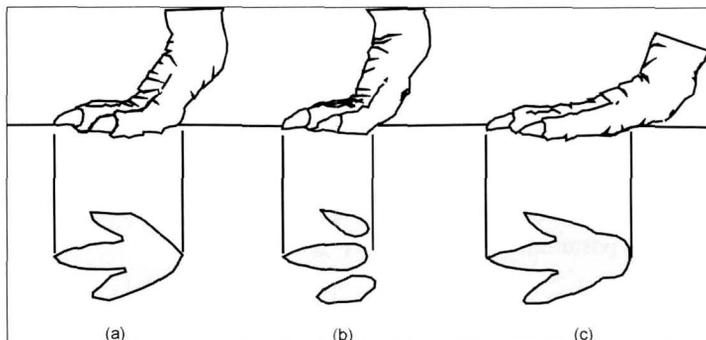


Fig. 4. Overall shape of footprint related to foot posture. (a) Normal digitigrade posture. (b) Elevated digitigrade posture. (c) Plantigrade or flat-footed posture(After Thulborn, 1990).

도 있다. 이들 발자국들 가운데 수각류를 분류하는 기준은 다음과 같다.

길이와 폭의 비율 : 수각류의 발자국은 조각류에 비해 발자국 폭보다 발자국 길이가 더 긴 형태를 취한다.

발가락의 모양 : 수각류의 발가락은 끝이 뾰족한(tapering) 발가락으로 구성되며 전체적으로 V-shaped를 갖는 윤곽선을 보여주는 반면에 조각류는 차라리 클로버 잎 모양에 가까운 U-shaped를 갖는 외곽선을 보여 준다. 이러한 차이는 보행에 있어서 중심적인 역할을 하는 III번 발가락의 비율에 의한 것으로 볼 수 있다. 발가락 중에서 특히 III번 발가락의 끝부분에서 좁고 가느다란 발톱은 수각류의 전형적인 특징으로 인지가 되며 이에 반하여 조각류는 무디고 둥그런 형태의 발톱을 보여준다. 때로는 소형 조각류의 발자국에서 가느다란 발톱 형태를 보여주나 소형 수각류만큼 가느다랗거나 날카롭지 못하다.

발가락의 폭 : 수각류의 발자국을 구성하는 발가락은 특징적으로 조각류의 것보다 매우 좁고 가느다랗다 (Moratalla *et al.*, 1988). 이러한 특징은 수각류의 발가락이 지면을 움켜쥐고 보행하기에 매우 효율적임을 지시한다. 그러나 이러한 기준이 보존상의 여러 요인에 의한 영향을 고려해야 한다(Thulborn, 1990).

발가락의 곡률 : 수각류의 경우 발가락 III번의 때로는 특징적으로 휘어져(curved) 나타난다. 이러한 특징은 족흔학상 분류에서 *Anchisauripus* 와 *Grallator*에서 가장 특징적으로 나타난다. 조각류에서는 이러한 휘어지는 경향이 없거나 아주 미약하다.

Hallux의 방향 : Hallux는 일반적으로 수각류와 소형 조각류에서 나타나는데 대형 조각류에서는 일반적이지 않다. 수각류에서는 hallux의 위치가 발자국의 측면쪽의 후반부나 중앙 후위 또는 바로 뒤에 위치하나 조각류는 발자국의 중앙 또는 안쪽에 위치한다. 신타르수스(Syntarsus)와 같은 초기 코엘루사우루스류는 조각류와 유사하게 II번 발가락을 따라 앞부분에 위치한다(Raath, 1969). 보행렬에서 보면 수각류의 발자국의 방향이 앞쪽을 향하는 반면 조각류는 보행방향을 중심으로 안쪽으로 향하는 자세를 취한다(Fig. 5).

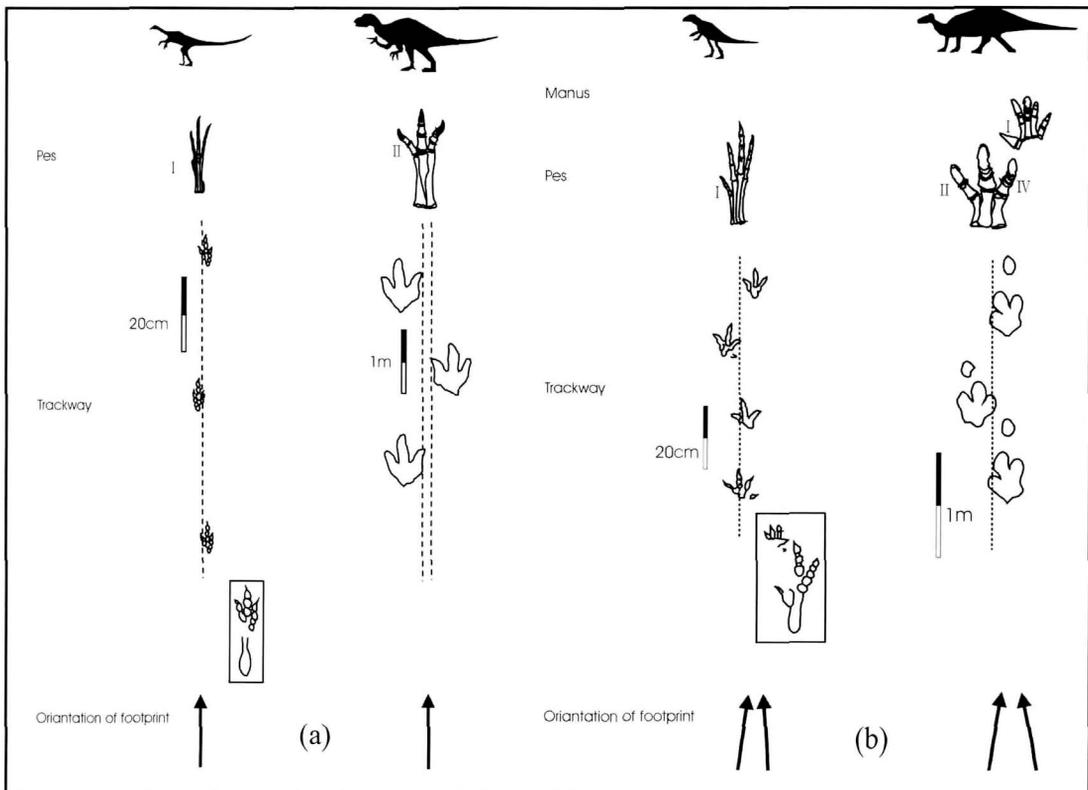


Fig. 5. Comparisons between foot skeletons and trackways(a : theropod, b : ornithomorph).

공룡발자국 및 보행렬 산출상태

화순

화순화석지는 크게 네 개의 층준(Site1, Site2, Site3, Site4)에서 특징적인 공룡발자국이 산출된다. 이 지역은 육식공룡 수각류의 발자국이 한반도에서는 가장 풍부하게 산출되고 있다(Huh *et al.*, 2006). Site1(Level L1)에서 산출되는 공룡발자국들은 총 8개의 보행렬을 구성하고 있다(Fig. 6). 보행렬을 구성하는 공룡발자국들은 수각류발자국이 주를 이루며 6개의 소형 수각류 보행렬(FL < 25 cm), 1개의 대형 수각류, 용각류 보행렬로 구성되어 있다. 소형 2족 보행 공룡발자국(small bipedal dinosaur: FL < 25 cm)들의 경우 전체적인 특징으로 끝이 가늘어지는 발가락(tapering digits), 세 개의 발가락의 인상(imprint)을 보여주는 tridactyl 형태, III 번 발가락이 길고 보행에 있어서 중심적 역할을 하는 mesaxonic 상태(Thulborn, 1990)를 나타낸다. 또한 보행렬을 구성하는 발자국이 진행방향에 대하여 안쪽을 향하는 positive rotation (Farlow, 1981; Thulborn, 1990)의 특징을 보이며 발자국을 이루고 있는 발가락들이 가늘고 유연(flexible)하여 발가락들의 휘어져 나

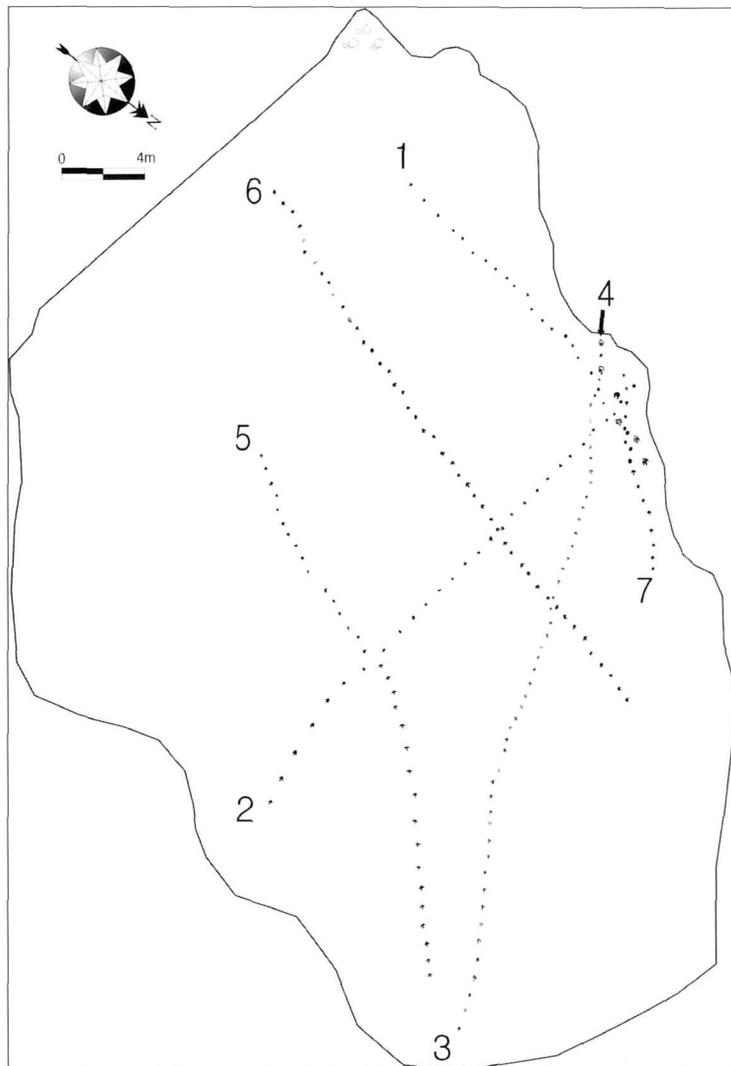


Fig. 6. Map showing the dinosaur trackways in Site1(Level L1) of the Hwasun dinosaur tracksite (Modified from Huh *et al.*, 2006).

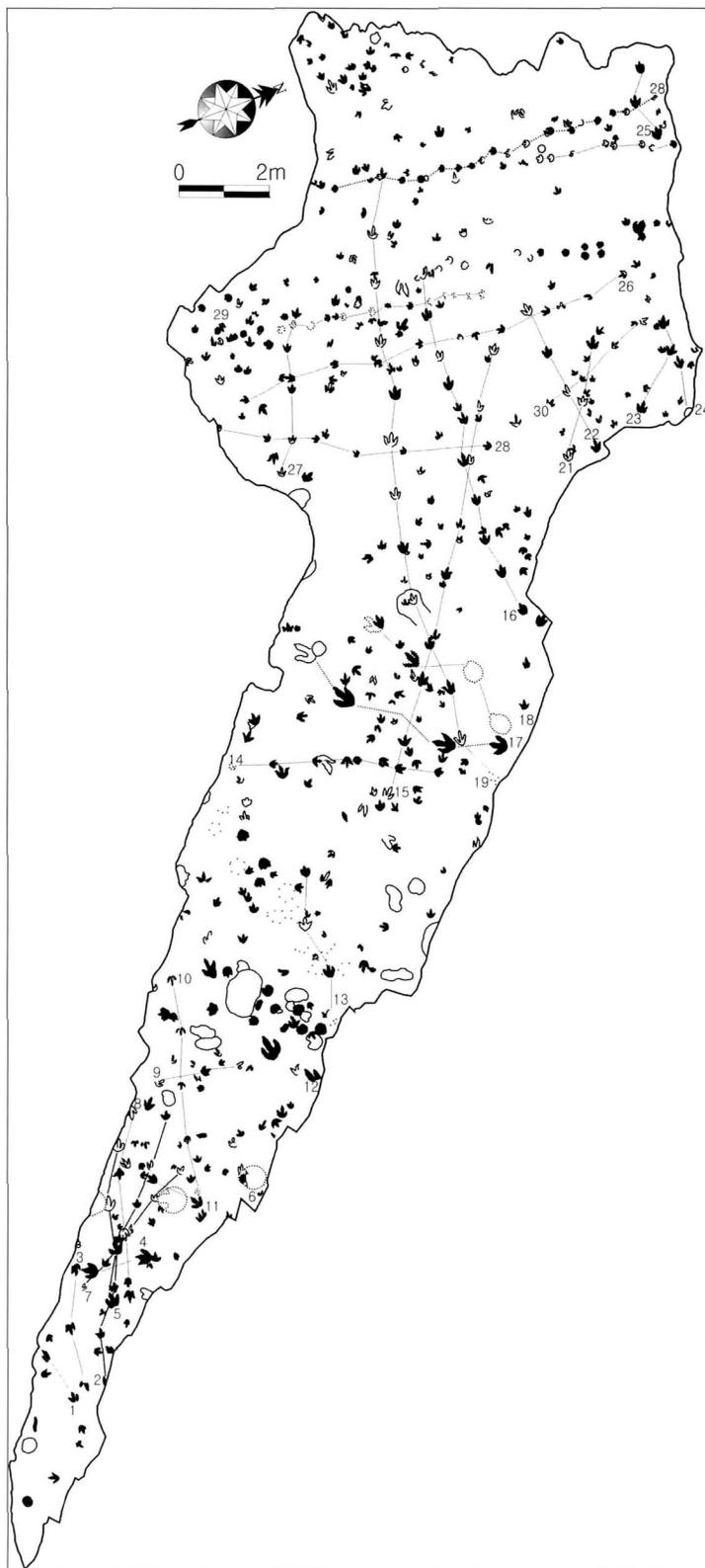


Fig. 7. Map showing the dinosaur trackways in Site2(Level L2) of the Hwasun dinosaur tracksite(Modified from Huh *et al.*, 2006).

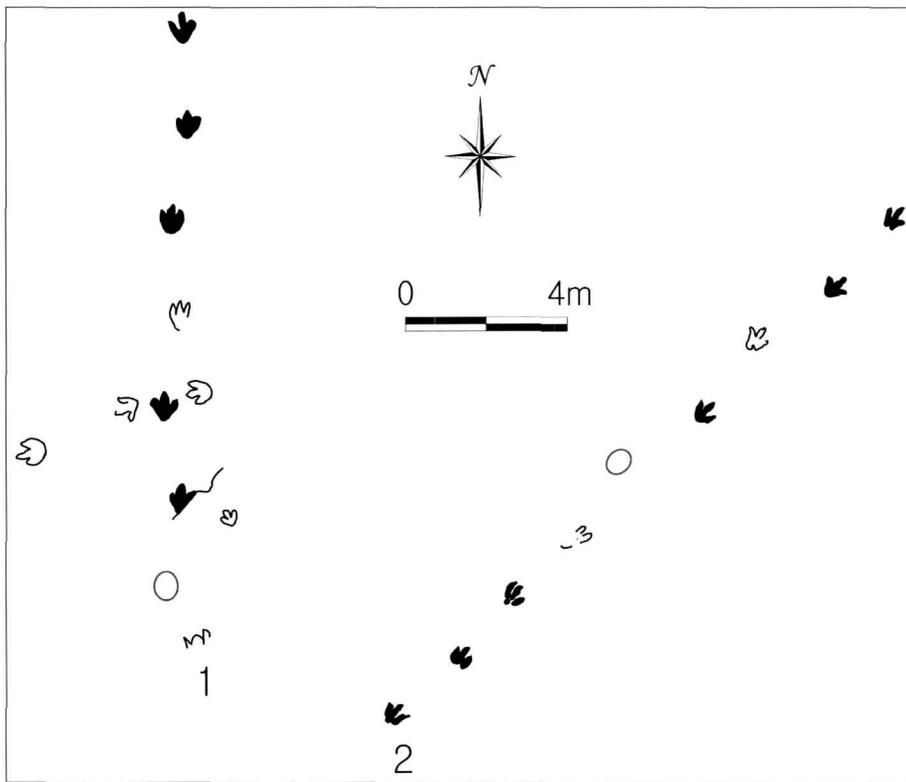


Fig. 8. Map showing the dinosaur trackways in Chu-do island(Site3, trackways 1~2), Yeosu (After Huh *et al.*, 2002).

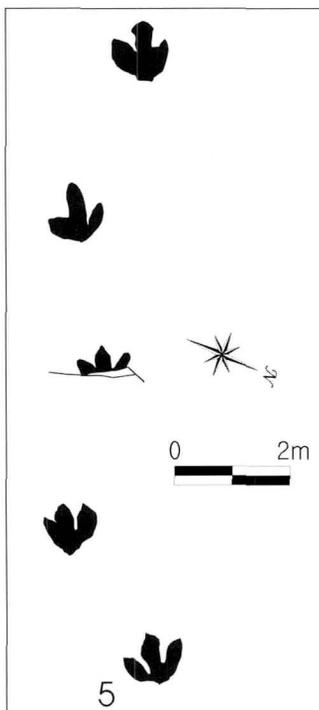


Fig. 9. Map showing the dinosaur trackways in Nang-do island (Site4, trackway 5), Yeosu (After Huh *et al.*, 2002).

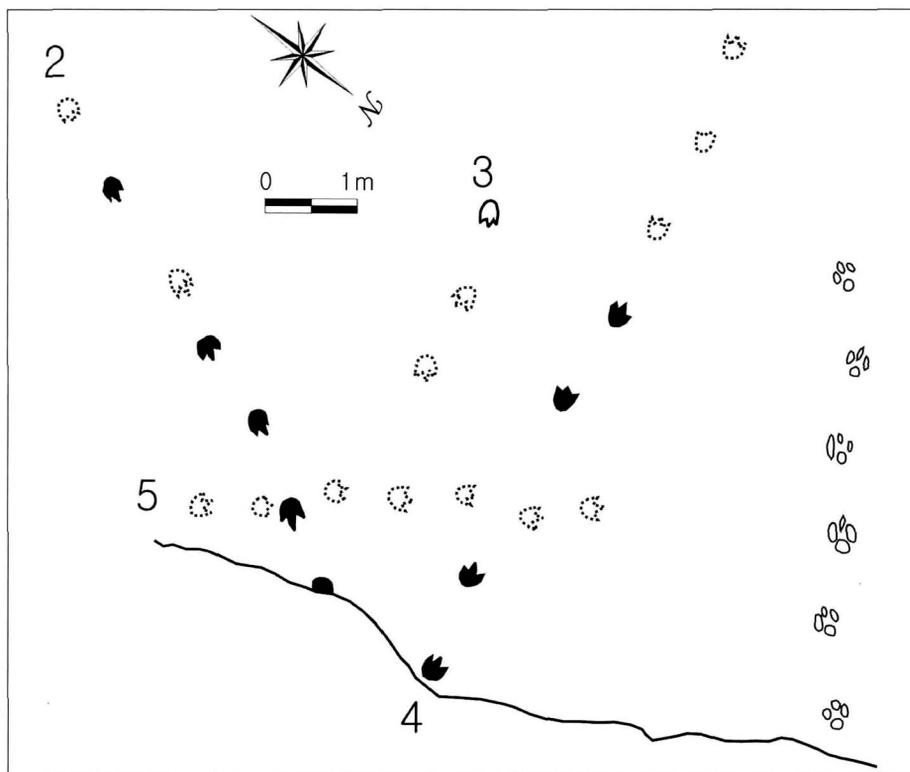


Fig. 10. Map showing the dinosaur trackways in Goseong(Site1, trackways 2~5)(Modified Lim, 1990).

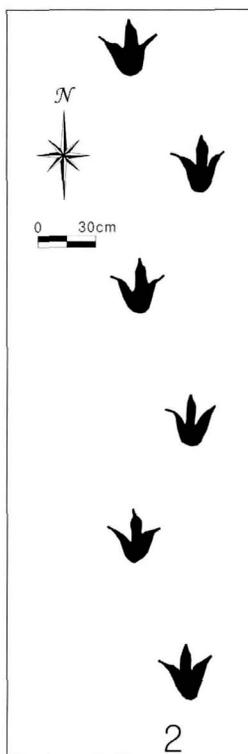


Fig. 11. Map showing the dinosaur trackways in Goseong (Site 3, trackway 2), Modified Lim, 1990).

타나는 특성 등을 통하여 수각류의 것으로 인지가 되어 질 수 있다. 대체적으로 발자국의 깊이가 깊게 찍혀 나타나지 않으며 경우에 따라 발자국들의 발자국 내부에 상부층의 퇴적물 등으로 채워져 있는 경우가 자주 나타나 세밀한 기재가 어려운 경우도 존재한다. 보행렬을 구성하는 발자국 산출형태에서 나타나듯이 전체적으로 metapodium(발바닥)이 지면에 찍히지 않는 digitigrade gaits(stance)(지행성 보행)를 보여주고 있으며 보행 각도 일직선에 가까운 형태로 보행 시 내딛는 발을 먼저 내딛은 발의 앞에 놓는 보행의 특성을 지시해준다.

산출특성을 통한 1차적인 분류를 본다면 보행렬 HS1, HS2, HS5, HS6의 total divarication 값이 각각 89°, 91.2°, 93.1°, 103.5°로 보행렬 HS3의 67.7°보다 크게 나타나 발가락 사이의 각이 크게 나타난다(Fig. 12a). 이는 단단한 지면보다 부드러운 지면을 보행 시 증가할 수 있으나(Currie and Sarjeant, 1979) 본 연구에서 total divarication 값이 대체적으로 일관된 특징을 나타냄은 좁은 분류상의 중요한 특징으로 인지가 될 수 있다(Thulborn, 1990). 그리고 보행렬 HS6의 경우 III번 발가락축의 뒷부분에 hallux (digit I)의 흔적이 관찰되기도 한다. 보행렬 HS3를 이루는 발자국들에 비하여 나머지 소형 수각류 보행렬 (A, B, E, F)은 II, IV번 발가락이 유연하여 바깥쪽으로 휘어지면서 끝이 안쪽을 향하는 특징(S자형)이 구분의 기준이 될 수 있으리라 생각한다.

대형 수각류로 인지되는 보행렬 HS4 (FL=56.1 cm)의 경우 elevated digitigrade gaits를 보여주고 있다. 산출특징으로는 발가락이 두꺼우나 끝이 날카로워지는 모습을 통하여 수각류의 것으로 인지 된다. 전체적으로 발자국 내부에 충진물로 인하여 뚜렷한 윤곽의 인식은 어렵다.

Site 2(Level L2)는 Site1의 상부에 속하는 층으로 공룡발자국 산출의 밀집도가 가장 높은 층수에 해당한다. 산출되는 발자국들은 35개의 보행렬을 구성하고 있으며 조각류와 수각류의 것으로 판명된다. 이중 29개의 보행렬이 수각류의 보행렬이다(Fig. 7). Site1의 수각류 발자국과 구별되는 특징으로는 전체 발가락 사이의 각이 넓지 않아 발가락들의 평행한 배열을 보여준다. 그리고 발톱(claw)흔적이 V자형의 형태로 발가락에 잘 나타나며 발톱의 위치가 발가락 끝 부분에서 한쪽으로 치우쳐 위치하는 형태를 나타내는 특징을 보여주고 발가락에는 용기(swellings) 또는 마디(nodes)의 흔적이 경우에 따라 인지가 되어 좁은 분류 등에 귀중한 자료를 제공해 준다. 소형 수각류(FL<25 cm)의 경우 대부분 digitigrade gaits를 이용한 흔적을 보이지만 대형 수각류(FL>25 cm)의 경우 functional heel 흔적이 나타나며 발자국 길이가 50 cm 이상인 대형 수각류의 경우에는 윤곽은 뚜렷하지 않지만 heel-like impression이 보존되어 나타난다.

Site3(Level L3)는 총 3개의 수각류 보행렬과 30개의 수각류 발자국들이 산출이 된다(Huh *et al.*, 2006). Site2와 유사한 산출형태를 보이면서 tridactyl, mesazonic condition, digitigrade stance의 특징을 보여준다. 경우에 따라 보존상태가 좋지 못하나 V자형의 날카로운 발톱의 흔적이 인지가 되며 발가락의 끝에서 한쪽으로 치우쳐 직선으로 나타나 있는 특징을 보여준다.

Site4(Level L4)는 화순공룡화석지에서 발자국 층으로서 가장 상부에 속하는 층으로서 뚜렷한 견열과 함께 공룡발자국이 산출이 된다. 1개의 용각류 보행렬을 제외한 모든 보행렬이 수각류의 보행렬이며 이곳에서는 총 25개의 보행렬을 구성하고 있다(Huh *et al.*, 2006). 전체적으로 Site2, 3 층준의 수각류와 산출형태에 있어서 크게 다르지 않으나 보존상태에 있어서 기온차등으로 인한 훼손으로 인해 underprint의 형태로 남아 있는 경우가 많아 약간 애매할 때도 있다. 수각류의 발자국은 경우에 따라 발톱이 V자형을 나타내며 II번과 IV번 발가락의 끝에서 바깥쪽으로 치우쳐 나타나는 특징도 보인다.

여수

여수지역의 공룡발자국 산출지역은 사도, 낭도, 추도, 목도, 적금도의 5개 지역에서 총 3,546점의 공룡발자국이 보고 되었다(허민외, 2002).

사도의 경우 공룡 발자국은 사도와 중도 사이 해안에 노출된 이암층에서 공룡발자국이 풍부히 산출된다. 여기에는 조각류와 수각류의 발자국이 대부분 발견되었다(1개의 용각류 보행렬)(Paik *et al.*, 2006). 다른 화석지는 서부해안에 노출된 퇴적층에 의해 발견되었는데 보존 상태는 불량하나 많은 조각류의 발자국이 발견되었다. 추도의 공룡발자국은 북동해안에 노출된 세립사암과 세일에서 발견되었으며 나머지는 서쪽해안을

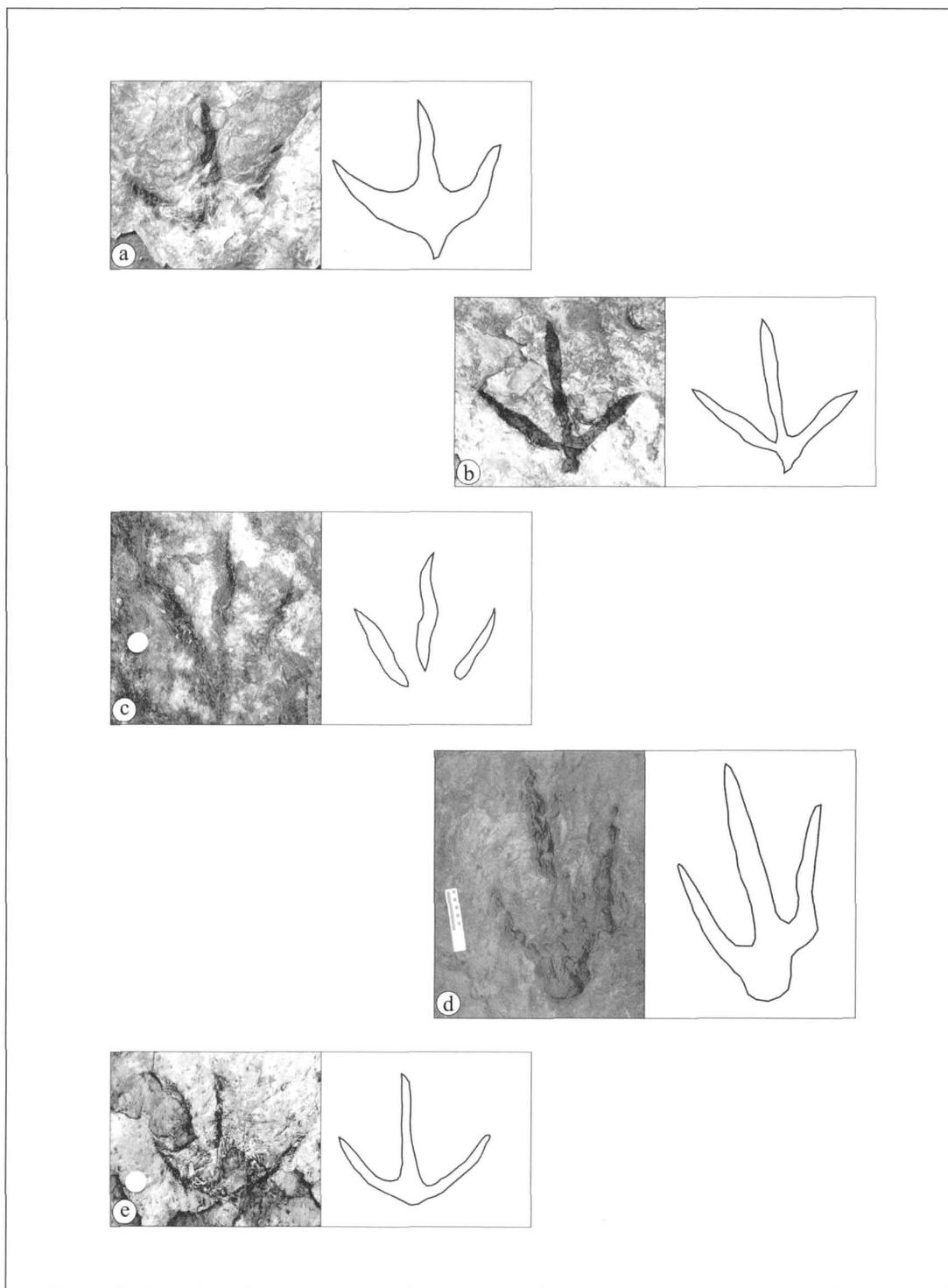


Fig. 12a. Photographs and drawings of various kinds of theropod tracks occurred from Site 1 of Hwasun(a:HS1, b:HS2, c:HS3, d: HS4, e:HS5).

따라 여러 층에서 발견된다. 이 곳의 화석지는 건 위치에 따라 해안을 시계방향으로 돌며 9개의 보행렬이 발견된다. 85 m(미터) 길이의 아주 긴 조각류 보행렬들이 관찰된다. 이 가운데 3개의 수각류 보행렬이 본 연구에 이용되었다(Fig. 8). 낭도는 도서 중앙부 선착장을 중심으로 남쪽 해안과 낭도 등대 북동쪽 연안이 가파른 해안절벽으로 둘러싸여 있는데 이 남쪽 일대 해안가에 발달한 적색 내지 담녹색의 사암, 실트스톤(암), 셰일이 교호하는 지층에서 공룡발자국이 발견되었으며 썰물 때 이 층준이 노출된다. 이곳의 화석지는 동쪽으로부터 순서대로 명명하였으며 최상부 발자국층인 4곳의 화석지가 있고, 하부로 가면서 두 곳의 화석지가 있다. 이 섬에의 화석지에서는 22 m의 소형 수각류 보행렬과 상부층의 몰드로 잘 보존된 대형 수각류 보행렬이 발견되었다. 이 곳에서는 세 지역에 걸쳐 5개의 수각류 보행렬이 발견되었다(Fig. 9)(허 민 외, 2002; Huh *et al.*, 2003; Paik *et al.*, 2006).

고성

고성 덕명리는 국내에서는 최초로 공룡발자국이 발견된 곳으로 고성군 화석 산지 가운데 대체로 잘 알려진 지역이다. 고성군에서 공룡발자국이 발견된 지역은 연구 지역인 고성군 하이면 덕명리 해안과 고성읍, 하일면, 삼산면, 회화면 일대 지역이다. 덕명리를 포함한 광의의 고성화석지에서는 249개의 조각류 공룡발자국 보행렬, 139개의 용각류 발자국 보행렬, 24개의 수각류 발자국 보행렬들이 나타나고 있으며 이들 보행렬에는 총 3800여개의 공룡발자국이 포함된 것으로 보고되고 있다. 이 가운데 덕명리 공룡발자국들은 상족유원지에서 실바위까지 약 6 km에 걸쳐 발달되어 있다. 이곳의 지층의 두께는 약 150 m이며, 약 200여 층에서 2000여개의 공룡발자국과 250여개의 공룡발자국 보행렬이 산출된다. 본 화석지에는 조각류, 수각류, 용각류 등 다양한 종류와 크기의 공룡발자국들이 산출되고 있다. 한편, 새발자국은 *Jindongornipes kimi*와 *Koreanaornis hamanensis* 등이 발견되었다.

수각류 발자국은 용각류와 조각류에 비해 상대적으로 적게 산출되나 다양한 크기의 수각류 발자국이 나타나며 또한 형태적으로도 흥미로운 발자국들이 산출된다. 이곳에서 발견된 수각류 발자국은 발가락자국 뿐 아니라 발바닥 자국이 찍힌 것(plantigrade or flat-footed posture)이 발견되었다. 경우에 따라 수각류의 발가락 끝에 발달한 뾰족한 발톱자국이 선명하게 드러나 있어 조각류 발자국과의 차이점을 알 수 있다. 고성 지역에서 발견된 수각류는 화순과 여수에서 발견된 수각류 발자국과 비교가 가능하다 (Huh *et al.*, 2001). 대체적으로 각 발자국들의 보존상태는 양호하며 세 개의 발가락이 찍히며 III번 발가락이 가장 긴 전형적인 tridactyl, mesaxonian 발자국 형태를 보인다(Figs. 10, 11).

창녕

이 지역은 경남 창녕 부곡온천 입구 좌측에 노두가 위치하고 있으며, 11개 층에서 20여개의 공룡발자국이 산출된다. 이 중 두 개의 연장성이 두드러진 수각류 보행렬을 본 연구에 이용하였다. 보행렬 1은 20.33 cm의 평균 FL(발가락 장축)을 가지는 소형 수각류에 의해 만들어진 보행렬로, 노두상에서는 3개의 발자국이 보존되어 있다. 각 발자국들의 보존상태는 양호하며 세 개의 발가락이 찍히며 III번 발가락이 가장 긴 전형적인 tridactyl, mesaxonian 발자국 형태를 보인다(Fig. 15). 보행렬2는 10개의 소형발자국으로 이루어진 보행렬로, 수각류의 특징인 발톱자국(craw mark)이 두드러지게 나타나 수각류의 보행렬로 판단되고, 오랫동안 자연상태에 노출되어 있어서 풍화로 인해 보존상태가 그리 좋지 못하다. 발자국이 잘 보존된 것은 3개 정도이고 나머지는 일부가 소실되거나 대부분이 보이지 않는 것도 있었다. 전체적인 보행렬을 예측하여 잘 보존된 발자국을 토대로 기재하였다.

연구결과 및 토의

화순

Site 1에서는 5개 보행렬에서 그 발자국 형태를 분석하였다. HS1의 형태를 보면 발가락의 수는 뒤쪽에 연

장된 형태의 hallux를 갖는 tetradactyl이며 가운데 발가락이 가장 긴 mesaxonic한 형태를 보인다. 발가락은 가늘고 길며 발가락은 휘어져 있는 것도 있으며 뾰족한 끝을 갖는다. Metapodium(발바닥)은 거의 발가락으로만 보행하는 elevated digitigrade posture에 가까운 형태를 띤다. 전체적인 모양은 새발자국과 비슷하게 (bird-like) 생겼으며 길이는 21 cm 정도이다. HS2는 HS1과 비슷하며 좀 더 가느다랗고 긴 발가락을 가지고 있다. 그리고 마찬가지로 연장된 hallux가 관찰이 된다. 보행렬 HS3는 tridactyl, mesaxonic으로 휘어진 발가락을 가지며, 발가락 끝은 V자 모양이다. 발가락 뒷부분이 지면에 닿지 않아 발바닥이 찍히지 않는 elevated digitigrade posture의 보행을 하였다. 이 층에서 가장 큰 발자국(56 cm)인 HS1-4는 역시 tridactyl, mesaxonic하며 4번 발가락 뒷부분이 찍혀서 비대칭적인 모습을 보여준다. 발가락은 U-shaped(U자 모양)의 모습을 보이며, V-shaped(V자 모양)의 모양에서는 crawl mark가 관찰된다. HS5는 HS2와 비슷한 모습을 보이나 hallux가 관찰되지 않는다(Fig. 12a).

Site 2와 3의 HS6는 tridactyl, mesaxonic으로 직선형의 발가락을 가지고 있고, 끝이 뾰족하다. Crawl mark가 보이며 일반적인 digitigrade posture를 보이나 뒷부분이 움푹 패여 있는 형태를 하고 있다. 크기는 약 25 cm로 대형 수각류에 속한다. HS7은 잘 보존되지 못한 발자국이나 세 개의 발가락(tridactyl)이 보이고 straight하고 pointed tip(뾰족한 끝)을 가지는 발가락이 관찰된다. HS8은 발 뒤축이 U-shape이며 굽은 발가락은 마찬가지로 U-shape한 대칭적인 모양을 보인다. 발가락 끝에 crawl mark가 관찰이 된다. 크기는 55 cm로 대형 수각류의 발자국이다. HS9는 tridactyl, mesaxonic하며 III번 발가락이 심하게 휘어져 있으며, elevated digitigrade posture를 보인다. HS10은 전형적인 tridactyl이며 길고 straight한 발가락이 대칭적으로 놓이고, normal digitigrade posture의 보행을 하였다. Heel은 뒤로 갈수록 썩기(wedge) 형태를 보여준다. HS11은 HS7과 비슷한 형태이나 휘어진 발가락을 가지고 있다. Site 3의 HS12는 tridactyl, mesaxonic하며 straight하고 굽은 발가락은 II~III번이 III~IV번 발가락보다 더 벌어져 비대칭적인 모습을 보인다. 각 발가락의 끝에는 V-shape의 crawl mark가 발달해 있다(Fig. 12b).

Site 4의 HS13은 heel이 U자 형태를 취하고 있고, mesaxonic하고 tridactyl한 발가락 끝에 보이는 crawl로 수각류임을 알 수 있다. 발가락 길이는 중간 정도이며 straight하다. HS14는 15 cm 정도 크기의 소형 수각류 발자국이며 뒤축으로 갈수록 V-shape한 형태를 갖는다. Pointed digit를 가지고 있으며 normal digitigrade 형태를 하고 있다. HS15는 tridactyl 발자국으로 pointed digit를 보이며 elevated digitigrade의 모습을 보인다. HS16은 길고 가느다랗고 끝이 뾰족한 비대칭의 발가락을 가지며 발가락이 휘어져 있기도 하다. Heel은 II, IV번 발가락이 많이 찍혀 패인 모습을 하고 있다. HS17은 III번 발가락이 유난히 굽은 tridactyl, mesaxonic한 형태를 가지고 heel은 U-shape한 형태로 symmetry(대칭)한 모양이다. HS18은 HS15와 유사한 형태를 갖는다(Fig. 12c).

여수

YS1은 이 지역에서 유일한 tetradactyl로 발자국의 좌후방에 연장된 hallux가 관찰이 된다. 발가락은 가늘고 길며 휘어져(curved) 있다. 끝은 뾰족한 모습을 하고 있다. 크기는 27 cm로 대형 수각류에 해당한다. YS2는 tridactyl, mesaxonic한 형태이고, heel과 toe모두 U자 형태를 하고 있다. 뚱뚱하고 긴 발가락 끝에는 V자 형태의 crawl mark가 있다. YS3는 heel 부분이 넓게 퍼져있는 U자 형태이고, 비슷한 굽기를 가진 세 개의 발가락이 대칭적으로 놓여 있다. II, IV번 발가락의 끝은 뾰족한 모습이고 normal digitigrade 보행을 하였다. YS4는 tridactyl, mesaxonic하며, pointed and covered digit를 가지며 elevated digitigrade posture이다. YS5는 heel과 digit 모두 V-shaped한 모습을 보이며, 중간 정도 길이의 발가락을 가지며 크기는 22 cm로 소형 수각류이다. YS6는 발가락의 마디 형태가 잘 보존된 발자국으로 tridactyl, mesaxonic하며 발가락 끝에 crawl mark가 잘 발달해 있다. 보행 방법은 normal digitigrade posture를 취하고 있다. HS7는 HS4와 유사한 모습을 보이나 발가락이 다소 straight한 모습을 보인다(Fig. 13a).

YS8은 tridactyl, mesaxonic으로 pointed digit를 갖는다. III번 발가락의 뒷부분의 흔적이 남지 않아 heel 부분이 심하게 들어간 모습을 하고 있다. 33 cm의 크기로 대형 수각류가 남긴 흔적이다. YS9는 전체적으로

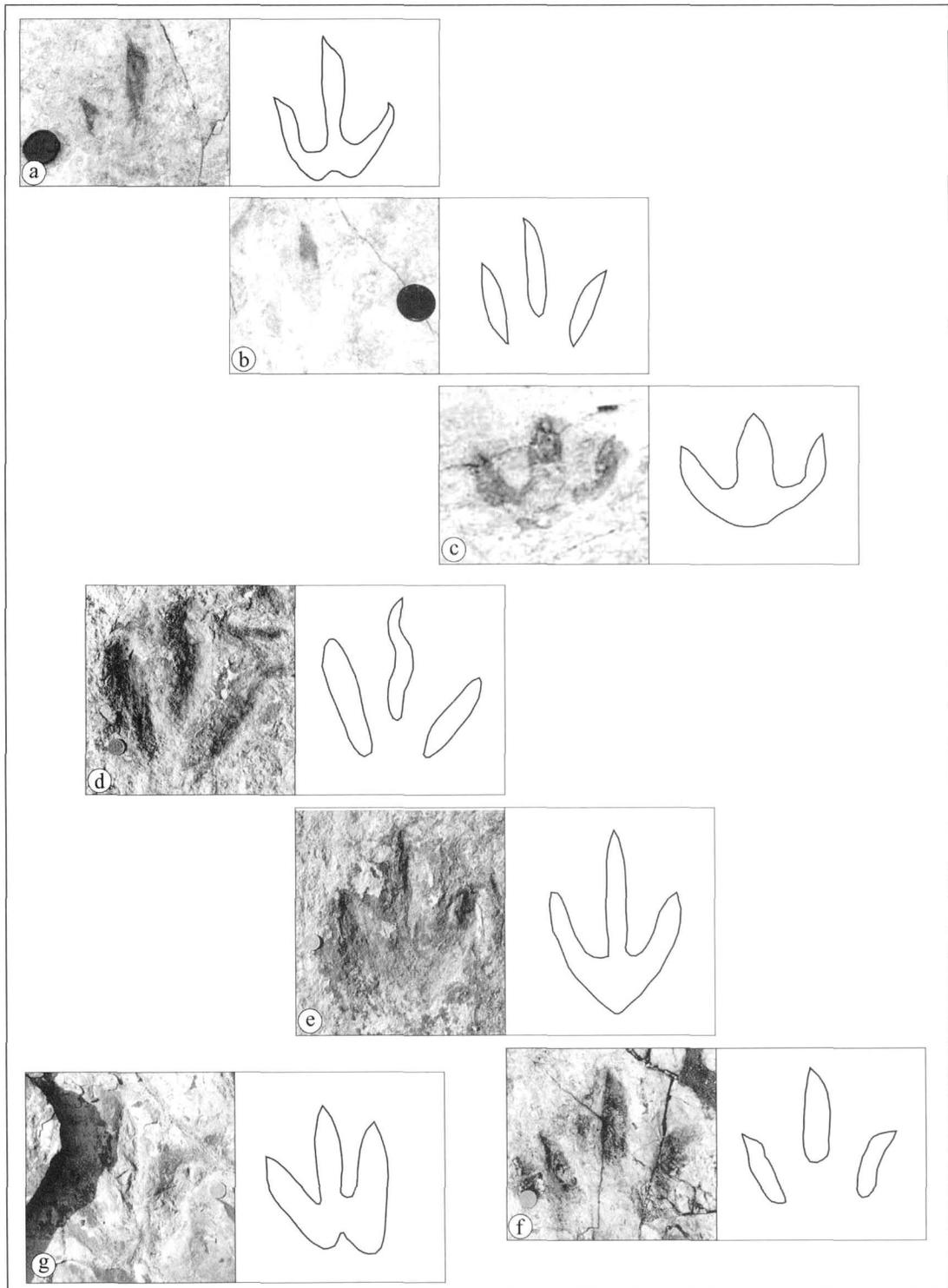


Fig. 12b. Photographs and drawings of various kinds of theropod tracks occurred from Site2 and Site3 of Hwasun (a:HS6, b:HS7, c:HS8, d: HS9, e:HS10, f:HS11, g:HS12).

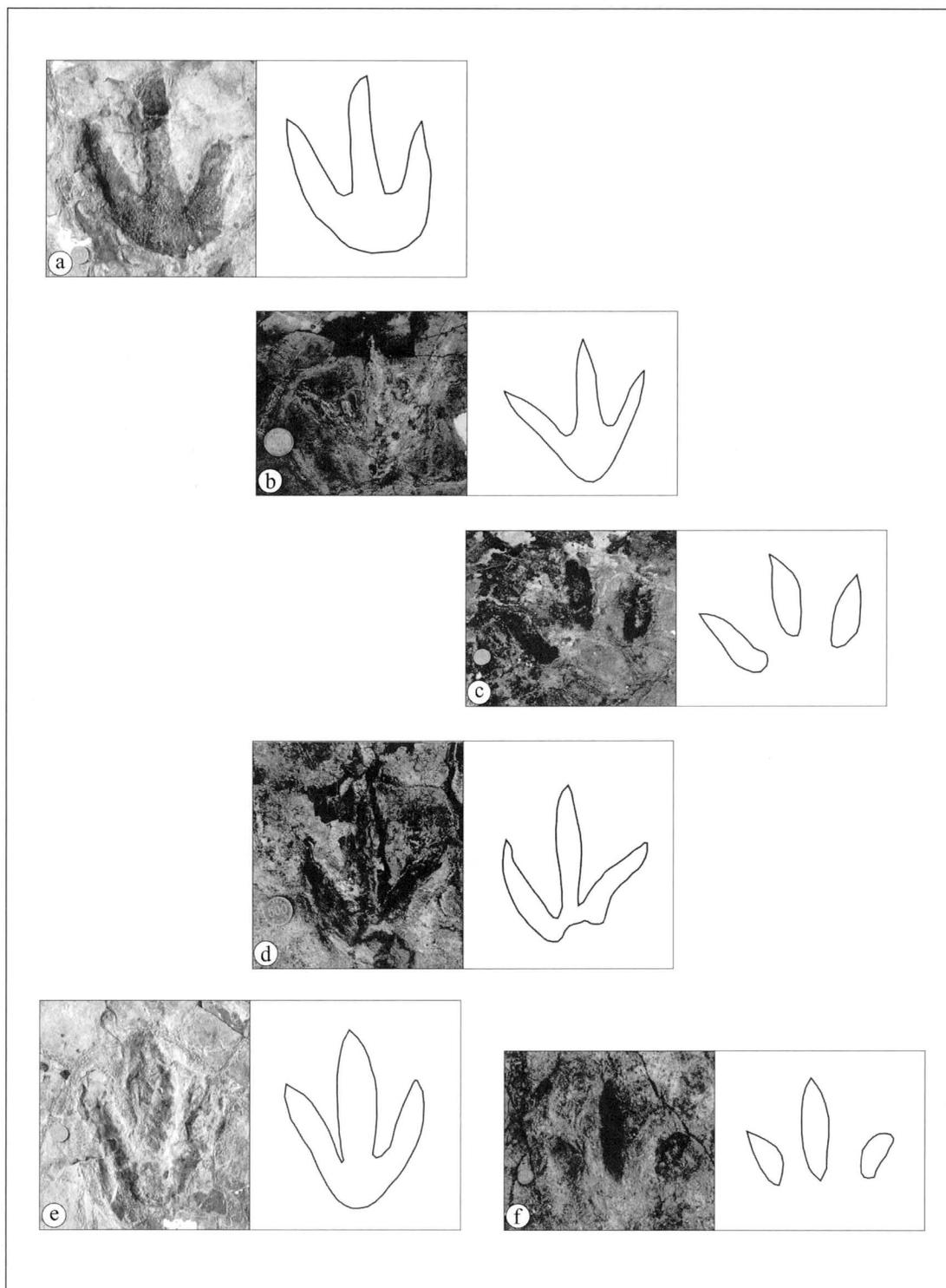


Fig. 12c. Photographs and drawings of various kinds of theropod tracks occurred from Site4 of Hwasun(a:HS13, b:HS14, c:HS15, d:HS16, e:HS17, f:HS18).

rounded한 형태를 가지고 있으나 U-shape한 발가락 끝부분에 *craw mark*가 관찰됨으로써 수각류로서 구별이 가능하다. 보행 자세는 발가락 끝까지 이용하는 *normal digitigrade posture*이다. YS10은 *tridactyl*이나 발가락 하나의 흔적이 미약하다. 끝이 뾰족하고(*pointed tip*) 휘어진 발가락을 보인다. YS11은 *tridactyl*, *mesaxonic*한 발자국으로 *covered and pointed*한 가늘고 긴 발가락을 가지며 *elevated digitigrade*의 보행 자세를 보여준다. 19 cm의 크기를 보이는 소형 수각류 발자국이다. YS12는 V자형 *heel*과 발가락을 갖는 발자국으로 발가락 끝에는 *craw mark*가 관찰되며 중간 길이의 발가락을 갖는다. 보행 자세는 *normal digitigrade*를 하고 있으며 22 cm의 소형 수각류이다. YS13은 U자형 뒤축과 발가락을 가지며 길고 뚱뚱한 대칭적인 발가락을 가지고 있다. 발가락 끝부분에는 V자 모양의 날카로운 발톱이 관찰된다(Fig. 13b).

고성

고성 지역의 수각류 공룡 발자국 형태에 대한 연구는 기존의 자료(Lim, 1990)를 토대로 이루어졌으며 실제 야외 조사에서는 풍화로 인하여 확인이 불가능한 경우도 많았다. GS1의 발자국은 가늘고 긴 세 개의 대칭적인 발가락을 가진 *tridactyl*, *mesaxonic*이며 *heel* 부분은 가운데가 들어가고 IV번 발가락의 흔적이 뒤쪽으로 가장 많이 남아 있다. 발가락 끝은 둥근 형태를 하고 있다. GS2의 발자국은 33 cm의 대형 수각류 발자국으로 *straight and pointed tip*을 갖는 발가락을 가지고 있다. *Heel*은 U-shaped이며 *normal digitigrade posture*를 보여준다. GS3의 발자국은 V-shaped의 *heel*과 길고 두꺼운 발가락을 가진 대형 수각류의 발자국이다. 발가락 끝은 *angular*하며 V-shaped의 *craw mark*가 관찰된다. 그 외에 다양한 모양의 수각류 공룡 발자국 형태가 나타난다(Fig. 14).

창녕

창녕 지역 수각류 발자국은 대체로 거의 비슷한 형태로서 20 cm내외의 소형 수각류의 발자국이다. 가늘고 *straight*한 세 개의 발가락을 가진 *tridactyl*, *mesaxonic*한 발자국으로 발가락의 끝은 다소 V-shaped의 *craw mark*가 관찰이 된다. *heel*은 V-shaped의 형태를 가지고 있으며, 보행자세는 *normal digitigrade posture*였음을 알 수 있다(Fig. 15).

한반도 수각류 공룡의 고생태학적 분석

한반도에서 산출되는 수각류 발자국의 형태는 대부분이 *tridactyl*, *mesaxonic*한 형태(Fig. 16)를 보이며 *normal digitigrade posture* 또는 *elevated digitigrade posture*의 보행 자세를 보이고 있다. *Platigrade posture*는 드물게 산출되었다(Fig. 17). 발가락의 경우 짧은 발가락은 거의 산출되지 않고, 중간이나 긴 발가락을 가지며 그 형태는 *straight*, *tapered*, *curved digits* 등의 다양한 형태의 발자국이 산출되며 *craw mark*가 잘 나타난다. 그림 16은 한반도에서 산출되는 여러 가지 종류의 수각류 발자국 형태를 보여주는 그림이다. 그림 17, 18은 앞서 언급한 발자국 형태를 특징별로 분류한 것이다. 그림에 보이는 것처럼 한반도에서 산출되는 수각류 발자국의 형태는 매우 다양한 형태로 나타남 알 수 있다.

결론

공룡 족흔 화석은 당시 공룡의 생태학적인 특징을 파악하고 당시 생활상을 유추하는데 중요한 자료가 된다. 공룡 보행렬 중에서도 수각류의 보행렬은 그 형태(Types)와 속도(Speeds)에 있어서 다른 종류(조각류, 용각류)의 공룡보다 더 중요한 의미를 갖는다. 금번 연구에서는 현재까지 발견된 수각류 공룡의 발자국 형태에 관한 연구이며, 좀 더 통합적이고 체계적인 연구가 필요함을 알 수 있다. 이를 위해 국내에 산재하는 백악기 공룡발자국 화석지 중 네 곳(화순, 여수, 고성, 창녕)에서 산출되는 비교적 보존 상태가 양호한 공룡 보행렬

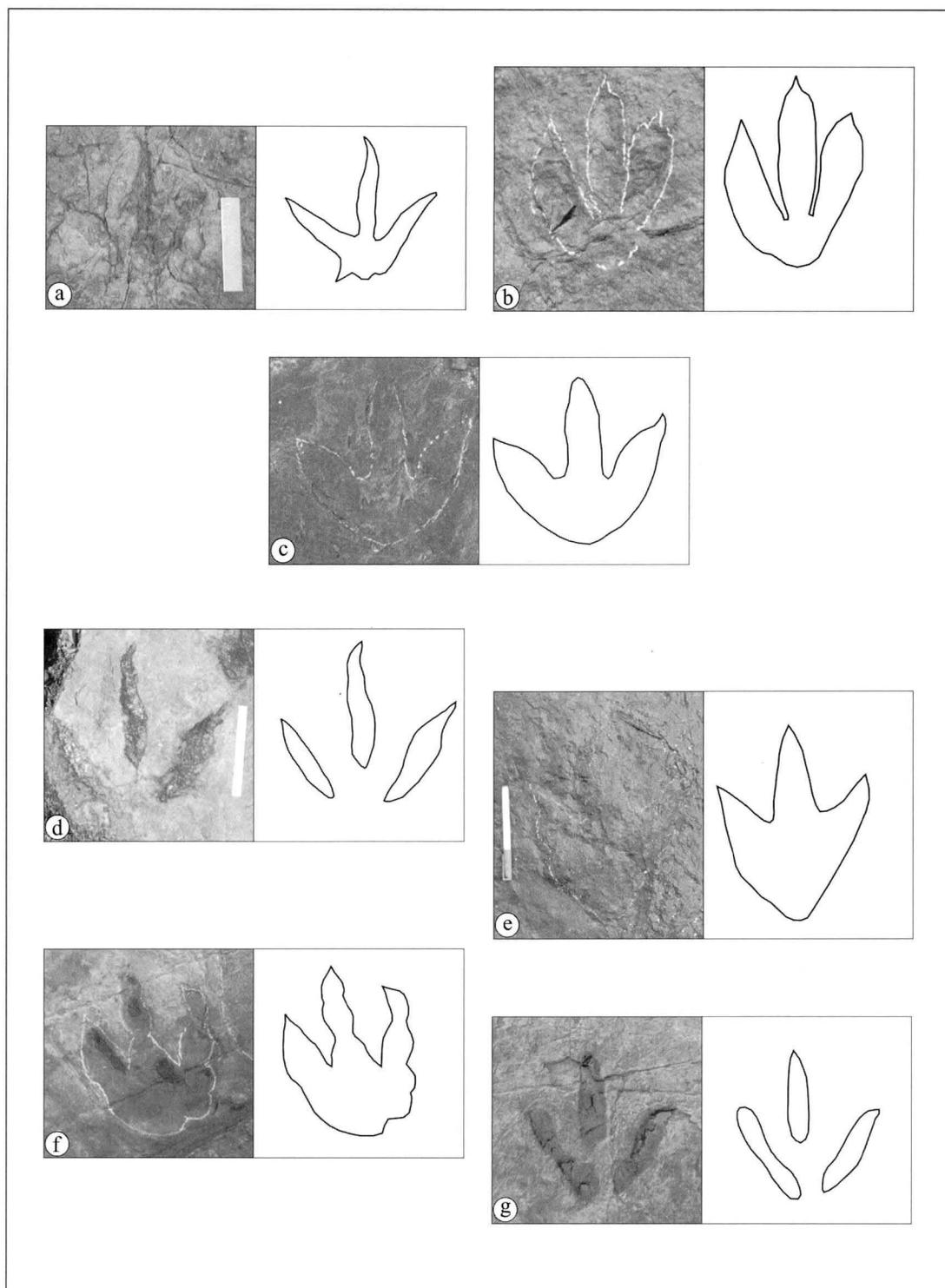


Fig. 13a. Photographs and drawings of various kinds of theropod tracks occurred from Sa-do Island, Yeosu (a: YS1, b: YS2, c: YS3, d: YS4, e: YS5, e: YS6, f: YS7).

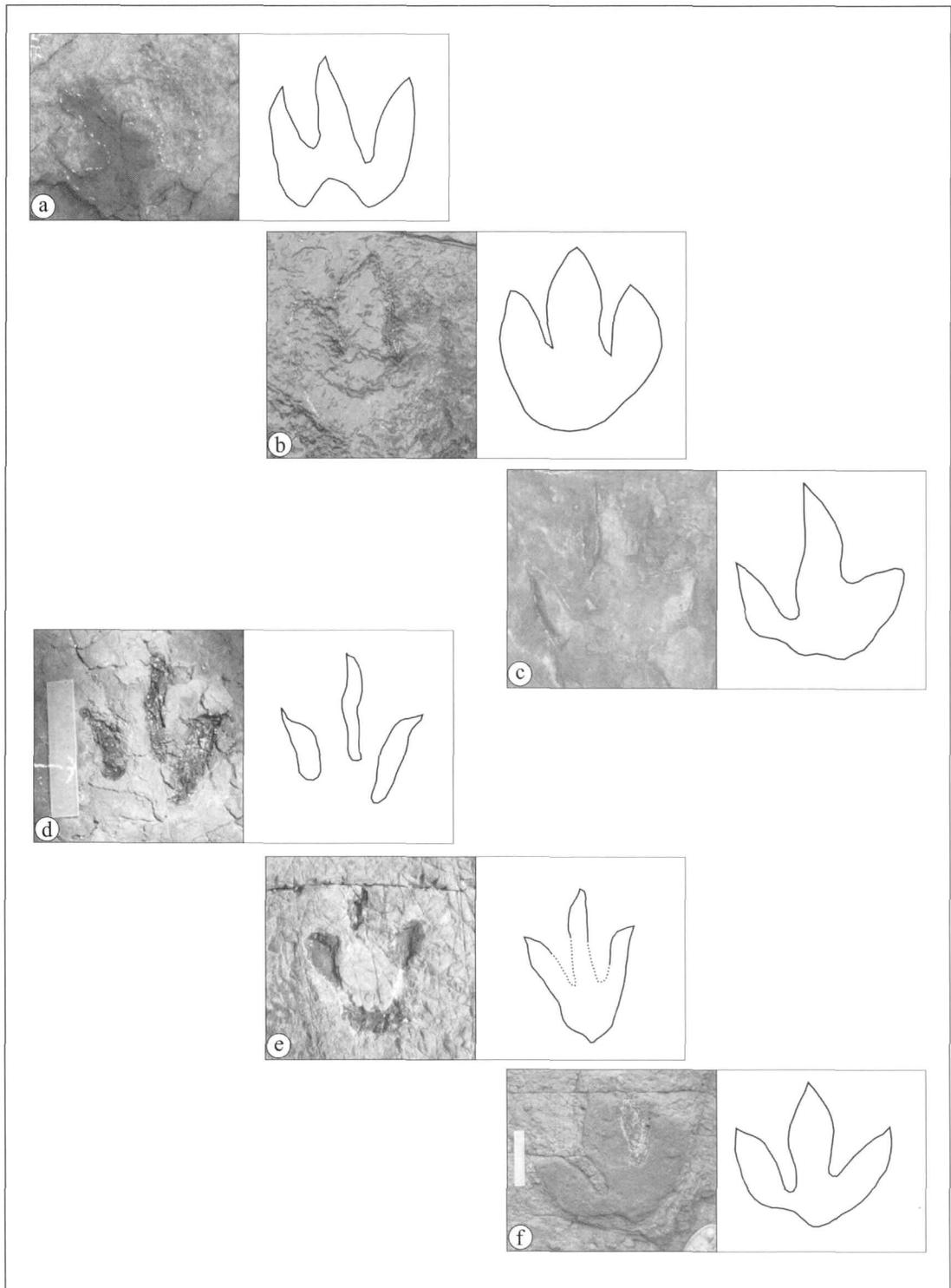


Fig. 13b. Photographs and drawings of various kinds of theropod tracks occurred from Sa-do and Nang-do Island, Yeosu (a:YS8, b:YS9, c:YS10, d:YS11, e:YS12, f:YS13).

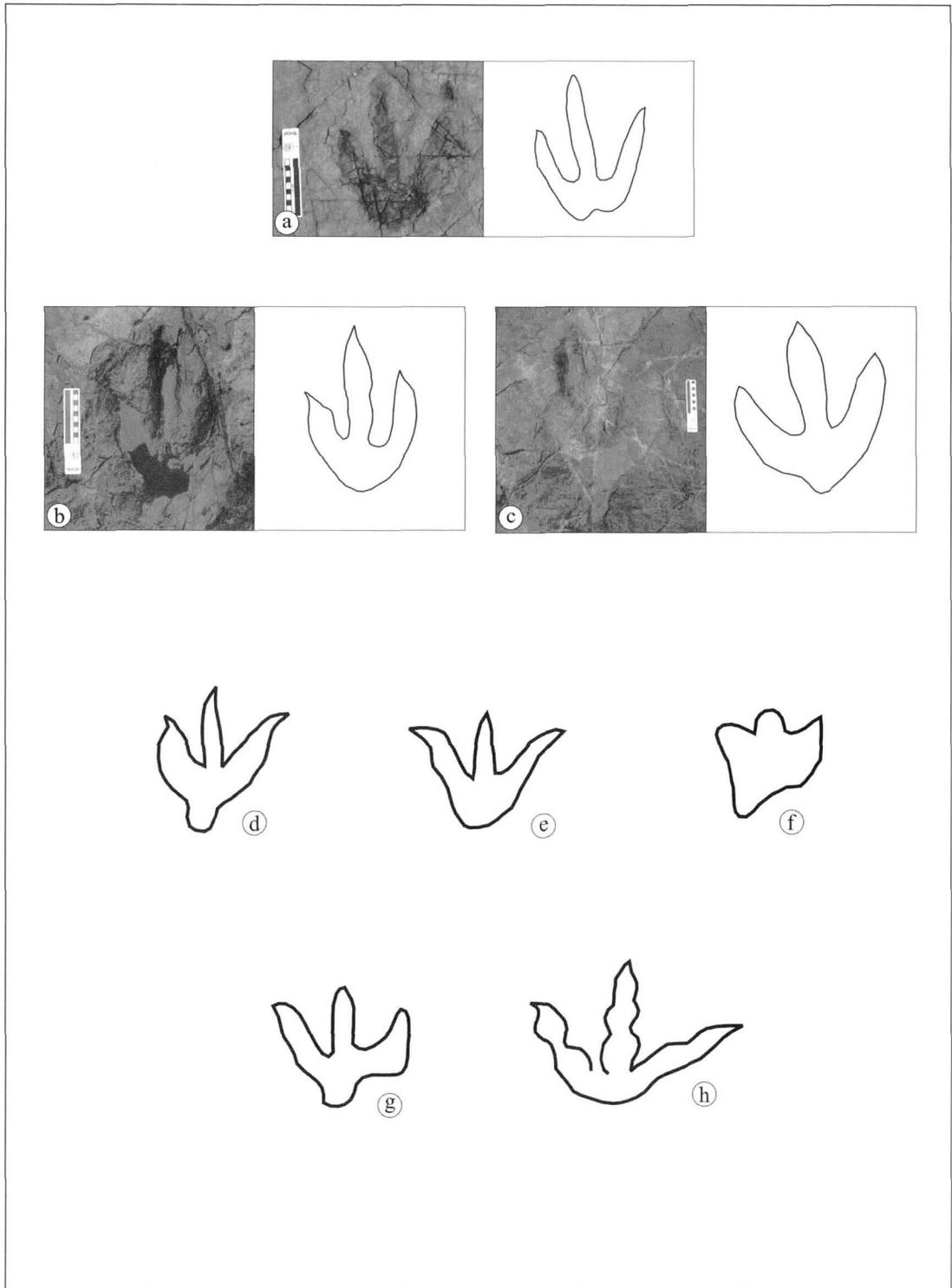


Fig. 14. Photographs and drawings of various kinds of theropod tracks occurred from Goseong (a:GS1, b:GS2, c:GS3, d:GS4, e:GS5, f:GS6, g:GS7, h:GS8)(d-h: modified from Lim, 1990).

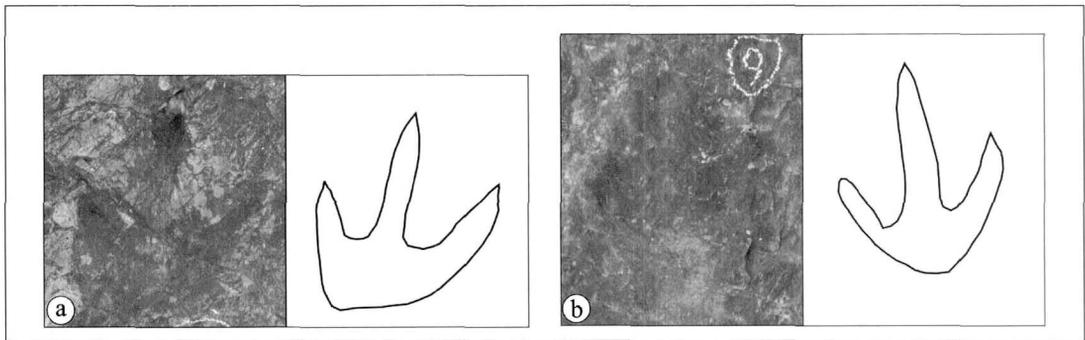


Fig. 15. Photographs and drawings of theropod tracks occurred from Changnyeong site (a:CR1, b:CR2).

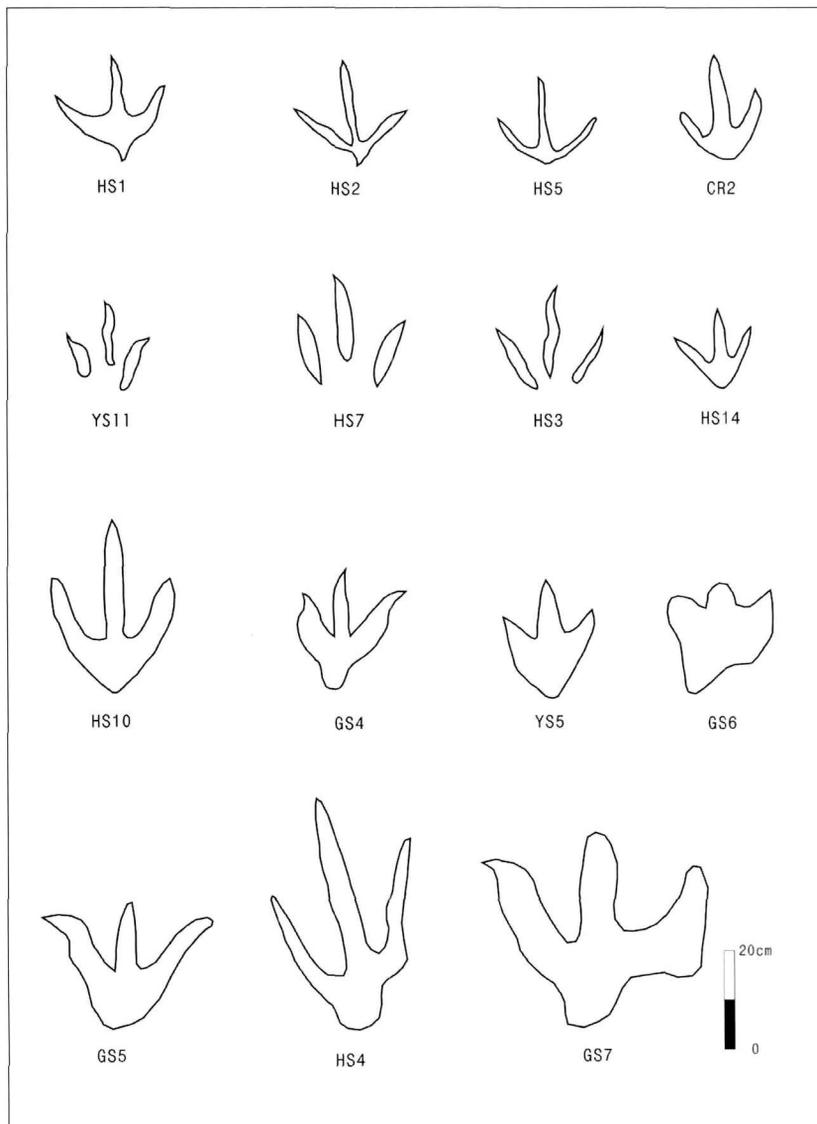


Fig. 16. Various types of theropod tracks from Korea.

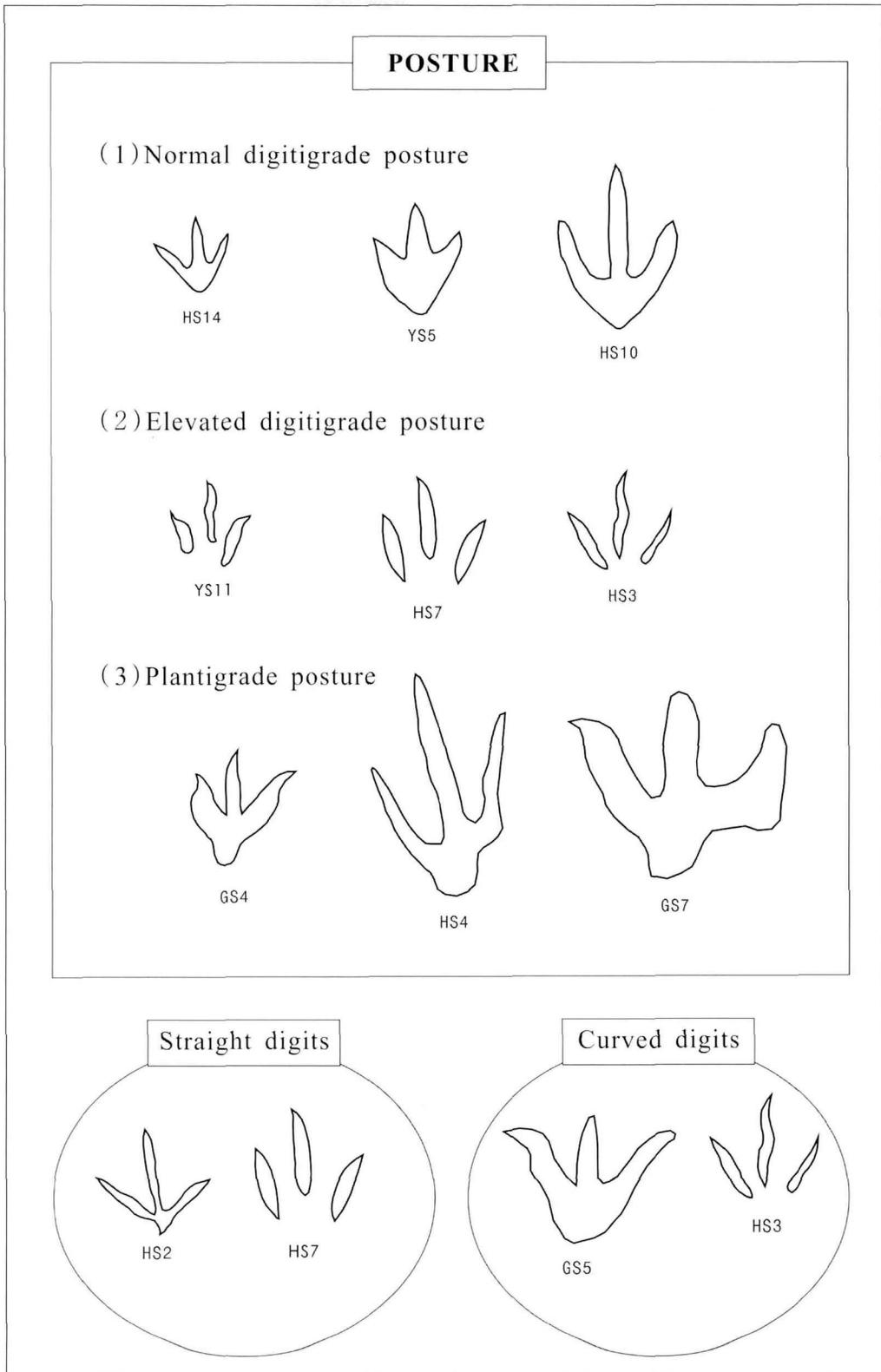


Fig. 17. The classification according to characteristics of posture of theropod tracks from the Cretaceous strata of Korea.

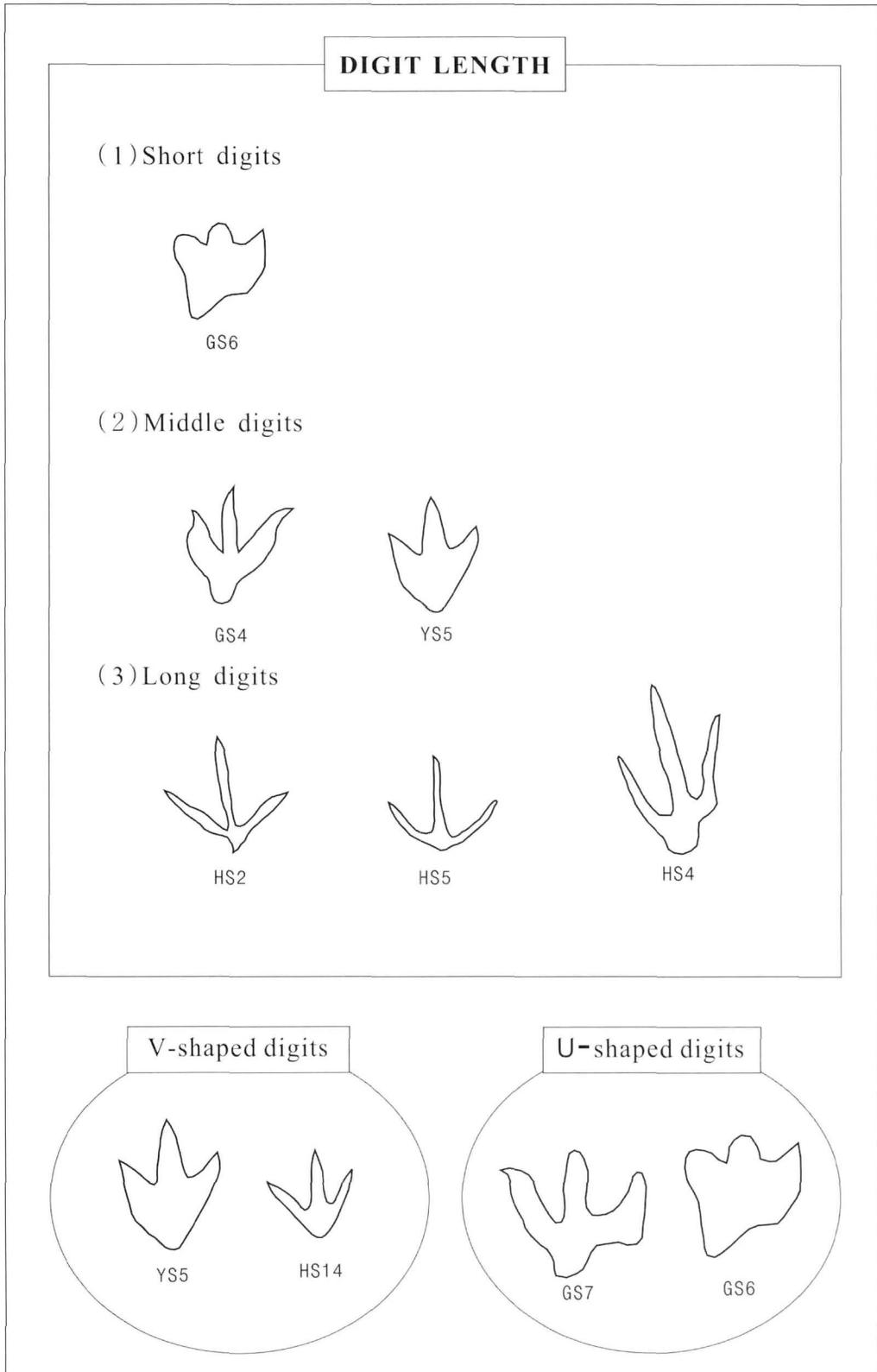


Fig. 18. Type classification according to characteristics of digit length of from the Cretaceous strata of Korea.

96개에 대한 종합적인 형태에 관한 연구를 시도하였다. 네 곳의 화석지에서 산출되는 수각류 발자국의 형태는 대부분이 tridactyl, mesaxonic 형태의 발자국이 주를 이루고 있다. 화순과 여수에서는 I 번 발가락 (hallux)이 연장되어 tetradactyl의 bird-like 형태의 발자국이 산출되기도 한다. 발가락은 long and short toe, straight and curved digit, U-shaped and V-shaped digit 등 다양한 형태로 산출이 되며, heel의 outline 또한 U-shaped, V-shaped 그리고 digit가 차별적으로 찍혀 일부분이 움푹 패인 모양, 경우에 따라 발가락 끝으로만 보행한 자세인 elevated digitigrade posture의 형태도 자주 산출이 된다. 또한 발가락 끝에는 전형적인 수각류의 것으로 인지되는 V-shaped의 crawl mark를 쉽게 확인 할 수가 있었다.

본 연구 결과를 종합해 보면 한반도에서의 수각류 공룡은 digitigrade의 보행 자세를 갖는 tridactyl, mesaxonic 형태의 수각류 발자국들이 주를 이루고 있다. 발자국 길이(FL)가 25 cm 이하인 소형 수각류가 풍부하며, 이는 화순과 여수 주를 이루고 있으며, 고성 지역은 발자국 길이(FL)가 25 cm 이상인 대형 수각류가 많이 나타난다. 발가락의 형태는 straight, tapered and curved digits 등 다양한 특징을 보이며, 드물게 I 번 발가락인 hallux 발자국이 보이기도 한다. 수각류의 특징을 잘 나타내주는 날카로운 형태의 crawl mark를 쉽게 찾아 볼 수 있다.

감사의 글

본 논문을 심사하여 주신 한국교원대학교 김정률 교수님과 한국지질자원연구원 이용남 박사님께 감사를 드린다. 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단 기초과학연구지원사업(KRF-2004-015-C00590)지원에 의해 연구되었다. 이에 감사드린다.

A PRELIMINARY STUDY ON THE CRETACEOUS DINOSAUR PALEOBIOLOGICAL RECONSTRUCTION BASED ON DINOSAUR FOOTPRINTS FROM KOREAN PENINSULA (I): THE TYPE STUDY OF THEROPOD FOOTPRINTS

Sekeon Kwak¹, Min Huh¹, Boseong Kim² and Insung Paik³

¹*Korea Dinosaur Research Center & Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea*

²*Natural History and Culture Museum of Mokpo, Mokpo 530-701, Korea*

³*Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea*

Abstract: This is a research on the types of theropod footprints from the Cretaceous of Korean peninsula. This study focuses specifically on theropod tracks and trackways. For this research four fossil sites with well-preserved theropod trackways in Hwasun, Yeosu, Goseong, and Changnyeong were collected. A total of 96 trackways from these four sites were examined. The majority of the tracks were composed of mainly tridactyl and mesaxonic footprints, and normal digitigrade posture or elevated digitigrade posture. The digits vary in shape with straight, tapered or curved digits, and, though rarely, the first digit, the hallux, can be observed in some cases. Sharp claw marks were also easily observed. The tracks from Hwasun, Yeosu and Changnyeong consist of small-sized theropod's footprints with foot lengths shorter than 25 cm, while those from Goseong consist of large-sized theropod's footprints with foot lengths longer than 25 cm.

Key words: Theropods, Footprints, Types, Cretaceous, Paleobiology

참고문헌

- 허민 외. 2002. 여수 공룡화석지 종합학술조사. 전남대학교 한국공룡연구센터, 350 pp.
- Currie, P. J. and Sarjeant, W. A. S. 1979. Lower Cretaceous dinosaur footprints from the Pease River Canyon, British Columbia, Canada. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 28:103-115.
- Farlow, J. O. 1981. Estimates of dinosaur speeds from a new trackway site in Texas. *Nature* 294:747-748.
- Huh, M., Hwang, K. G., Paik, I. S., Chung, C. H. and Kim, B. S. 2003. Dinosaur tracks from the Cretaceous of South Korea : Distribution, occurrences and paleobiological significance. *The Island Arc* 12:132-144.
- Huh, M. and Hwang, K. G. 2004. Dinosaur footprints from the Cretaceous of South Korea : with reference to Cheollanam-do dinosaur sites. *The Paleontological Society of Korea, Special Publication No.7*, pp. 319-335.
- Huh, M., Paik, I. S., Lockley, M. G., Hwang, K. G., Kim, B. S. and Kwak, S. K. 2006. Well-preserved theropod tracks from the Upper Cretaceous of Hwasun County, southwestern South Korea, and their paleobiological implications. *Cretaceous Research* 27:123-138.
- Huh, M., Paik, I. S., Chung, C. H., Park, J. B. and Kim, B. S. 2001. Dinosaur tracks from Islands in Yeosu, Jeollanam-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea* 37:653-658.
- Hwang, K. G., Huh, M. and Paik, I. S. 2002. Sauropod tracks from the Cretaceous Jindong Formation, Hogyeri, Masan-city. *Journal of the Geological Society of Korea* 38:361-375 (In Korean).
- Lim, S. K. 1990. Trace fossils of the Cretaceous Jindong Formation, Koseong, Korea. Unpublished Ph.D dissertation, Kyungbuk National University (In Korean).
- Norman, D. 1985. *The illustrated encyclopedia of dinosaurs*. Salamander, London. 208 pp.
- Raath, M. A. 1969. A new coelurosaurian dinosaur from the Forest Sandstone of Rhodesia, *Arnoldia Rhodesia* 4:1-25.
- Thulborn, R. A. 1990. *Dinosaur Tracks*. Chapman & Hall, London.