

## 남해 가인리 공룡발자국 화석에 대한 디지털 사진 측량 기법의 활용

공달용<sup>1</sup> · 임종덕<sup>1</sup> · 김정률<sup>2</sup> · 김경수<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>문화재청 국립문화재연구소 자연문화재연구실, 302-834, 대전광역시 서구 만년동 396-1

<sup>2</sup>한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 산 7

<sup>3</sup>진주교육대학교 과학교육과, 660-756, 경남 진주시 신안동 380

### Application of Digital Photogrammetry to Dinosaur Tracks from the Namhae Gain-ri Tracksite

Dal-Yong Kong<sup>1</sup>, Jong Deock Lim<sup>1</sup>, Jeong Yul Kim<sup>2</sup>, and Kyung Soo Kim<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Natural Heritage Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 302-834, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, Korea

<sup>3</sup>Department of Science Education, Chinju National University of Education, Gyeongnam 660-756, Korea

**Abstract:** A number of dinosaur tracksites located at southern coast of the Korean Peninsula have continuously been damaged by sea-waves and weathering. To protect the dinosaur tracksites from the damage permanently and safely, we need to develop conservation programs as well as to collect data documenting the sites. We specifically applied digital photogrammetry to extensively record and document dinosaur tracks in the Namhae Gain-ri tracksite (Natural Monument No. 499) and were able to obtain 3D images data with it. The data of 3D images enable us to produce permanent documentation and preservation of the morphology of dinosaur tracks and tracksites. Moreover the weathering rate on time can be numerically analyzed by periodic measurements of the dinosaur tracksite and comparison of those measurements. The 3D modeling techniques also can be used in various ways including analyzing morphology of tracks, duplicating replicas for museum exhibitions, and posting the results on the Internet homepage.

**Keywords:** dinosaur track, digital photogrammetry, 3D modeling, Cretaceous, Korea

**요약:** 한반도 남해안 일원에 분포하는 공룡발자국 화석산지에는 파도와 조석의 영향을 받아 지속적으로 훼손되고 있다. 이러한 상황에서 공룡발자국 화석의 훼손 및 멸실 등에 대비한 보존 방안과 자료의 확보가 시급하다. 본 연구에서는 천연기념물 제499호 가인리 화석산지의 공룡발자국 화석을 대상으로 디지털 사진 측량 기법을 이용하여 3D 이미지 기록을 획득하였다. 획득한 3D 이미지 자료는 공룡발자국 화석과 화석산지에 대한 형태적 정보의 영구 기록과 보존이 가능하다. 또한 공룡발자국 화석의 변화 양상을 주기적으로 측정하여 그 값을 수치적으로 비교함으로써 시간에 따른 자연적 풍화율을 수치적으로 분석할 수 있다. 이외에도 3D 모델링 기법은 발자국 화석의 형태 분석, 복제 및 전시, 홈페이지 탑재 등을 통하여 다양하게 활용될 수 있다.

**주요어:** 공룡발자국 화석, 디지털 사진 측량 기법, 3D 모델링, 백악기, 한국

## 서론

현재까지 발자국 화석을 포함하여 대부분의 화석들을 기재하고 분류할 때 사용하는 전통적인 연구 방법

중 하나는 연구 대상의 형태적 특징을 사진이나 그림을 이용하여 2차원적으로 기록하고, 이를 바탕으로 글로 표현하는 것이다. 이 방법은 화석의 형태가 비교적 간단하고 납작한 형태를 가지고 있는 경우에는 적절한 방법이라고 판단된다. 그러나 화석의 형태가 복잡하고, 울퉁불퉁한 표면 장식을 가지고 있거나 입체적인 경우에는 이를 표현하고 기록하기 위해서

\*Corresponding author: kimks@cue.ac.kr

Tel: 82-55-740-1248

Fax: 82-55-740-1240

정면도와 측면도 등과 같은 여러 장의 사진이나 그림이 필요할 뿐 만 아니라 글로써도 그 형태적 특징을 표현하는 데에는 한계가 있다.

최근에는 특정 대상에 대해 2차원적인 표현 방법을 넘어서 3차원적으로 대상을 표현하는 기술이 급속도로 발달하였다. 어떤 사물이나 대상의 3차원 영상은 사물의 형상에 대한 많은 정보를 포함하고 있으며, 직접 보거나 만져 보지 않아도 형상에 대한 특징을 보다 정확하게 파악할 수 있고, 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 예를 들면, 영화의 애니메이션과 특수 효과 분야, 산업체에서의 형상 역공학(Chen and Ng, 1997; Chen and Lin, 1997; Lin et al., 1998; Brooks, 2001), Web 3D 및 3차원 사진(유희욱과 장민호, 2003; 임기욱 외, 2003; 원용태 외, 2004), 치의학 및 인공 관절 분야와 같은 의료 분야(Kuroda et al., 1996; Sohmura et al., 2000; Kusnoto and Evans, 2002; Thiruvengkatachari et al., 2009), 의류, 신발, 스포츠/레저 장비 등에 적용되는 3차원 인체 측정 분야(Arridge et al., 1985; Ferrario et al., 1995), 문화유산의 영구적 보존 및 연구 자료 획득을 위한 문화유산 복원 및 데이터베이스 사업 분야(김동현, 1991; 이정현, 2001; 권용무와 신미선, 2001; 한정식과 서만철, 2003; 문호석과 손명호, 2005; 연웅 외, 2005), 암반 사면의 불연속면 및 안정성 평가와 같은 지질 공학 분야(신성모, 2005; 김영경, 2005; Buckley et al., 2008; Sturzenegger and Stead, 2009) 등에 3D 디지털 영상화 기법이 활용되고 있다.

이와 같이 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있는 3D 디지털 영상화 기법은 화석을 연구하는 고생물 분야에서도 활용되어 왔다. 특히 척추고생물학 분야에서는 공룡과 관련되어 영화와 다큐멘터리 등에서 공룡의 모습을 복원하고 활동 모습을 나타내는 데 컴퓨터 그래픽을 이용한 3D 영상화 기법이 적용되었으며(장호석, 2009; 한상호, 2009), 화석 표본의 처리와 연구에서 CT(컴퓨터 단층촬영; computed tomography)를 이용한 3차원 디지털 영상 복원 기법을 활용하였다(이용남 외, 2004). 그러나 무척추고생물학과 생흔 화석학 연구 분야에서는 화석의 형태적 특징 분석을 위해 사진이나 그림과 함께 제한적인 보조 자료로 활용한 몇몇의 경우(Azuma et al., 2002; Kim et al., 2008)를 제외하면 거의 활용된 바가 없다. 최근에 와서야 Huddart et al.(2008)는 사람 발자국 화석에 대한 분석과 보존 및 활용을 위해 3D

레이저 스캐닝 기법을 처음으로 적용하였다.

본 연구에서는 천연기념물 제499호로 지정된 남해 가인리 화석산지에서 수행된 3D 디지털 형상화 작업을 통해 얻어진 자료를 바탕으로 공룡발자국 화석의 분석에 있어서 3D 디지털 형상의 특징 및 3D 디지털 형상화 기법의 적용 가능성과 활용 방안에 대해 논의하고자 한다.

## 연구 지역

본 연구의 대상 지역은 경남 남해군 창선면 가인리 발자국 화석산지이다(Figs. 1 and 2). 이 지역은 1997년 최초로 발자국 화석이 발견되어 경상남도 도 지정 문화재로 지정되었다가 2008년 12월 29일 국가 지정 천연기념물 제499호로 승격되었다.

남해 가인리 화석산지는 중생대 백악기 함안층이 분포하며, 함안층의 중-상부에 해당하는 지역으로서 주로 실트질 미사암, 흑색 셰일, 세립질 내지 조립질 사암, 셰일과 사암의 교호층으로 구성되어 있고, 간혹 석회질 단괴가 관찰된다. 화성 활동에 의한 관입암이 암상의 형태로 산출되며, 이로 인해 화석산지의 암석이 전반적으로 약한 집축 변성 작용을 받았다.

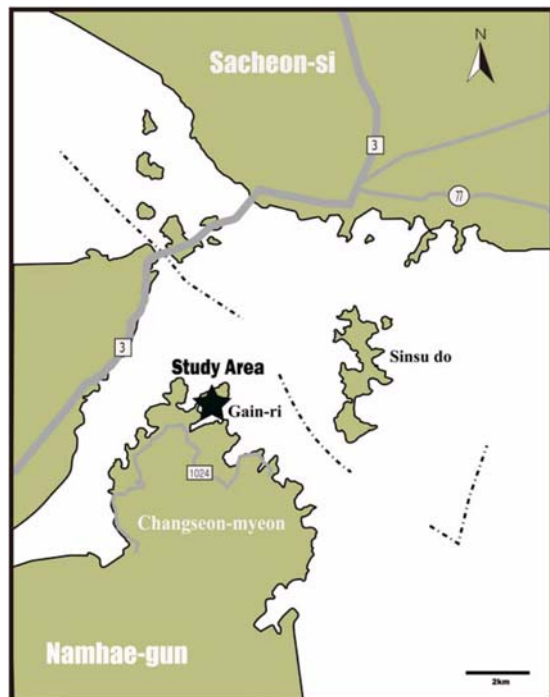


Fig. 1. The location of the study area.



Fig. 2. The scanned study area of the Gain-ri dinosaur tracksite.

크고 작은 사층리와 층리가 잘 발달되며, 연흔, 건열, 빗방울 자국, 목재 화석 파편 등이 공룡발자국 및 새 발자국 화석과 함께 흔하게 산출된다.

이곳에서는 주로 공룡발자국 화석이 산출되는데, 용각류를 비롯하여 조각류와 수각류 발자국 화석, 익룡의 보행렬(서승조, 1997), 가장 오래된 물갈퀴 새 발자국 화석인 *Ignotornis yangi*(Kim et al., 2006), 가장 작은 수각류 공룡발자국 화석인 *Minisauripus cf. zhenshuonani*(Lockley et al., 2008)가 발견되어 기재되었다.

## 연구 방법: 3D 디지털 영상화 기법

### 3D 모델링

3D 모델링은 대상 물체의 모양이나 물성 등의 자료를 컴퓨터 기억장치에 보존하기 위해 수치 데이터 또는 수학 관계식과 같은 데이터로 변환하는 것이다. 컴퓨터로 물체에 대한 수치 데이터를 입력하는 것은 3D 스캐너나 디지털 카메라를 사용하며, 모델링 기법은 와이어프레임 모델링(wireframe modeling), 서피스 모델링(surface modeling)과 솔리드 모델링(solid modeling) 등이 있다(한정식과 서만철, 2003).

사물을 3차원적으로 표현하기 위해 기하학적·공간적 정보를 획득하는 방법은 여러 가지가 있다. 이 방법은 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있는데, 접촉식은 사물의 표면과 직접 접촉하여 센서의 상대 이동값을 변환하여 사물의 3차원 좌표값을 획득하는 방식이고, 비접촉식은 광학적 원리와 이미지 프로세싱을 이용하여 사물과 직접적인 접촉이 없이 사물의 형상 정보를 획득하는 방식이다(최원호, 2003). 접촉

식 스캐너는 접촉 측정자(touch probe)를 이용한 인코딩(encoding) 방식의 접촉식 좌표 측정기로 3차원 좌표측정기(Coordinate Measurement Machine; CMM) 방식과 다관절 로봇팔(Robot Arm) 방식이 있으며, 비접촉식 스캐너는 일정 거리에서 실제 형상에 직접 닿지 않고 데이터를 추출하는 것으로 레이저 스캐너, 백색광 스캐너, 횡단면 스캐너(CT) 및 모아레 방식 스캐너 등이 있다. 이외에도 사물이나 배경을 여러 시점에서 2차원 촬영하여 이미지를 중첩시켜 가시적인 3차원 효과를 얻을 수 있는 이미지 실루엣 방식이 있다(최원호, 2003).

### 디지털 사진 측량 기법

본 연구에서는 발자국 화석에 대한 3D 디지털 영상을 얻기 위해서 디지털 사진 측량 기법(digital photogrammetry)을 이용하였다. 디지털 사진 측량은 사진을 찍어서 그 자료로부터 3D 좌표 및 형상을 만들어내는 기술이다. 기본적인 원리는 삼각 측량의 원리를 이용한 것인데, 촬영 각도를 달리한 2장 이상의 사진을 이용하면 카메라 위치와 피사체의 위치가 해석되며, CAD 도면에도 활용할 수 있는 데이터를 얻을 수 있다(최광남, 2001). 이와 같은 방법은 3D 레이저 스캐너와는 달리 강한 태양빛 아래에서도 사용할 수 있다는 장점을 가진다.

디지털 사진 측량 기법을 통하여 3D 디지털 영상을 얻기 위해서는 캘리브레이션된 디지털 카메라와 데이터 처리용 소프트웨어가 필요하다. 디지털 카메라는 니콘사의 D200 모델을 사용하였으며, 영상 처리용 소프트웨어는 ShapeMetriX 3D를 사용하였다. 3D 이미지를 생성하기 위해서는 측정하고자 하는 면을 바라보고 2군데에서 촬영(stereoscopic image pair)하여 소프트웨어적으로 합성하면 수 백 만개의 3차원 포인트 클라우드(point cloud)가 3차원 이미지와 함께 자동으로 생성된다(Fig. 3).

이 기법을 이용하여 스캐닝을 하면 암반면, 사면 등 지형의 주향 경사 방향 및 지반암반에 필요한 정보를 손쉽게 얻을 수 있다. 3차원 이미지를 생성한 후 측량자(range pole)의 길이를 주거나 혹은 최소 3점 이상의 컨트롤 포인트(측량 좌표)를 입력하면 실제 치수 및 방위를 알 수 있다. 구체적인 측정 방법은 다음과 같다.

- 1) 측정 대상물을 가능하면 직각으로 좌우에서 두 번 촬영한다(Fig. 3).



Fig. 3. Stereoscopic image pair of a dinosaur track.



Fig. 4. 3D images included point cloud after superimposed stereoscopic image pair of Fig. 3.

- 2) ShapeMetriX3D 소프트웨어로 이미지를 전송하면 자동으로 포인트 클라우드가 있는 3D 이미지를 생성한다(Fig. 4).
- 3) 스케일바(혹은 측량 데이터)로 기준 거리(혹은 좌표)를 입력한다.
- 4) 불필요한 부분은 데이터의 용량을 감안하여 절단하여 삭제한다.
- 5) 생성된 3D 이미지를 VRML 혹은 DXF 등 필요한 포맷으로 변환한다.
- 6) 추출된 3D 포인트 데이터를 이용하여 등고선(contour mapping) 및 깊이에 따른 색(depth coloring)을 입힌다.
- 7) VRML로 들어온 데이터를 웹상에서 볼 수 있도록 고품질용 동영상으로 편집한다.
- 8) ShapeMetrix 3D 프로그램을 이용한 3D 입체 영상 화면을 구현한다.
- 9) 플래시 작업을 통하여 화석산지에 대한 전반적인 데이터를 볼 수 있도록 DB화하여 홈페이지에 링크시킨다.

### 3D 디지털 이미지 획득 결과

디지털 사진 측량 기법을 이용하여 연구 지역에서 용각류 발자국 화석 13개를 포함하여 모두 20개의 발자국 화석에 대한 3D 디지털 영상 자료를 획득하였다.

20개의 발자국 화석을 캘리브레이션된 디지털 카메라를 이용하여 서로 다른 지점에서 촬영하여 얻은 2장의 입체 이미지(stereoscopic image pair)를 ShapeMetriX 3D 소프트웨어를 이용하여 합성하였다. 이미지 합성 결과, 각각의 발자국 화석에 대해 30,764 - 49,580개의 포인트 클라우드가 생성되었으며, Range pole을 이용하여 좌표를 입력하고 3D 이미지 파일을 생성하였다(Fig. 5). 3D 이미지 파일의 포인트 데이터를 추출하여 등고선을 작성하였고 깊이에 따른 색을 입혔다(Fig. 6). 생성된 3D 이미지를 VRML로 변환한 데이터를 웹상에서 볼 수 있도록 동영상으로 편집하였으며(Fig. 7), 마지막으로 ShapeMetriX3D 프로그램을 이용하여 3D 입체 영상 화면을 구현하고, 플래시 작



Fig. 5. The original photograph of the sauropod dinosaur footprint (left) and the 3D digital image included the point cloud (right).

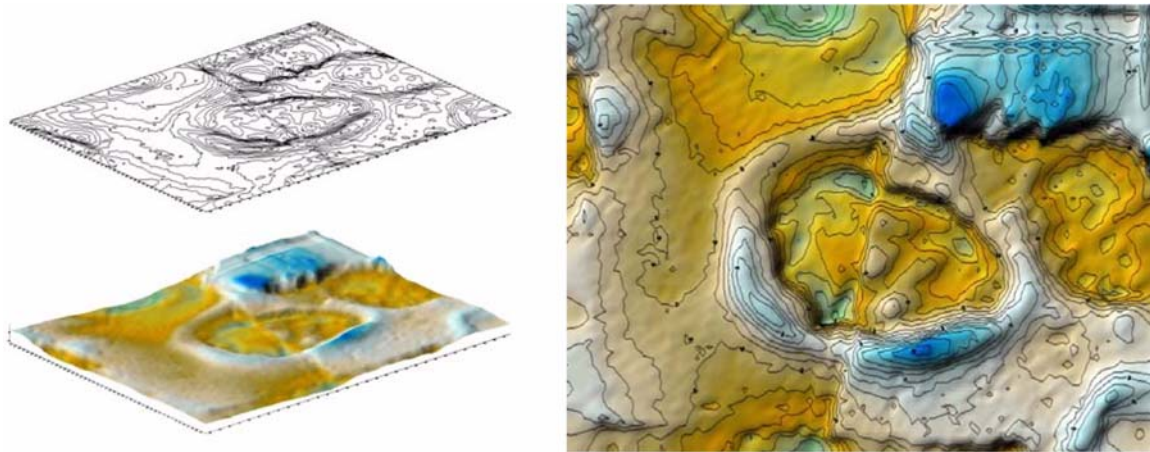


Fig. 6. Contour and colored maps.

업을 통하여 화석산지에 대한 소개와 함께 발자국 화석의 입체 영상 화면을 링크시켰다(Fig. 8).

### 논의 및 활용

#### 디지털 사진 측량 기법과 3D 스캐닝 시스템

사물의 3차원 형상을 디지털화하여 컴퓨터에 수치 데이터로 저장할 수 있는 3D 모델링 기법은 상당한 수준에 이르렀다. 최근에는 3D 디지털 이미지를 얻기 위한 장치로 대부분 3D 레이저 스캐너(3D laser scanner)를 많이 활용하고 있다. 레이저 스캐너는 크게 삼각법(triangulation method)과 주행 시간법(time of flight)의 2가지 방법을 사용하고 기본적인 구성으로 레이저 발생부와 레이저를 반사하는 반사판이 있으며, 방법에 따라 CCD나 레이저 수신부와 시간측정 장치가 장착되어 있다(김동현, 1991; 김성삼, 2003). 레이저 스캐너는 좌표점이나 선과 같은 데이터를 얻

기 위해 저밀도의 적색 레이저를 사용하는데, 스캐너의 광원인 레이저는 라인단위(line-of-sight)로 측정된다. 레이저 스캔은 광대역 스캐너(예, Leica Scanstation, Leica HDS6000 등)와 정밀 스캐너(예, Konica Minolta Vivid9i)를 이용하여 화석산지를 포함하는 주변 지형과 개별 발자국들에 대해 3차원으로 스캔 데이터를 구축하게 되고, 이들 3차원 스캔 데이터들은 후처리 과정을 거쳐 다양한 형태의 3차원 모델 데이터(3차원 모델링, 등고선 모델, 컬러맵 등)로 다시 제작된다. 이러한 레이저 스캐너는 다른 어떤 3D 측량보다도 정밀도가 높은 장점이 있다. 반면, 정밀 스캐너의 경우 대부분 실내에서 사용할 수 있도록 설계되어 있기에 야외의 태양광 아래에서는 정밀도가 떨어지며 정확한 3D 이미지를 생성하지 못한다. 따라서 정밀 스캐너를 이용한 작업은 태양의 가시광선이 없는 저녁이나 새벽 시간을 이용하여 작업이 진행되는 어려움이 있다. 또한 야외의 화석산지에서 작

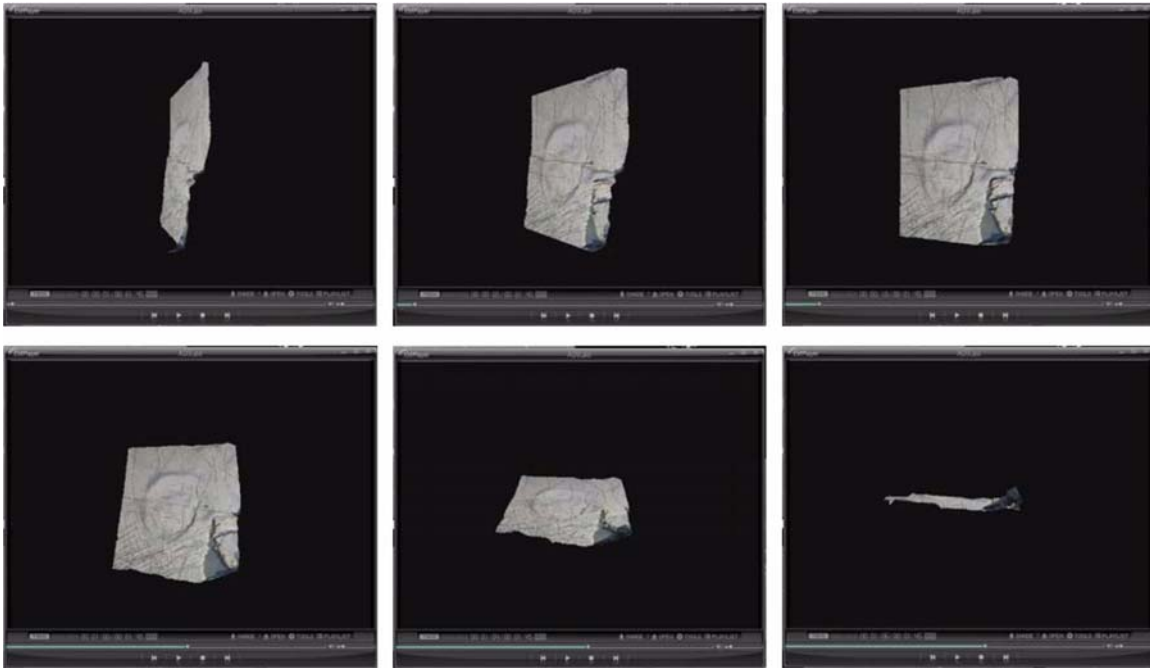


Fig. 7. 3D animation of the sauropod dinosaur footprint.

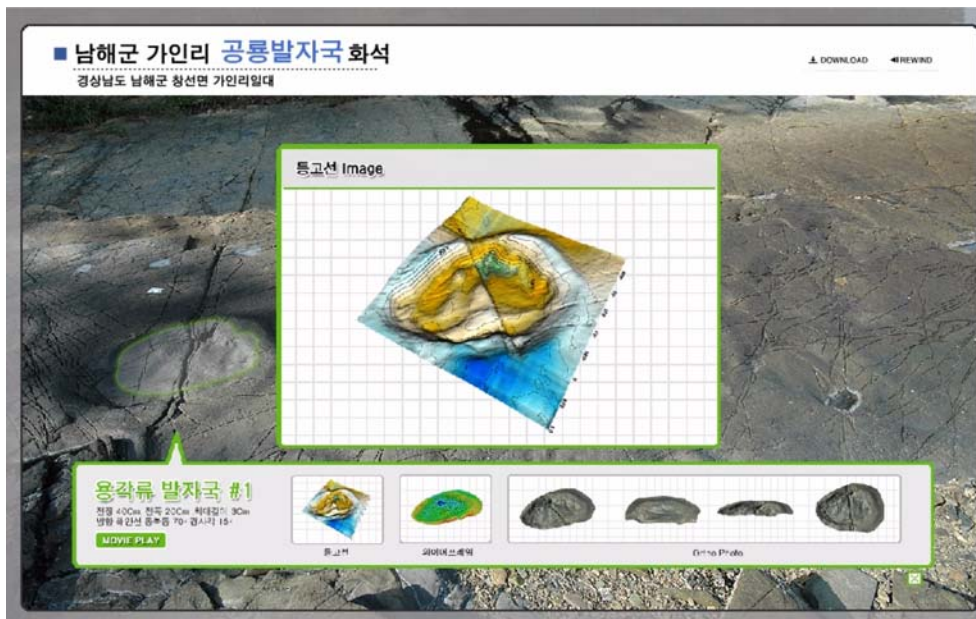


Fig. 8. A scene in flash using 3D digital images.

업을 실시하기 위해서는 장비를 운반하여야 하는데, 기본적으로 스캐너, 삼각대, 노트북 컴퓨터 및 전원을 공급할 수 있는 발전기를 구비하여야 한다. 이들 장비는 일반적으로 부피가 크며, 상당히 무거운 장비

로 운반하기가 어려운 단점이 있다. 또한 아직까지는 고해상도 3D 레이저 스캐너의 가격은 수천만 원 이상으로 상당히 고가이다.

반면에 디지털 사진 측량 기법은 레이저 스캐너에



Fig. 9. Comparison a photography (left) with a 3D digital image (right).

비해서 정밀도가 떨어지는 단점을 지니고 있다. 반면에 캘리브레이션된 카메라, 삼각대 또는 지지대, 좌표 설정용 스케일 바만 있으면 3D 디지털 이미지를 얻을 수 있어, 장비가 간편하여 야외의 거친 환경에서도 사용이 쉽고, 상대적으로 저렴하며 태양광과 같이 강한 햇빛에도 큰 영향을 받지 않아 주간에 작업이 가능하다.

측정하고자 하는 화석의 종류가 어떤 것이냐에 따라 장비는 선택적으로 활용되어야 한다. 예를 들면, 공룡발자국 화석과 같이 대상 물체의 크기가 큰 경우에는 디지털 사진 측량 기법을 통해서도 원하는 정도의 정밀도와 결과물을 얻을 수 있지만, 새 발자국 화석과 같이 발자국 화석의 인상이 얇게 찍힌 경우는 보다 높은 정밀도를 가진 3D 레이저 스캐너를 적용하여야 한다.

### 3D 디지털 이미지 형태 분석

야외에서 발자국 화석이나 기타 생흔 화석을 연구하는 전통적인 방법은 화석 표본의 직접 채취, 사진 촬영, 스케치, 실리콘이나 석고 또는 수지(resin)를 이용한 발자국 화석의 주형 제작 등의 방법이 있다. 이와 같은 방법은 연구 대상인 발자국 화석에 대한 보다 정확한 형태를 파악하고, 화석 표본 또는 모형을 확보함으로써 추가적인 연구에 대비하기 위해서 실시된다. 그러나 전통적인 화석 표본 또는 모형의 확보는 발자국(또는 인상)의 깊이, 퇴적물의 특성 및 원래 발자국의 손상 정도를 고려하여야 한다. 가장 이상적인 경우는 화석 표본 자체를 확보하는 것이다. 화석 표본을 직접 채취할 수 있다면 보다 자세한 관찰 및 측정이 가능하며, 손쉽게 연구를 수행할 수 있

고, 추가적인 연구에 대비할 수 있다. 그러나 대부분의 공룡발자국 화석은 상당히 크고, 일반적으로 개개의 발자국들이 보행렬을 이루고 있는 경우가 많으며, 화석산지를 훼손하여 표본을 직접 채취하는데 상당한 제한점이 따른다. 또한 사진 촬영이나 스케치의 경우는 발자국 화석 표면의 2차원적인 형태만 기록할 수 있기 때문에 발자국의 깊이와 발바닥의 형상 등과 같은 3차원적인 정보를 표현하기가 어렵다. 마지막으로 실리콘, 석고 또는 수지를 이용한 주형 제작 방법은 발자국 화석의 분포와 형태를 상당 부분 그대로 모방하여 실험실에서 분석과 연구에 유용하게 활용될 수 있다. 하지만 모형을 제작할 때 사용되는 거의 모든 재료들은 발자국 화석에 크고 작은 손상을 유발한다.

발자국 화석에 대한 3D 디지털 이미지를 획득하는 경우에는 1) 화석산지를 훼손하지 않고도 발자국 깊이와 폭 등의 측정 정보와 보행렬 분석을 통한 행동학적 정보 등의 필요한 정보를 얻을 수 있으며, 2) 발자국 화석의 깊이에 따라 등고선을 표현하거나 색을 입힘으로써 3차원적인 정보를 한 눈에 알 수 있게 표현할 수 있고, 3) 주형 제작에 의한 발자국 화석의 손상을 방지할 수 있다. 특히 3D 이미지에 등고선이나 색을 입혀 깊이를 표현함으로써 발자국 화석의 보다 정확한 외형을 파악할 수 있으며, 발바닥 형태에 대한 정보를 얻을 수 있다(Figs. 5 and 6). Fig. 5에서 관찰할 수 있는 바와 같이 용각류 발자국 화석 사진에서는 발자국의 윤곽이 뚜렷하게 나타나지만 용각류의 발톱과 같은 세부적인 구조는 표현하기가 어렵다. 반면에 Fig. 6과 같이 깊이에 따른 등고선과 색을 표현하여 나타낸 경우는 발자국 외형뿐만

아니라 발자국 내부에 보존되어 있는 발톱 자국까지도 깊이와 윤곽의 표현이 가능하다. 이를 통해 발자국의 형태를 보다 정확하게 분석할 수 있다.

다만, 발자국 화석에 상부 퇴적물이 충전되어 있거나 과도한 침식을 받아 발자국의 형태가 훼손된 경우에는 정확한 분석이 어렵다. 용각류 발자국 화석 상부에 퇴적물이 제거되지 않은 상태로 남아 있는 경우(Fig. 9-left)는 실제로 육안으로는 퇴적물의 존재를 알 수 있고 그것을 고려하여 형태를 알아낼 수 있지만, 3D 이미지만으로 관찰하였을 때에는 발자국의 외형과 깊이에 대한 정보를 잘못 판단할 수 있다(Fig. 9-right). 따라서 이와 같은 경우는 사진과 3D 이미지를 함께 사용하여야 정확히 분석할 수 있다.

### 3D 디지털 이미지의 활용

화석산지의 발자국 화석들은 자연 상태에서는 시간이 지남에 따른 풍화와 침식 작용을 피할 수 있는 방법이 없다. 특히 우리나라의 경우에는 많은 주요 발자국 화석들이 해안가에 위치하고 있어 파도와 해수의 풍화와 침식 작용에 노출되어 있는 것이 사실이다. 이 발자국 화석들을 모두 안전한 곳으로 이동시킬 수 있는 현실적인 방법이 없을 뿐만 아니라 많은 인력과 비용이 필요하며, 화석 채취 및 운반 과정에서의 손상이 우려된다. 화석을 채취하여 안전한 곳으로 운반하거나 모형 복제품을 제작하였다고 하더라도 분실의 위험이 있으며, 화석을 관찰하기 위해서는 직접 보관 장소를 방문해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 디지털 사진 측량 기법을 이용하여 가인리 화석산지의 발자국 화석을 대상으로 컴퓨터 디지털 데이터로 변환하여 저장하였다. 이 자료는 ShapeMetriX3D 소프트웨어를 통하여 3D 이미지로 형상화하였고, 분석을 위해 등고선과 색을 입혀 시각화하였다. 발자국 화석에 대한 3D 데이터는 단지 컴퓨터에서 입체적인 형상을 나타내주는 것만이 아니라 디지털 데이터로서의 가치를 함께 가진다. 일반적으로 발자국 화석의 기재와 표본 확보를 위해서는 실제 표본을 샘플링하거나 모형을 제작하여왔다. 이에 더하여 3D 모델링 기법은 사물의 형상을 수치 데이터인 포인트 클라우드로 컴퓨터에 저장함으로써 필요할 때마다 언제든지 다시 볼 수 있는 새로운 유형의 화석 표본 획득 방법이라고 할 수 있다. 이와 같이 사물의 형상을 수치 데이터로 저장하는 경우에는 자료의 복제와 공유가 용이하고, 언제든지 컴퓨터로 볼

리와 발자국의 형상을 살펴볼 수 있으며, 영구적으로 발자국 화석의 형상을 보존할 수 있는 장점이 있다. 또한 필요한 경우에는 3차원 프린터를 이용한 급속 모형 제작 기법(Rapid-Prototyping technology)을 이용하여 실물 복제품을 원하는 대로 만들어낼 수 있고, 이를 박물관 등에서 공공의 목적으로 전시할 수 있다. 그리고 3D 디지털 정보를 이용하여 플래시 자료를 제작하거나 3D 시각화를 통하여 웹상에서 가상 현실 박물관을 운영하거나 홍보 및 교육 자료로도 활용할 수 있다(Figs. 7 and 8).

## 결론 및 전망

디지털 사진 측량 기법을 이용하여 경남 남해군 창선면 가인리의 천연기념물 제499호 가인리 화석산지의 발자국 화석에 대한 3D 디지털 이미지 형상을 획득하고, 이를 홈페이지에 탑재하여 홍보 및 교육용 자료로 활용할 수 있도록 자료를 제작하였다.

발자국 화석에 대한 3D 디지털 이미지 형상화 작업은 형상 정보를 수치 데이터로 저장함으로써 화석의 실물 표본을 직접 샘플링하지 않아도 컴퓨터 데이터 형식으로 영구적으로 보존할 수 있다. 저장된 수치 데이터를 이용하여 3D 이미지를 생성해내고 이를 통해 발자국 화석의 깊이를 잘 보여주는 등고선 모델 및 수치범위에 컬러 데이터를 대응시켜 수치의 분포와 변화를 쉽게 확인 할 수 있는 컬러램프(color ramp) 작업을 수행하여 발자국 화석의 형상 정보를 정확히 표현하였고 이를 통해 형태를 분석할 수 있다.

이에 더하여 3D 디지털 수치 정보는 필요한 경우 3차원 프린터를 이용하여 실물을 복제하여 전시 등에 활용할 수 있고, 동영상 및 플래시 자료로 가공하여 홈페이지에 탑재함으로써 3D 시각화, 교육 및 홍보에 활용 가능하다.

디지털 사진 측량 기법을 포함한 3D 스캐닝 시스템은 발자국 화석의 연구와 전시 및 교육에 있어서 유용한 점이 많지만, 아직까지 대체적으로 많은 비용이 소요되고 발자국 화석에 대한 전문성과 함께 숙련된 스캐닝 작업 능력과 같은 전문성이 요구된다. 그러나 기술의 발전과 함께 3D 스캐닝 시스템은 소요 비용이 줄어들고 있으며, 점차 적용 영역이 확대되어 가고 있다. 이에 따라서 화석을 연구하는 고생물학 분야에서도 대형 척추동물 화석의 골격과 삼엽충, 이매패류 및 원족류와 같은 무척추동물 화석의



연구 분야에서도 3D 디지털 이미지의 적용이 확대될 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소의 「천연기념물 공룡발자국 3D 기록화 사업」에 의해 수행되었다. 논문을 세심하게 심사하여 주신 공주대학교 김중헌 교수님과 익명의 심사위원님 두 분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 권용무, 신미선, 2001, 웹 기반 3차원 가상 문화재 데이터베이스. 데이터베이스 연구, 17, 97-108.
- 김동현, 1991, 3차원 컴퓨터 그래픽 기술을 이용한 문화재 복원. 문화재, 24, 1-28.
- 김성삼, 2003, 줌 렌즈 CCD 카메라를 이용한 3차원 복원 정확도 평가. 한국정보과학회 공동 춘계학술대회, 369-376.
- 김영경, 2005, 지상 레이저 스캐닝 시스템을 활용한 암반사면과 댐체의 특성 및 안정성 평가에 관한 연구. 배재대학교 석사학위논문, 125 p.
- 연 용, 임형진, 김윤수, 오성환, 이정엽, 안태욱, 김광희, 나정희, 홍혜진, 이유안, 2005, 중요 동산 문화재 입체 영상화(3D) 사업 결과 보고서. 예맥출판사, 서울, 148 p.
- 이용남, 김유봉, 김복철, 이윤수, 2004, 남해안 화석지 조사·연구 보고서. 문화재청, 대전, 125 p.
- 임기욱, 황대훈, 이철환, 김현빈, 이세훈, 백영태, 사이맥스 기술연구소, 2003, 가상 현실과 VRML. 정일 출판사, 서울, 329 p.
- 서승조, 1997, 남해군 창선면 함안층산 공룡 및 익룡족인 화석. 진주교육대학교 과학교육연구, 23, 1-10.
- 문호석, 손명호, 2005, DSS/지능형 시스템 2: 문화재 원형 복원 시스템 구축(영상처리와 컴퓨터 그래픽 기술응용을 중심으로). 한국경영정보학회 춘계학술대회, 907-911.
- 신성모, 2005, 3D Laser Scanner를 이용한 암반사면 불연속면 분석에 관한 연구. 배재대학교 석사학위논문, 81 p.
- 원용태, 서덕원, 김중서, 박훈성, 2004, 이미지 기반 모델링과 3차원 스캐닝에 관한 연구. 공학연구, 35, 109-112.
- 유희욱, 장민호, 2003, 3D scanner를 이용한 디지털 콘텐츠 생성. 정보처리학회지, 10, 96-102.
- 이정현, 2001, 문화재 3차원 디지털 데이터베이스 구축. Cad and Graphics, 2001년 12월호, 54-57.
- 장호석, 2009, MBC 공룡의 땅 CG. 비디오플러스, 2009년 3월호, 198-201.
- 최광남, 2001, 문화재의 과학적 보존: 유물보존과 박물관 환경관리. 대원사, 서울, 230 p.
- 최원호, 2003, 3차원 스캐닝 시스템을 이용한 디지털 문화재 구축 연구-3D Scanning System을 중심으로. 상명대학교 석사학위논문, 109 p.
- 한상호, 2009, EBS 다큐멘터리 한반도의 공룡. 신문과 방송, 2009년 2월호, 102-106.
- 한정식, 서만철, 2003, 사진을 이용한 도전리 마애불 3D Modeling. 문화재과학기술, 2, 65-72.
- Arridge, S., Moss, J.P., Linney, A.D., and James, D.R., 1985, Three dimensional digitization of the face and skull. Journal of Maxillofacial Surgery, 13, 136-143.
- 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.
- Buckley, S.J., Howell, H.D., Enge, H.D., and Kurz, T.H., 2008, Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations. Journal of the Geological Society, 165, 625-638.
- Chen, L.C. and Lin, G.C.I., 1997, An integrated reverse engineering approach to reconstructing free-form surfaces. Computer Integrated Manufacturing Systems, 10, 49-60.
- Chen, Y.H. and Ng, C.T., 1997, Integrated reverse engineering and rapid prototyping. International Journal of Computers Industrial Engineering, 33, 481-484.
- Ferrario, V.F., Sforza, C., Serrao, G., and Miani, A.Jr., 1995, A computerized non-invasive method for the assessment of human facial volume. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 23, 280-286.
- Huddart, D., Bennett, M.R., González, S., and Velay, X., 2008, Analysis and preservation of Pleistocene human and animal footprints: An example from Toluquilla, Valsequillo Basin (Central Mexico). Ichnos, 15, 232-245.
- Kim, J.Y., Kim, K.S., Lockley, M.G., and Matthews, N., 2008, Hominid ichnotaxonomy: An exploration of a neglected discipline. Ichnos, 15, 126-139.
- Kim, J.Y., Kim, S.H., 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.
- Kuroda, T., Motohashi, N., Tominaga, R., and Iwata, K., 1996, Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 110, 365-369.
- Kusnoto, B. and Evans, C.A., 2002, Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 122, 342-348.
- Lin, A.C., Lin, S.Y., and Fang, T.H., 1998, Automated sequence arrangement of 3D point data for surface fitting in reverse engineering. Computers in Industry, 35, 149-173.
- Lockley, M.G., Kim, J.Y., Kim, K.S., Kim, S.H., Mat-

- sukawa, M., Rihui, L., Jianjun, L., and Yang, S.Y., 2008, *Minisauripus*-the track of a diminutive dinosaur from the Cretaceous of China and South Korea: Implications for stratigraphic correlation and theropod foot morphodynamics. *Cretaceous Research*, 29, 115-130.
- Sohmura, T., Kojima, T., Wakabayashi, K., and Takahashi, J., 2000, Use of an ultra high-speed laser scanner for constructing three-dimensional shapes of dentition and occlusion. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 84, 345-352.
- Sturzenegger, M. and Stead, D., 2009, Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106, 163-182.
- Thiruvengkatachari, B., Al-Abdallah, M., Akram, N.C., Sandler, J., and O'Brien, K., 2009, Measuring 3-dimensional tooth movement with a 3-dimensional surface laser scanner. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135, 480-485.
- Brooks, O.J., 2001, 디지털 복제와 3D Photography 분야의 현재와 미래. *Cad and Graphics*, 12월호, 50-69.

---

2010년 3월 4일 접수  
2010년 3월 16일 수정원고 접수  
2010년 3월 25일 채택