

## 천연기념물 화석산지의 3차원 디지털 기술 적용

### Application of 3D Digital Documentation to Natural Monument Fossil Site

공달용\*, 임종덕\*, 원광연\*\*, 안재홍\*\*, 김경수\*\*\*

문화재청 국립문화재연구소\*, 한국과학기술원 문화기술연구센터\*\*, 진주교육대학교 과학교육과\*\*\*

Dal-Yong Kong(dykong@korea.kr)\*, Jong-Deock Lim(dinotime@paran.com)\*,  
Kwang-Yeon Wahn(wohn@kaist.ac.kr)\*\*, Jae-Hong Ahn(jaehong.ahn@gmail.com)\*\*,  
Kyung-Soo Kim(kimks@cue.ac.kr)\*\*\*

#### 요약

국내의 수많은 화석산지 중 20곳이 국가지정문화재 천연기념물로 지정되어 보호 및 보존되고 있다. 천연기념물 화석산지 중 많은 지역이 인위적인 훼손과 함께 자연적 풍화·침식이 활발한 해안가에 위치하여 훼손이 진행되어 점차 원형을 잃어가고 있다. 따라서 이들에 대한 원형 보존 및 원형 기록 자료의 확보가 시급히 필요하다. 본 연구에서는 천연기념물 제394호 해남 우항리 공룡·익룡·새 발자국 화석산지에 대한 항구적인 원형 기록 자료의 확보를 위하여 3차원 디지털 기술을 적용하였다. 이를 통해 이 지역의 2개 지점에 대한 정밀 기록 작업을 완료하였고, 정확도가 높은 분포도를 작성하였으며, 앰비언트 어클루전(Ambient occlusion) 렌더링 기법에 의한 렌더링 기법을 적용하여 발자국 화석에 대한 보다 정확한 분석 자료를 확보하였다. 발자국 화석에 대한 3D 데이터는 보존과 연구 자료로서의 가치 이외에도 3차원 브로셔와 인터랙티브 콘텐츠 제작 등의 다양한 분야에 활용 가능한 콘텐츠로서의 가치를 지닌다.

■ **중심어** : | 3차원 스캐닝 | 천연기념물 | 공룡 발자국 | 화석산지 | 백악기 | 등고선 | 컬러램프 | 앰비언트 어클루전 | 셰이딩 알고리즘 |

#### Abstract

20 fossil sites of numerous fossil sites in Korea have been designated as Natural Monument for protection and conservation. Many of the sites which is located at the coastal area have been gradually disfigured by natural weathering, erosion and human activity. Thus the conservation of the original form and the documentation for the original figure are necessary. In this study, we applied 3D digital documentation to Natural Monument No. 394, Haenam Uhangri dinosaur, pterosaur, and bird footprint fossil site, for maintaining the original form of the dinosaur footprints. We were able to obtain the 3D digital data on two dinosaur footprint sites, a high resolution distributional map, and more accurate digital data of the dinosaur footprints applied the rendering method by ambient occlusion. 3D digital data on the dinosaur footprints is worth for the conservation and research data, moreover content for applying to the various fields such as to make 3D brochure, interactive contents, and so on.

■ **keyword** : | 3D Scanning | Natural Monument | Dinosaur Footprint | Fossil Site | Cretaceous | Contour Line | Color Ramp | Ambient Occlusion | Shading Algorithm |

\* 본 연구는 국립문화재연구소 「천연기념물 공룡 발자국 3D 기록화 사업」으로 수행되었습니다.

접수번호 : #110907-005

접수일자 : 2011년 09월 07일

심사완료일 : 2011년 11월 02일

교신저자 : 김경수, e-mail : kimks@cue.ac.kr

## I. 서론

한반도 남해안 일원에 분포하는 공룡 발자국 화석산지는 파도와 조석의 영향을 받는 해안가 혹은 해안가와 인접해 있어 인위적 훼손과 함께 자연적 풍화·침식으로 많은 공룡 발자국들이 지속적으로 훼손되거나 멸실되고 있다. 이처럼 공룡 발자국 화석산지의 훼손이 점차 가속화되는 현 상황에서 공룡 발자국 화석의 훼손과 멸실 등에 대비한 보존 방안과 훼손되기 이전의 상태를 기록한 자료의 확보가 무엇보다 시급하다. 특히, 대부분의 공룡과 새 발자국 화석산지들이 국가지정문화재(천연기념물) 내지 지방기념물로 지정되어 있어 정책적으로도 문화재로서의 화석산지에 대한 관심과 보존 방법에 대한 관심이 높아져 가고 있다.

지금까지 공룡 발자국을 보존하기위해 개별 발자국 혹은 화석산지를 대상으로 많은 시도가 있었으나 별다른 효과를 거두지 못하였다. 그 이유는 대부분의 연구가 화석산지의 광물·지질학적 특징 조사 및 물리적·공학적 성질을 분석하여 그에 따른 보존 기술만을 제안하고 있기 때문이다[1-6]. 또한, 몇몇 화석산지는 표준화된 보존 방법과 기술의 결여로 인해 보존 처리 후 더 나쁜 결과를 초래하여 화석산지의 훼손이 매우 심각한 수준에 이르기기도 하였다[그림 1].

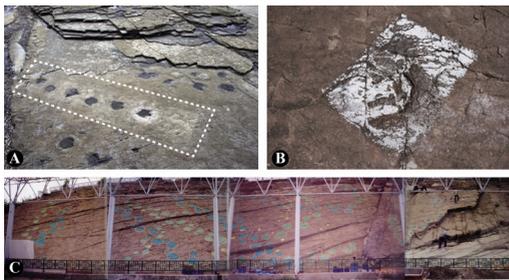


그림 1. 화석산지 훼손 사례(a-b:실리콘오염, c:페인트)

이런 경우, 화석산지는 긴급 보존 처리 과정을 다시 진행하지만, 한번 훼손된 발자국들은 본래의 모습을 찾을 수가 없다. 이처럼 자연적이거나 인위적인 이유로 인해 공룡 발자국 화석산지의 훼손과 멸실이 빠르게 진행되고 있지만, 자연 상태에 있는 화석산지들은 태생적으로 훼손과 멸실의 위험인자를 갖고 있기에 노력의 결

실은 매우 제한적이다. 따라서 최근에는 공룡 발자국과 같은 자연유산에 대한 보존 방법 역시 보존 기술(약품) 개발에서 디지털 기술을 이용한 원형 기록 보존으로 변화하고 있다[4][7-11][14]. 이처럼 공룡 발자국과 같은 화석을 3차원 디지털 데이터로 구축하는 것은 현재의 상태를 정밀 디지털 데이터로 보존하여, 문화재의 영구 보존과 복제(Replica) 모델 제작 및 공룡 화석 관련 디지털 콘텐츠 개발 등을 가능하게 할 것이다. 또한, 공룡 발자국 및 주변 환경의 변화 양상을 정기적으로 측정하여 시간에 따른 변화 과정을 과학적, 수치적으로 비교·분석할 수 있으며 고생물학 등 관련 연구 분야에도 폭넓게 적용 될 수 있다.

본 연구는 한번 훼손되거나 멸실되면 복원이 불가능한 공룡 발자국 화석산지를 3차원 디지털 기술을 이용하여 그 기록을 보존함으로써 항구적으로 문화재 원형을 보존함과 동시에, 공룡 발자국 분석에 필요한 기초 정보를 정확히 획득할 수 있는 구체적인 연구 방법으로써 3D 스캐닝 기법을 검토하고 공룡 발자국 연구에 활용하는 데 그 목적이 있다.

## II. 연구 지역

본 연구의 대상 지역은 천연기념물 제394호 해남 우항리 공룡·익룡·새 발자국 화석산지이다[그림 2]. 해남 우항리 화석산지는 공룡 발자국과 더불어 물갈퀴달린 새 발자국과 익룡 발자국이 발견되었으며 중생대 백악기의 화산 쇄설성 퇴적층(우항리층)으로 이루어져 있다 [그림 2(a)].

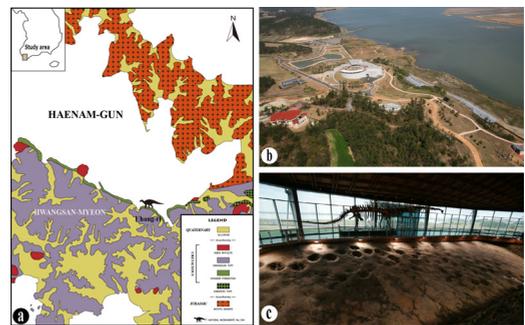


그림 2. 연구 지역의 지질도(a)와 화석산지 모습(b, C)

해남 우항리 화석산지는 2008년과 2009년 두 번에 걸쳐 2개 사이트의 공룡 발자국 171개를 대상으로 3차원 디지털 기록화 작업을 수행하였다[표 1].

표 1. 3D 정밀 기록 대상지와 대상물

구분	대상지	대상물
2008	해남 우항리	- 화석지 (약 30m×8.5m) - 97개의 발자국
2009	해남 우항리	화석지 (약 38m×5.9m) 74개의 발자국

### III. 연구 방법

3D 레이저 스캐닝 기술은 오브젝트나 환경의 3차원 형상을 취득하는 기술이다. 대부분 대상 오브젝트의 표면으로부터 형상 정보를 측정하여 점군(点群; point cloud) 데이터를 생성하고 이때 표면의 컬러 정보를 함께 취득하기도 한다[9]. 이를 위해 3차원 스캐너 장비를 사용한다. 일반적으로 한 번의 스캔으로는 대상물을 완전하게 스캔할 수가 없으며, 서로 다른 방향에서 여러 번 스캔을 하고 얻어진 데이터들을 공통의 좌표계로 정렬한 후 하나의 데이터로 병합한다. 3차원 스캐너는 스캔 방식에 따라 여러 가지로 구분할 수 있으며, 일반적으로 접촉식과 비접촉식의 두 가지 방식으로 분류할 수 있다[15]. 문화유산이나 자연유산에 대한 정밀기록은 대상에 절대 훼손을 주지 않아야 하기 때문에 비접촉식이 주로 활용된다.

#### 1. 사용 장비 및 소프트웨어

이번 연구에는 광대역 스캐너(long range scanner)인 Leica(社)의 ScanStation과 근거리 정밀 스캐너(short range scanner)인 Konica Minolta(社)의 Vivid9i를 사용하였다[그림 3]. ScanStation은 비행시간측정(Time-of-Flight) 방식의 스캐너로서, 일반적인 조건에서의 스캔 가능 거리가 130여m에 이르는 광대역 스캐너이다. Vivid9i는 삼각측량(triangulation) 방식의 스캐너로서, 스트라이프 방식의 레이저를 사용하며 스캔 가능 거리는 0.5m~2.5m(확장모드 시)이다. 본 연구에서

는 화석산지 전체와 개별 발자국을 각기 다른 해상도로 스캔하여 다중해상도(Multi-resolution) 스캔데이터의 생성을 목표로 하였다. 화석산지는 그 영역이 넓으므로 광대역 스캐너를 사용하였으며, 개별 발자국 화석은 근거리 정밀 스캐너를 사용하였다.



그림 3. 연구에 사용된 스캐너(좌: Leica ScanStation, 우: Konica-Minolta Vivid9i)

광대역 스캐너는 화석산지 및 주변 지형의 형상을 기록하고, 그 결과 데이터는 고해상도의 개별 발자국 스캔데이터가 정렬될 기반이 된다. 다중해상도의 최종 결과 스캔데이터는 화석산지의 전체 지형뿐만 아니라 개별 발자국의 상세 형상까지 기록함으로써, 하나의 데이터에 많은 정보를 효과적으로 포함하게 된다. 이들 3D 스캐너는 대상물(target objects)의 색상 정보를 획득할 수는 있지만, 대상물이 갖고 있는 고유한 특성을 충분히 반영하지 못한다. 따라서 화석산지와 개별 발자국의 3D 폴리곤 모델을 작성하기 위해 고해상도의 디지털 카메라(Nikon D200)를 사용하였다.

각 스캐너의 구동과 후처리에 Leica(社)에서 개발한 3차원 스캔 전용 소프트웨어인 Cyclone (ver. 5.8)과 국내의 INUS(社)에서 개발한 Rapidform XOS2를 사용하였다. 스캔 전용 소프트웨어에서 후처리 과정을 거친 3D 데이터는 최종 산출물 제작을 위해 AutoCAD와 같은 CAD 제작용 소프트웨어와 GIS용 소프트웨어, Maya, 3dsmax와 같은 3차원 모델링 소프트웨어 등, 목적에 적합한 상용 소프트웨어를 선정하여 사용하였다.

#### 2. 현장 작업

사전답사와 작업당일 화석산지의 상태를 검토하고

이에 맞는 스캔 계획을 세웠다. 3차원 스캔의 기술적인 측면에서의 검토뿐만 아니라, 현장작업에 함께 참여한 고생물학 자문교수의 보행렬 기록 방안 측면에서의 확인도 함께 진행되었다. 정밀하고 효과적으로 스캔 데이터를 구축하는 동시에, 공룡발자국의 기록과 연구 자료로서의 가치를 함께 확보해야 하기 때문이다.

현장에서 스캔 작업에 들어가기 전, 스캔 결과에 영향을 미칠 수 있는 요소들을 정리하였다. 화석지와 개별 화석을 청소하여 발자국 화석의 윤곽을 확실하게 드러내고 부분적으로 고여 있는 물과 표면의 습기를 제거하였다. 해남 우항리 화석산지의 경우 스캔 대상 공룡발자국의 수가 많아 보행렬에 따라 발자국 별로 번호를 매기고, 방향 기록을 위해 방위 표시를 하였다. 광대역 스캔데이터의 후처리 과정에서 점군 데이터의 정렬 과정을 용이하게 하기 위해 타켓을 설치하고, 향후 화석산지의 훼손 정도를 분석할 수 있도록 하기 위해 기준점을 고정지점에 설치하였다.

사전에 계획된 위치에 광대역 스캐너(ScanStation)를 설치하고 화석산지에 대한 스캔 작업을 수행하였으며, 개별 발자국은 정밀 스캐너(Vivid9i)로 스캔을 수행하였다. 이때, 스캔 위치와 방향, 설정 값 등은 작업일지에 기록하였다. ScanStation의 해상도는 대상 영역 중 스캔 지점으로부터 가장 먼 지점의 두 포인트 간 간격이 약 5~6mm 정도 되도록 설정하였다. Vivid9i의 경우, 광량이 강하면 레이저의 정확한 위치를 읽어내지 못하므로 주로 야간에 작업을 하였으며, 적절한 해상도를 유지하기 위해서 미들(Middle) 렌즈를 사용하였다. 화석산지와 공룡발자국의 3D 모델 매핑을 위해 고해상도 카메라를 사용하였으며 정확한 매핑을 위해 수직방향으로 촬영하였다.

### 3. 데이터 후처리

3차원 스캐닝 작업을 통해 구축한 데이터의 초기 상태는 정렬되지 않은 여러 개의 점군 데이터로서, 이를 활용 가능한 데이터로 만들기 위해서는 정렬, 병합, 메쉬(mesh) 데이터 제작 등의 과정을 거쳐야 한다[그림 4]. 현장에서 취득한 스캔 데이터는 Cyclone과 Rapidform으로 후처리 작업을 하였다. 개별 발자국 화

석들의 스캔 데이터는 우선 정렬 및 병합 후 메쉬 데이터로 변환을 하였으며, 3D 모델링 소프트웨어에서 디지털 카메라로 촬영한 이미지를 텍스처로 하여 매핑 하였다. 그리고 화석산지 스캔 점군 데이터에 발자국 화석 점군 데이터를 정렬하고 병합한 후, 메쉬 데이터로 변환하였다. 등고선 제작을 위한 데이터 역시 메쉬 데이터에서 추출하였다.

공룡 발자국 화석산지의 경우 일반적인 문화재나 발굴현장의 스캐닝과는 다른 특징을 갖고 있다. 발자국 화석들은 정밀한 형상도 중요하지만 발자국들의 정확한 배치 형태(보행렬)과 발자국이 퇴적물에 눌린 깊이와 모양 등도 매우 중요한 요소이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 대상 발자국 화석의 정밀 기록뿐만 아니라, 공룡 발자국 화석의 특성에 따라 기록 및 분석 연구에 적합한 도면이나 등고선, 컬러 램프, VR모델 등을 최종 산출물로 제작하였다. 아울러 3차원 데이터의 깊이를 효과적으로 표현하기 위한 기법을 고려하였다.



그림 4. 작업 프로세스

## IV. 결과

### 1. 3D 스캔

해남 우항리 화석산지는 발자국의 크기가 크고, 매우 깊으며, 내부 형상이 복잡한 구조를 갖고 있는 공룡 발자국으로 이루어져 있다[그림 5]. 이러한 발자국의 3차원 형상을 완전하게 획득하기 위해서는 여러 각도에서 스캔을 해야 한다.



그림 5. 공룡 발자국의 형태와 스캔 작업의 방해 요소들(b: 전시 시설물, c-d: 물의 유입)

표 2. 3D 스캔 결과

	우항리(2008)	우항리(2009)
스캔된 공룡 발자국의 수	97	74
기준점의 수	6	6
ScanStation	스캔 시간	3h 30m
	스캔 지점의 수	7
Vivid9i	파일 크기(Gb)	2.36
	스캔 시간	15h 20m
Vivid9i	파일 수	26
	파일 크기(Gb)	2.87

일부 공룡 발자국은 전시 시설물에 가려져 있어 Vivid9i의 위치를 확보할 수 없어 스캔 작업을 할 수 없었다[그림 5(b)]. 또한, 발자국 화석이 있는 지층면은 약 21° 정도 경사면을 이루고 있으며 노출된 층준의 가장 깊은 곳은 지표면보다 약 3.2m 아래에 위치한다. 이로 인해 화석산지는 지하로 물이 유입되어 하단부는 물에 잠겨 있다[그림 5(c, d)]. 최대한 물을 제거하여 작업을 하였으나, 최하단부의 일부 발자국은 ScanStation이나 Vivid9i 스캐너로 스캔작업을 하지 못하였다. 물에 잠겨 있던 부분의 경우, 스캔한 데이터의 하단 부분에 노이즈가 심하게 발생하였다[그림 9(a-b) 화살표 부분]. 3차원 스캐닝 작업을 통해 연구 지역에서 171개의 공룡 발자국 화석에 대한 디지털 자료를 획득하였다. 스캔한 데이터의 크기는 8.32GB이며, 스캐닝 작업은 약 43시간이 소요되었다[표 2]. 각 발자국은 고생물학적 분류기호에 따라 이름과 번호가 매겨졌다. Vivid9i로 획득한 개별 발자국의 정밀 스캔데이터에 대해 정렬 및 최적화 작업을 한 후, ScanStation으로 획득한 전체 화석지 스캔데이터에 병합하여 다중해상도의 스캔데이터를 생성

하였다[그림 6(a)]. 그림 6(b)는 전체 점군의 1%만 나타난 것으로서, 다중해상도 점군데이터의 특성을 볼 수 있다.

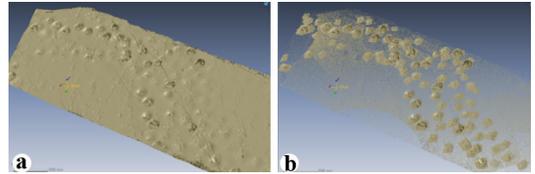


그림 6. 다중해상도 스캔데이터. (a) 다중해상도 정렬 결과 (b) 1% 가시화 결과

## 2. 가공 산출물

각 스캐너로부터의 스캔데이터 및 다중해상도로 정렬된 전체 사이트 스캔데이터 외에, 스캔데이터를 가공하여 이를 통해 발자국의 연구와 데이터의 활용이 가능하도록 하였다.

### 2.1 3D 모델(3D mesh model)

다중해상도의 최종 점군 데이터는 Rapidform에서 메쉬 데이터로 변환하였다[그림 7(a-c)]. 후처리를 마친 메쉬 데이터를 STL 포맷으로 저장하였고, Maya에서 현장에서 찍은 사진들을 매핑하여 최종 3D 모델을 생성하였다[그림 7(d)].

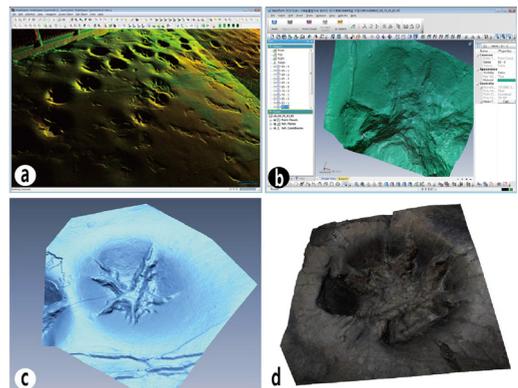


그림 7. 3D 모델 제작. (a) ScanStation 점군 데이터, (b) Vivid9i 점군 데이터, (c) 메쉬 데이터, (d) 3D 모델

2.2 도면(CAD drawing)

화석산지의 도면은 ScanStation 스캔 데이터의 이미지를 바탕으로 AutoCAD (ver. 2005)에서 제작하였다. 각 사이트별 화석산지에 대한 평면도와 단면도, 발자국 배치도, 개별 발자국에 대한 평면도와 단면도를 제작하였다[그림 8][그림 9].

화석산지에 대한 평면도가 중력방향에 수직하게 제작되었다면, 개별 발자국의 평면도는 발자국 화석이 포함된 지면에 수직한 도면으로 제작 하였다[그림 8]. 공룡발자국 화석의 경우, 발을 디딘 지면에 대해 그 발자국이 어떤 형태와 깊이로 생성되었는지 중요하기 때문이다. 발자국 화석의 평면도면은 화석 형상으로부터 발자국의 윤곽을 추출하는 과정에서 오류가 생길 가능성이 높기 때문에 화석의 윤곽을 명확히 보여줄 수 있는 셰이딩 이미지를 적용하여 제작하였다.

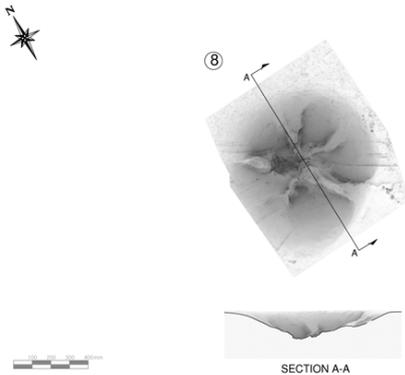


그림 8. 공룡 발자국(8번) 평면도와 단면도

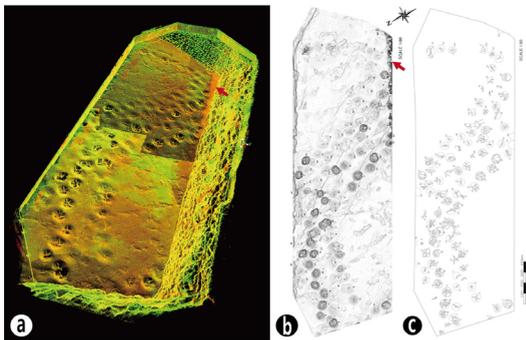


그림 9. 도면 제작. (a) ScanStation 스캔 데이터, (b) 배치도 셰이딩 이미지, (c) 배치도 Line 이미지

사용된 셰이딩 기법은 '3. 3차원 발자국 모델의 셰이딩 표현'에서 설명하도록 한다.

화석산지의 평면도와 단면도, 각 화석산지 별 발자국 배치도는 발자국이 포함된 화석산지 3D 모델을 셰이딩한 이미지를 직접 사용한 것과 발자국의 윤곽선을 선으로 추출한 것의 두 가지 형태로 제작하였다[그림 9].

2.3 등고선 및 컬러램프(Contour line and Color ramp)

화석산지와 공룡발자국의 등고선은 GIS용 소프트웨어인 GlobalMapper (ver. 9)를 이용하여 제작하였다. 등고선의 기준은 현장 여건 상 절대좌표를 추출할 수 없어 화석산지의 가장 낮은 지점을 0으로 하여 상대적인 높이로 등고선을 추출하였다. 따라서 공룡발자국의 깊이는 - 값을 갖는다[그림 10(a)]. 깊이를 컬러의 변화로 보여주는 컬러램프(Color ramp) 이미지도 동일한 소프트웨어에서 제작하였다[그림 10(b)].

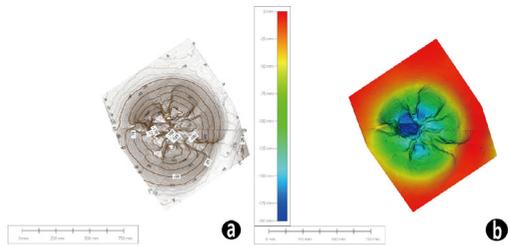


그림 10. 등고선(a)과 컬러 램프(b)

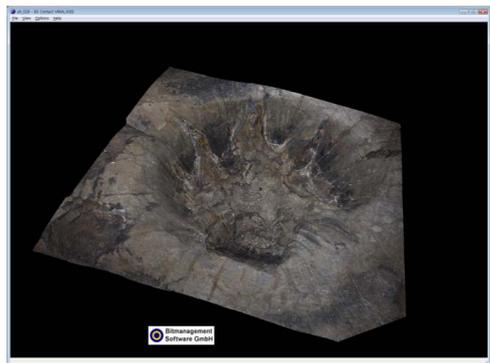


그림 11. VR 모델

2.4 VR 모델(VR model)

VR(Virtual Reality) 모델은 사용자가 공룡발자국 화석을 실시간으로 조작하며 3차원 모델을 돌려보면서 살펴 볼 수 있도록 VRML로 제작한 것이다. VR 모델은 저밀도의 로우 폴리곤이어야 하므로 3D 모델에서 폴리곤 수를 줄였다[그림 11]. VR 모델은 사용자가 직접 조작하며 발자국의 3차원 형상을 확인할 수 있으며, 브라우저의 기능에 따라 입체영상으로도 볼 수 있다.

3. 3차원 발자국 모델의 셰이딩 표현

공룡의 발자국 화석을 사진으로 촬영하는 경우 형상이 잘 나타나지 않기 때문에, 현장에서 전문가가 화석의 윤곽에 따라 그리게 된다. 그러나 이 과정은 주관적일 수 밖에 없어서 정확성이 떨어질 수 있고, 지나치게 단순화되는 경향이 있으며 발자국의 3차원적 형상과 깊이 변화를 나타낼 수 없는 한계가 있다. 3차원 스캔을 통해 획득한 3차원 모델은 기록의 의의를 넘어 보다 명확한 표현을 가능하게 한다. 실제 화석산지에서는 화석산지 표면에 여러 가지 색과 명암이 섞여 있어서 빛의 반사가 균일하지 않아 발자국의 형상이 눈에 잘 보이지 않는다. 그러나 발자국의 3D 메쉬 모델을 동일한 컬러로 설정하고 렌더링을 하게 되면 윤곽이 잘 드러나게 되어 발자국 형상을 보다 쉽게 이해할 수 있게 된다.

3.1 다양한 셰이딩 표현

지금까지 3차원 물체의 음영 표현을 목적으로 하는 많은 셰이딩 알고리즘들이 제시되고 있지만, 이 알고리즘들이 얼마나 물체의 형태를 효과적으로 전달하는지에 대한 과학적 조사나 고찰은 이루어지지 않고 있다[16]. 물체의 형상을 효과적으로 표현하는 셰이딩 알고리즘에는 사실적 표현을 목적으로 하는 알고리즘(예, BRDF, 푹 셰이딩 등)과 비사실적 표현을 목적으로 하는 알고리즘(예, 툰 셰이딩, 쿨투웬 등)이 있으며[표 3], 이 외에도 함수를 특수화하여 다양한 셰이딩 모델들이 제안되고 있다. 렌더링 이미지를 통해 사물의 형태를 인지하는 실험에서 음영 표현 시 툰 단계가 가장 중요하다는 결과가 나타났다[16].

표 3. 효과적 형태전달을 목적으로 하는 다양한 음영 알고리즘[16]

사실적 음영 알고리즘		비사실적 음영 알고리즘	
BRDF [17]	현실 세계의 조명 환경을 반영하여 사실적으로 표현	Cool-to-Warm [18]	형태를 강조하기 위해 사용되는 비사실적 음영 표현 모델
Phong	물리적으로 존재할 수 없는 조명이지만 사실적으로 표현하는 목적 가장 일반적으로 사용되는 음영 표현 모델	Toon [19]	생략, 요약 등을 통해서 대상의 복잡한 형태를 단순화시켜 효과적인 정보 전달
		Line-Art[20] (Pen-and-ink/Pencil)	형태 및 재질을 효과적으로 전달

3.2 공룡 발자국 화석의 셰이딩 표현

사실적 음영 알고리즘을 사용하는 셰이딩은 발자국의 사실감을 높이고, 음영의 톤이 높은 알고리즘은 사용자의 인지를 높일 수 있다. 그러나 발자국 화석 연구에서는 사실감이나 전체적인 형태 인지와 더불어, 화석에 남은 상세 윤곽을 정확하고 객관적으로 표현하는 것도 또한 중요하다. 푹 셰이딩과 같이 빛의 방향에 영향을 받는 방법은 이러한 점에서 한계가 있을 수 있는데, 이는 빛의 방향과 세기, 발자국의 형상에 따라 곡률이 다르게 보이거나 밝은 하이라이트 영역이나 어두운 그림자 부분에 의해 세부 윤곽들이 나타나지 않을 수 있기 때문이다[그림 12].

[그림 12(a, b)]에서는 조명이 좌측 하단과 우측 하단에 위치한 경우 각각의 렌더링 결과를 보여준다. 두 이미지를 비교해 보면 상세한 윤곽이 하이라이트나 음영에 가려 보이지 않거나, 곡률 자체가 인지되지 않는 곳이 있음을 알 수 있다. 렌더링 이미지가 사진이나 드로잉의 한계를 극복해 줌에도 불구하고, 렌더링 설정 과정에서 작업자의 주관에 영향을 받음으로써 표현에 왜곡이나 한계가 생길 수 있음을 보여준다. 이는 기록화라는 연구목적에 고려할 때 다른 접근 방식이 필요함을 시사한다. 이를 해결하기 위해 빛의 방향이나 위치에 무관하게 3차원 모델의 형상에 의해 렌더링 이미지가 표현되는 셰이딩 알고리즘을 적용하였다. 스탠포드 대학이 주축이 된 디지털미켈란젤로 프로젝트에서 미켈란젤로의 작업방식을 알아내기 위해 끝의 형태가 표현될 수 있도록 스캔 모델에 액세서빌리티 렌더링

(Accessibility rendering) 기법을 사용한 바 있다[21]. 앰비언트 어클루전(Ambient occlusion) 렌더링 기법은 액세서빌리티 렌더링과 마찬가지로 모델의 형상에 따라 렌더링 이미지의 음영을 결정하며, 3차원 모델링 소프트웨어에서 장면에 사실감과 깊이감을 주기 위해 많이 사용되고 있는 렌더링 기법 중 하나이다. 물체 표면에서 모든 방향으로 광선을 쏘아서 표면의 앰비언트 어클루전을 계산하며, 광선이 물체에 의해 가려지게 되면 밝기가 감소된다[22]. 여기에서는 하나의 물체, 즉 발자국 모델에 대해 이를 적용함으로써 발자국 모델 내의 세부 형상을 드러내는 동시에, 높은 음영 톤으로 발자국의 윤곽을 효과적으로 인지할 수 있도록 했으며, 메쉬 상의 인접 면과의 각도에 따라 렌더링 색이 결정이 되므로 주관이나 상황에 의한 차이를 배제할 수 있었다 [그림 12(c)].

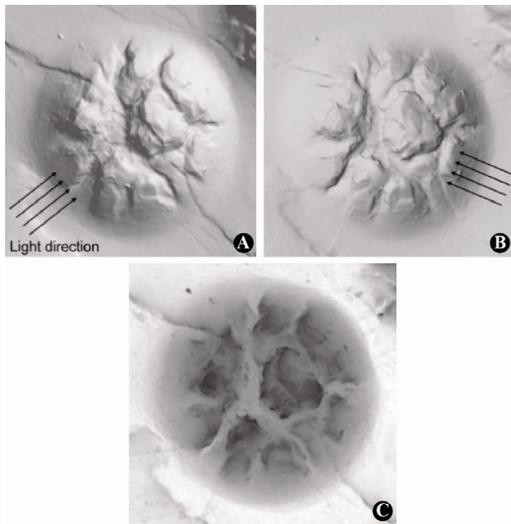


그림 12. 일반 웨이딩 방법에서의 문제점(a, b)과 앰비언트 어클루전(Ambient occlusion) 렌더링 결과(c)

화석산지에서 발자국 화석을 직접 눈으로 보거나 사진으로 기록하더라도 3차원 윤곽을 파악하기는 쉽지 않은 경우가 많다[그림 13(a)]. 현장에서 발자국의 형상을 직접 그리는데 이러한 드로잉 또한 입체적인 형상을 나타내지 못한다[그림 13(b)]. 3차원 스캔데이터를 이용하여 메쉬 데이터를 구축하여 분석할 때 앰비언트 어클루전 렌더링 기법을 통해 발자국의 형상을 가시화하는 것은 이와 같은 문제점에 대한 해결방안의 하나로서 매우 유용한 도구가 될 수 있다[그림 13(c)].

그림 13(a)는 발자국 화석의 원형 사진, (b)는 드로잉, (c)는 앰비언트 어클루전 렌더링 결과이다. (a)는 원형 사진이 다소 흐릿하고, (b)는 드로잉이 평면적이어서 입체감이 부족하다. (c)는 렌더링을 통해 발자국의 깊이와 윤곽을 선명하게 보여준다.

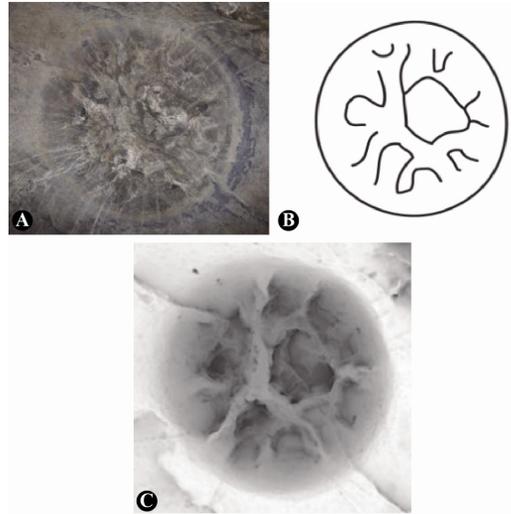


그림 13. 공룡 발자국 화석사진(a), 드로잉(b) 및 앰비언트 어클루전 렌더링(c) 비교

## V. 고찰

현재까지 3차원 디지털 스캐너를 이용한 문화재의 디지털화 작업은 지속적으로 이루어져 왔다. 대부분의 3차원 디지털 작업은 석탑이나 건축물 혹은 유적지와 같은 문화유산 분야가 대부분이다[12][13]. 천연기념물을 포함하는 자연유산분야는 이제 걸음마 단계로 앞으로 풀어야 할 과제들이 산적해 있다. 특히, 공룡발자국을 포함하고 있는 화석산지에 대한 3차원 디지털 스캐닝 작업은 일반 건축물이나 문화재 혹은 발굴현장에서 이루어지는 스캐닝과는 달리, 무생물이 아닌 과거에 살았던 생명체의 행동을 기록하는 것이다. 발자국의 모양, 깊이, 퇴적물의 상태 등과 같은 공룡의 행동양식을 분석할 수 있는 정보들은 동일한 개체의 공룡이 동(同)시간에 남겨 놓은 발자국들에서도 모두 다르게 나타나기 때문에 반드시 고생물학(공룡학) 지식이 수반되지 않으면 작업할 수가 없다.

다중해상도 스캔을 통한 기록방식은 대상물 뿐만 아

나라 대상물이 포함된 넓은 지역을 서로 다른 해상도로 스캔하고 하나의 데이터로 병합함으로써, 대상물의 공간적인 정보와 형상정보를 기록으로 남기는데 유용하다. 이번 연구에서는 화석산지 전체와 개별 발자국을 기록함에 있어 각각을 별도로 기록하지 않고 다중해상도 스캔데이터를 구축하였다. 이는 발자국이 남겨진 지형과 발자국의 배치, 보행렬의 형태, 개별 발자국의 정밀 형상을 전체적으로 나타내기 위함이었는데, 이렇게 구축된 다중해상도 데이터는 전체 사이트 내에서의 보행렬 가시화에서도 효과적이었다.

하나로 정렬한 다중해상도 데이터의 경우, 화석산지의 면적이 크고 발자국들의 형상이 복잡해서 풀리곤 수가 매우 많아지는 문제점을 보였다. 발자국의 정밀한 형상까지 유지할 때 1,000만개 이상이 생성되기도 하였는데, 이를 활용하고자 할 경우 초고밀도 폴리곤의 운영방안이 필요하다.

육안이나 사진 상으로는 발자국의 3차원 형상을 정확하게 파악하기 어려운데, 이러한 문제점을 해결하는 동시에 3차원 형상 가시화 과정에서의 객관성 확보를 위해 스캔데이터에 기반한 3D 모델에 엠비언트 어클루전 렌더링 기법을 적용하여 이미지를 생성하였다. 본 연구에 참여한 고생물학 전문가가 이 결과물을 바탕으로 발자국의 분포와 보행렬을 파악하고 발자국의 윤곽을 추출하는데 이 방식은 매우 효과적이었다. 기존에 보고되지 않았던 발자국을 데이터 상에서 발견하기도 하였다. 객관적으로 가시화하는 특성을 가진 본 결과물을 직접 도면작성에도 활용하였다.

공룡발자국의 깊이에 따른 변화양상을 관찰하기 위해 등고선도 및 컬러랩프를 제작하였는데, 현장 여건상 절대좌표를 추출하기 어려워 상대적인 높이로 등고선을 제작하였다. 보다 정밀한 등고선도와 컬러랩프 제작을 위해서는 절대좌표 값에 대한 고민이 필요하다.

## VI. 결론

본 연구는 많은 분야에서 활용되고 있는 3D 디지털 기술을 천연기념물 공룡발자국 화석산지에 적용하여 지속적으로 훼손되어 가고 있는 공룡발자국의 훼손과

멸실에 대비한 보존방안의 일환으로 시도되었다. 이번 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 이번 연구는 국내에서 국가지정문화재 공룡화석분야를 대상으로 3D 디지털 스캐닝 기술을 적용한 첫 번째 시도이다. 본 연구를 통해 천연기념물 제393호 해남 우항리 공룡화석산지의 2개 사이트에 대한 정밀 기록 작업을 완료하였다.

둘째, 배치도나 평면도 등을 제작함에 있어서 스캔 데이터를 기반으로 제작함으로써 수작업에 의한 실측보다 훨씬 정밀하고 다양한 정보를 담아 낼 수 있었다.

셋째, 공룡발자국 및 화석산지의 도면작성 시, 기존의 방법은 발자국의 윤곽을 선으로 표시하는 과정에서 왜곡이 발생하거나 객관적이지 못한 문제점과 한계가 있는데, 3차원 스캔데이터를 기반으로 한 모델에 엠비언트 어클루전 렌더링 알고리즘을 적용함으로써 효과적인 가시화 방안을 제시하였다.

넷째, 대부분의 화석산지는 접근성이 떨어지고 계속 훼손이 진행되어 지속적인 현장 연구가 어려운 문제가 있는데, 3차원 정밀 스캔데이터를 통해 시공간의 제약 없이 연구와 교육이 이뤄질 수 있는 기반을 마련하였다.

다섯째, 본 연구를 통해 구축된 데이터가 보존의 목적 외에도 여러 형태로 가공되어 새로운 연구 도구로 활용 가능함을 보여주었다. 3D 스캔데이터를 활용하는 화석연구용 소프트웨어 개발도 가능할 것이다. 또한 일반인을 대상으로 하는 추가적 활용(예: 복제모형 제작, 3차원 브로셔, 인터랙티브 콘텐츠 제작 등)도 가능하다.

마지막으로, 본 공룡발자국 3D 기록화 연구를 진행함에 있어, 고생물 전문가와 연구수행 팀이 사전준비 작업부터 현장 작업, 산출물 생성 단계에까지 지속적인 논의를 하면서 해당 분야에 유용한 결과물을 구축할 수 있는 접근방식을 찾아나갔으며 이를 통해 기존의 문화유산 기록 방식에서 진일보한 결과를 생성했다는 데 큰 의미가 있다.

## 참고 문헌

- [1] 김근미, 김성수, 박형동, 정강환, "Geotourism 대상지역의 지질공학적 특성 및 장기 보존 기술에 대한 기초 연구", 한국자원공학회지, 제39권, 제1호, pp.19-25, 2002.
- [2] 김수진, 이정후, 노진환, 안중호, 최진범, 조현구, 최현수, 유재영, 정기영, *해남 공룡화석지 보존방안 학술연구*, 전라남도 해남군, 2000.
- [3] 김수진, 정종률, 고철환, 백인성, 정기영, 허민, 도진영, *고성 덕명리의 공룡 및 새 발자국 화석산지 보존관리방안 연구*, 경남 고성군, 2003.
- [4] 김정률, 김경수, 박찬홍, *공룡 발자국 3D 기록보존 및 보존방안 연구*, 국립문화재연구소, 2007.
- [5] 정기영, 김수진, "35번 고속도로 고성 교차로 지역 공룡 발자국의 보존을 위한 응용광물학적 연구", 한국광물학회지, 제17권, 제3호, pp.189-199, 2004.
- [6] 조현구, 김수진, 장세정, "해남 공룡화석지 퇴적암의 물리적 성질", 한국광물학회지, 제15권, 제2호, pp.132-139, 2002.
- [7] 공달용, 임종덕, 김정률, 김경수, "남해 가인리 공룡 발자국 화석에 대한 디지털 사진 측량 기법의 활용", 한국지구과학회지, 제31권, 제2호, pp.129-138, 2010.
- [8] 구자봉, 윤선희, 박동진, 이원호, 김효정, 공달용, 김태식, 정중수, "천연기념물 노거수 3D 정밀 실측 조사에 관한 연구", 한국전통조경학회지, 제25권, 제4호, pp.101-110, 2007.
- [9] 원광연, 김정률, 안재홍, 박진호, *천연기념물 공룡 발자국 3D 기록 보고서(2차)*, 국립문화재연구소, 2008.
- [10] 원광연, 김경수, 안재홍, 박진호, *천연기념물 공룡 발자국 3D 기록 보고서(3차)*, 국립문화재연구소, 2009.
- [11] 원광연, 김경수, 안재홍, 박진호, *천연기념물 공룡 발자국 3D 기록 보고서(4차)*, 국립문화재연구소, 2010.
- [12] 박소연, "고구려 고분벽화 3차원 가상현실 영상 콘텐츠 개발", 한국콘텐츠학회지, 제8권, 제1호, pp.38-44, 2010.
- [13] 박찬석, 전병호, "정립사지오층석탑 3차원 디지털 복원", 한국콘텐츠학회 2004춘계종합학술대회 논문집, 제12권, pp.549-552, 2004.
- [14] J. H. Ahn, K. Y. Wohn, and D. Y. Kong, "3D Digital Documentation of Dinosaur Footprints," In Proceedings of the International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM 2010), Seoul, Korea, 2010.
- [15] <http://alpha1.infim.ro/cost/pagini/handbook/chapters/principle.html>
- [16] 변혜원, 박윤영, "사용자 인지 실험 기반 웨이팅 알고리즘 평가", 한국콘텐츠학회논문지, 제11권, 제6호, pp.106-115, 2011.
- [17] Murat Kurt, László Szirmay-Kalos, and Jaroslav Kriánek, "An Anisotropic BRDF Model for Fitting and Monte Carlo Rendering," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol.44, No.1, 2010.
- [18] A. Gooch, B. Gooch, P. Shirley, and E. Cohen, "A Non-Photorealistic Lighting Model for Automatic Technical Illustration," Proceedings of the 1998 Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.447-452, 1998.
- [19] Micahel Press and Jihad El-Sana, "Multiresolution Hierarchy for Real-Time Cartoon-Style Rendering," Geometric Modeling and Imaging, pp.63-68, 2006.
- [20] H. Lee, S. Kwon, and S. Lee, "Real-Time Pencil Rendering," Proceedings of the 2006 International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, pp.37-45, 2006.
- [21] Y. Levo, "The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues," Proceeding of the SIGGRAPH 2000, ACM, 2000.
- [22] Zhukov S., Inoes A., and Kronin G., "An Ambient Light Illumination Model," In

Rendering Techniques '98: Proceeding of the Eurographics Workshop, pp.45-56, 1998.

저 자 소 개

공 달 용(Dal-Yong Kong) 정회원



- 2004년 2월 : 경북대학교 지질학과(이학석사)
- 2011년 2월 : 경북대학교 지질학과(이학박사)
- 2005년 2월 ~ 2006년 7월 : 경남 고성군청 학예연구사

▪ 2006년 8월 ~ 현재 : 문화재청 국립문화재연구소 학예연구사

<관심분야> : 디지털 문화유산, 가상현실

임 종 덕(Jong-Deock Lim) 정회원



- 1994년 5월 : Nebraska University 박물관학과(이학석사)
- 1999년 12월 : Kansas University 생태진화생물학과(이학박사)
- 2006년 11월 ~ 현재 : 문화재청 국립문화재연구소 학예연구관

<관심분야> : 3D 컴퓨터 그래픽스, VR 콘텐츠

원 광 연(Kwang-Yeon Wahn) 정회원



- 2004년 2월 : 위스콘신대학교 전산학과(공학석사)
- 2011년 2월 : 메릴랜드대학교 전산학과(공학박사)
- 1991년 ~ 2004년 : 한국과학기술원 전산학과 교수

▪ 2005년 ~ 2010년 : 한국과학기술원 문화기술대학원 원장

▪ 2010년 ~ 현재 : 한국과학기술원 문화기술대학원 교수

<관심분야> : 문화기술, HCI, 가상현실

안 재 홍(Jae-Hong Ahn) 정회원



- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과(이학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 기계설계학과(공학석사)
- 2006년 ~ 2009년 : 한국과학기술원 문화기술연구센터 선임연구원

구원

▪ 2009년 ~ 현재 : 한국과학기술원 문화기술대학원 박사과정

<관심분야> : 가상현실, 디지털 문화유산

김 경 수(Kyung-Soo Kim) 정회원



- 1999년 2월 : 한국교원대 과학교육과 지구과학전공(교육학석사)
- 2004년 8월 : 한국교원대 과학교육과 지구과학전공(교육학박사)
- 2008년 8월 ~ 현재 : 진주교육대학교 과학교육과 교수

<관심분야> : 가상현실, 멀티미디어, 문화재복원