

지상라이다에 의한 동굴의 3차원 공간정보 구축 Construction of 3D Spatial Information about Cave by Terrestrial LiDAR

강 준 목¹⁾ · 이 종 신²⁾ · 원 재 호³⁾ · 박 준 규⁴⁾
Kang, Joon Mook · Lee, Jong Sin · Won, Jae Ho · Park, Joon Kyu

Abstract

There are two methods to survey the natural cave. One is plane table surveying and the other is recording chart surveying. The drawing maps drawn by these methods are 2D. Furthermore, it is difficult to figure out the accurate dimension about full sections and whole interior products because of use of plane table and recording chart. Accordingly, in this study, the 3D spatial information about Dangcheomuldonggul was constructed by the Terrestrial LiDAR and high resolution digital camera where is belong to Jeju Volcanic Island and Lava Tubes as the first World Natural Heritage of the Republic of Korea. Also, the utilization possibility of 3D spatial information was suggested to the basic data of deformation and change detection through structure analysis, section analysis, shape analysis, and interior products analysis.

Keywords : Terrestrial LiDAR, Cave, 3D Spatial Information, Texture Mapping

초 록

현재 자연동굴을 대상으로 한 측량은 간이평판측량과 기록지측량의 두 가지 방법을 사용하고 있다. 이러한 방법을 통해 작성된 도면은 2차원이며, 간이평판과 기록지를 이용하기 때문에 전체 단면 및 모든 생성물들의 정확한 제원 파악이 어렵다. 이에 본 연구에서는 세계자연유산으로 등재된 용암동굴 중 당치물동굴(천연기념물 제 384호)을 대상으로 지상라이다와 고해상도 카메라를 활용하여 3차원 공간정보를 구축하였다. 또한 구조 분석, 단면 분석, 형태 분석, 생성물 분석을 통해 변형 및 변화 탐지의 기초데이터로서 3차원 공간정보의 활용가능성을 제시하였다.

핵심어 : 지상라이다, 동굴, 3차원 공간정보, 텍스처 매핑

1. 서 론

현재 자연동굴을 대상으로 한 측량은 항법용 휴대 GPS 수신기를 이용하여 동굴 입구를 찾고, 레이저 거리 측정기, 경사계, 컴퍼스 등을 사용하여 동굴의 기본제원을 기록지에 기록한 후, 실내에서 CAD(Computer-Aided

Design)로 측량도를 작성하고 있다(환경부 국립환경과학원, 2005). 하지만, 이는 동굴 조사에 관한 연구 방법 중 하나이며, 실제 자연동굴 측량 조사지침 상에는 간이평판측량과 기록지측량의 두 가지 방법이 제시되어 있다. 동굴 내에 발달하는 종유관, 종유석, 석순 등의 동굴생성물들은 기록지에 기록하고, 크기가 약 1m 이상인 동굴생

1) 정회원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: jmkang@cnu.ac.kr)
2) 교신저자 · 정회원 · 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정(E-mail: merrysc@lycos.co.kr)
3) 정회원 · 범아엔지니어링 국토정보시스템연구소 책임연구원(E-mail: acrowon@nate.com)
4) 정회원 · 충남대학교 건설방재연구소 연구원(E-mail: surveyyp@empal.com)

성물은 측량도에 기입하며, 바닥, 벽면 및 천장은 별도로 표시하게 되어 있다(환경부, 2002). 하지만, 간이평판측량과 기록지측량으로 작성된 동굴의 평면도와 종·횡단면도는 모두 2차원이며, 사용 장비 또한 간이평판과 기록지를 이용하여 정확도가 낮고 전체 단면 및 모든 생성물들에 대한 정확한 제원 파악이 어렵다.

이 외에 지상사진측량이나 무타겟 토털스테이션측량을 이용하는 방법도 있으나, 지상사진측량의 경우, 두 장의 사진을 정합하여야 하고 대상물에 그림자 등이 생기는 경우 오차가 발생할 수 있으므로(한창대, 2000) 전체 단면에 동굴 생성물이 고르게 분포되어 있는 대상지를 사진측량기법으로 촬영하는 것은 효율성이 다소 떨어진다. 무타겟 토털스테이션의 경우, 동굴 내부를 대상으로 3차원 좌표를 획득할 수 있지만, 이를 이용하여 전체 단면에 대한 좌표를 획득하는 것은 비경제적이며 비효율적이다. 따라서, 형상이 복잡하고 벽체의 굴곡이 극심하여 위의 측량방법들로는 정확한 현황도면의 작성이 불가능한 자연동굴의 정확한 공간정보 구축방안이 필요하다.

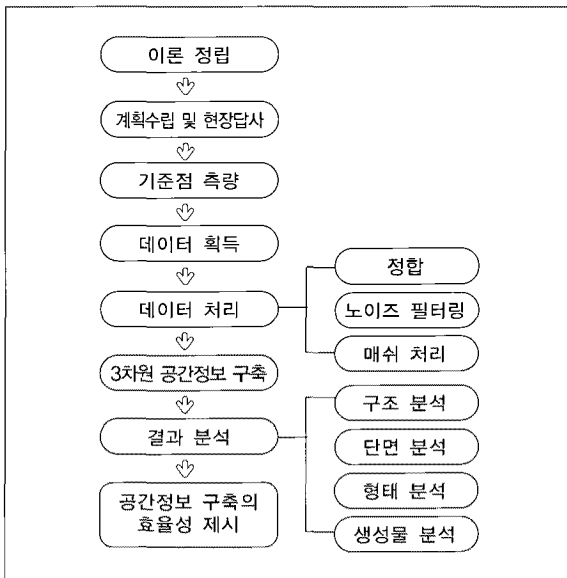


그림 1. 연구 흐름도

지하의 지형 및 지물을 대상으로 지상라이다를 활용한 연구로는 암반구조물에 대한 지상라이다의 활용사례 검토 및 적용성 분석(윤운상 등, 2007), 슬림홀 광학스캐너를 이용한 지하 시험공에 대한 검증과 검증자료를 이용한 단일 구조 입체화 연구(김경수 등, 2008), 실제 지하철공사 현장을 대상으로 계측자료의 효율적 수집 및

분석 방안 제시를 위한 내공변위계, 광파측량기 등의 기존 계측기와 지상라이다 간의 비교·분석(최원일, 2009) 등이 수행되었다.

본 연구에서는 천연기념물 제 384호로 지정된 제주특별자치도 당처물동굴을 대상으로 3D 영상모형을 제작하기 위하여 지상라이다 및 디지털카메라(DMC)를 통해 획득된 데이터를 처리함으로써 정확한 3차원 위치정보는 물론, 실물과 같은 현실감을 사용자에게 제공할 수 있는 3차원 공간정보를 구축하였다. 이를 통하여 보존 및 관리가 필요한 자연동굴을 대상으로 지상라이다를 이용한 3D 모델링 제작 기법을 정립하고, 텍스처 매핑 기법 등을 활용하여 보다 현실감 있는 3차원 공간정보의 구축 및 활용 방안 등을 제시하고자 한다. 그림 1은 본 연구의 흐름도를 나타낸다.

2. 데이터 획득 및 처리

2.1 데이터 획득

본 연구에서는 동굴의 3차원 측량을 위해 입구 주변에 3개의 기준점을 설치하고, 연구대상지 인근 도시기준점을 기지점으로 GPS 정지측량 및 수준측량을 실시하여 3개 기준점들의 위치성과를 획득하였다. 이 기준점들을 이용하여 토털스테이션측량과 수준측량으로 동굴의 지하기준점 성과를 획득하였고, 지하기준점들은 동굴 스캐닝을 위한 지상라이다의 후시점으로 사용하였으며, 기계점 좌표 산출에 활용하였다. 지상라이다 설치 위치는 전 단면과 모든 생성물들을 스캐닝하기 위해 사각지역을 우선적으로 고려하여 5곳을 선정하였으며, 이를 통

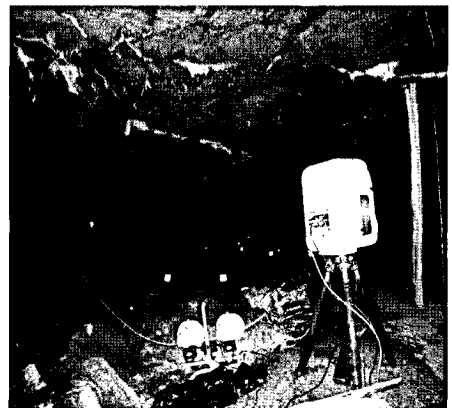


그림 2. 동굴 내부 지상라이다 측량

해 데이터의 손실을 최소화 하였다. 스캐닝 간격은 10cm × 10cm로, 종유석, 석순, 석주 등이 발달된 부분은 1cm × 1cm로 설정하였다. 그림 2는 동굴 내부 지상라이다 측량, 그림 3은 라이다 측량을 통해 획득한 점군데이터 및 사진을 나타낸다.

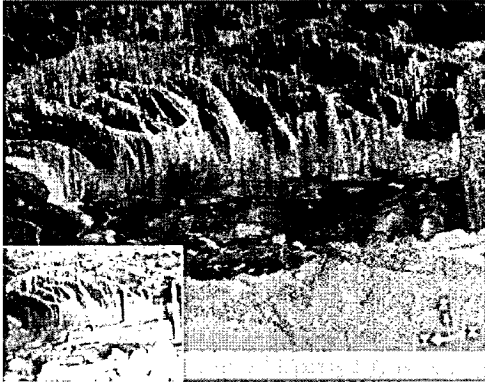


그림 3. 동굴 내부 점군데이터 및 사진

2.2 데이터 처리

각 기계점별로 스캔된 점군데이터를 결합하여 각 기준점의 오차값을 확인하고, 최적의 원시데이터를 획득하는 작업인 데이터 정합을 시행하였다. 획득된 점군데이터는 지상라이다 설치위치를 스캐닝 대상물과의 거리 10m를 기준으로 하여 10mm 간격으로 스캐닝 한 179,992,720개의 점으로서 각 점들은 x, y, z 좌표값, RGB 값, 그리고 반사강도(intensity)의 정보를 모두 포함하는 ASCII 파일로 출력하였다. 오차량은 타겟을 이용하여 자동으로 계산하였고, 지상라이다와 타겟 간의 Δx ,



그림 4. Sphere Ball 설치 위치

Δy , Δz 값을 2mm 이하로 구현하였으며, 정밀도가 낮은 타겟은 삭제하여 정밀도를 향상시켰다. 그림 4는 일부 Sphere Ball의 설치 위치를 나타내며, 표 1은 Sphere Ball의 중심 좌표, 그림 5는 획득한 데이터의 정합을 나타낸다.

표 1. Sphere Ball의 중심좌표 (단위 : m)

Sphere Ball	X 좌표	Y 좌표	Z 좌표
Sphere 1	179897.34409	56754.01022	14.22875
Sphere 2	179904.58905	56744.20478	13.37205
Sphere 3	179903.13655	56742.45534	13.97425
Sphere 4	179915.27005	56736.06587	12.54523
Sphere 5	179911.08444	56733.65722	13.48817
Sphere 6	179896.99135	56749.79936	14.33107
Sphere 7	179894.61707	56753.54008	14.25550
Sphere 8	179919.05061	56727.99106	13.15817

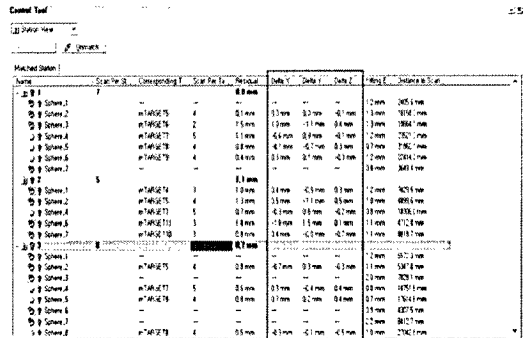


그림 5. 데이터 정합

노이즈 필터링은 동굴 내부의 난반사로 인해 발생된 노이즈를 Station 및 Object 별로 색상을 구분하고, 직접 선택하여 제거하는 방법을 사용하였으며, 노이즈 제거 후의 데이터를 대상으로 자동 샘플링 기능을 이용하여 높은 정확도의 데이터만 취급하였다. 그림 6은 노이즈 필터링 전·후를 나타낸다.

매쉬 처리는 각 점들을 삼각망으로 형성하는 과정이다. 그림 7의 점군데이터는 노이즈 필터링 데이터이며, 이를 통해 실제 동굴 내부의 색상 확인이 가능하였고, 각 기계점별 획득 데이터를 확인할 수 있었으며, 반사강도에 따른 데이터도 확인이 가능하였다. 그림 8의 매쉬 데이터는 3차원 폴리곤 생성이나 NURBS(Non Uniform Rational B-Spline) 모델링을 위한 기초자료로 사용할 수

있고, 매쉬 데이터 형태로 편집 및 보완이 가능하다. 이 과정에서 미 확보된 부분의 데이터 보간 및 연결을 실시하였다.

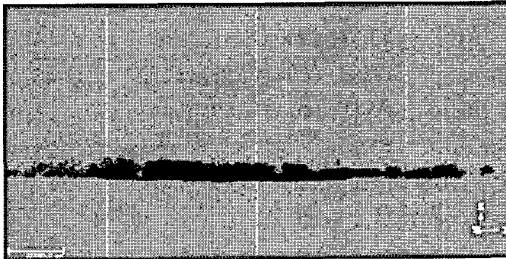
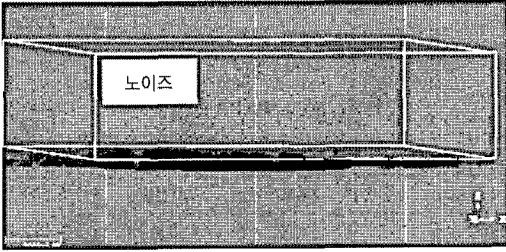


그림 6. 노이즈 필터링 전·후



그림 7. 점군데이터

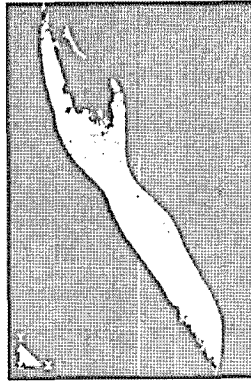


그림 8. 매쉬 데이터

3. 3차원 공간정보 구축 및 결과 분석

3.1 3차원 공간정보 구축

본 연구에서 획득된 3차원 데이터는 후처리 후 모델링을 위해 OBJ 파일이나 ASCII 등 필요한 형식의 데이터로 포맷을 변환하였으며, 동굴 생성물들의 다양한 곡면을 표현하기 위해 NURBS 모델링을 수행하였다. 그림 9는 생성물들에 대한 NURBS 모델을 나타낸다.

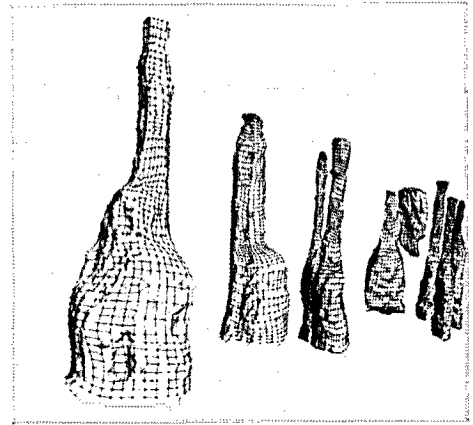


그림 9. 생성물의 NURBS 모델

NURBS 형태로 작성된 데이터를 평면으로 펼쳐서 고해상도 디지털카메라를 통해 획득한 사진자료를 매핑하였다. 이를 통해 실사에 가까운 질감으로 동굴을 표현할 수 있었다. 그림 10은 질감생성의 결과를 나타낸다.



그림 10. 질감생성 결과

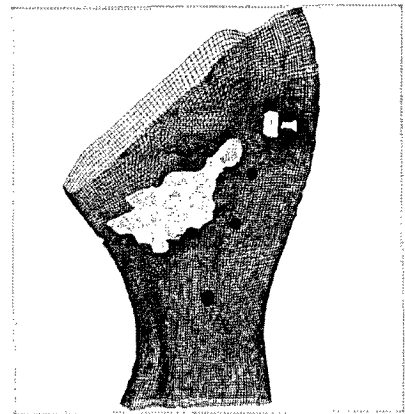


그림 11. Lighting

렌더링 프로그램인 Maya를 이용하여 Lighting, Reflecting, Shading 등의 처리를 통해 자연스러운 모델링 데이터를 생성하였다. 그림 11에 보이는 바와 같이 밝은 부분과 어두운 부분을 표현하기 위해 가상 조명의 방향을 설정하였고, 그림 12와 같이 빛의 반사에 의한 음영 효과를 적용시켰으며, 그림 13과 같이 그림자로 인해 어두워진 부분을 표현하였다.



그림 12. Reflecting



그림 13. Shading

위의 과정을 통해 생성된 모델은 1:1 축척의 3차원 공간정보로 모든 부분에서 절대 좌표값을 갖고 있으며, 동굴의 실제 표면에 가깝게 표현되었다. 그림 14와 그림 15는 렌더링 결과 생성된 3차원 모델을 나타낸다.



그림 14. 생성물의 3차원 모델

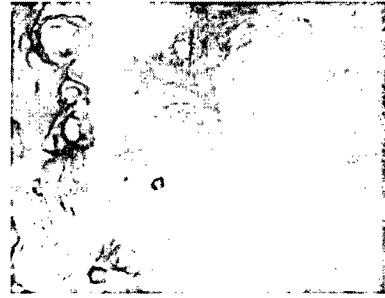


그림 15. 바닥의 3차원 모델

3.2 결과 분석

3.2.1 기존 측량방식과의 비교

“전국 자연동굴 조사지침서 작성에 관한 연구보고서”의 자연동굴측량 조사지침에 따르면, 국내에서 작성되는 동굴측량은 간이 평판측량과 기록지측량이 있으며, 이 두 가지 방법 중 동굴의 구조와 요구 목적에 따라 선택한다고 제시되어 있다. 또한, 동굴 측량에 필요한 장비로 컴퍼스, 클리노미터, 줄자, 거리측정기, 간이평판, 기록지, 방안지, 표식지, 계산기, 축척자 등을 사용하여 동굴 측량을 실시한다고 기술되어 있다(환경부, 2002).

그림 16은 제주도동굴연구소에서 기존의 동굴측량 방법을 통해 작성한 도면(김범훈, 2007)과 지상라이다 측량의 결과를 나타낸다. 기존의 측량방법을 통해 제작된 도면에서는 동굴의 평면적인 형태만을 대략적으로 파악할 수 있으나, 본 연구를 통해 구축된 3차원 공간정보에서는 세부적인 형태는 물론, 내부 생성물들의 정확한 형상까지도 파악할 수 있다.

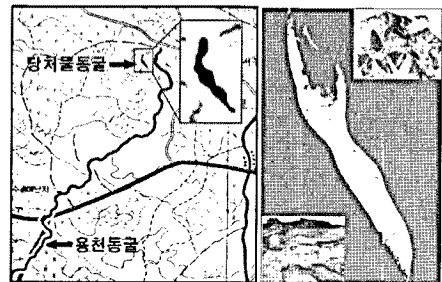


그림 16. 기존 도면과 지상라이다 측량의 결과

3.2.2 동굴의 구조 분석

기존의 측량 방식으로는 동굴의 폭, 높이, 길이의 표현 방법이 단순하여 활용가치가 없었으나 본 연구를 통

해 생성된 3차원 공간정보는 동굴에 대한 표현 방법이 구체적이고, 정확한 데이터를 구현하였다.

구축된 데이터를 이용하여 동굴의 폭, 높이, 길이를 산정할 수 있었으며, 이를 통해 기존의 고고학이나 지질학 관련 자료에 제시된 “길이 110m, 폭 5.5m~18.4m, 높이 0.3~2.7m 규모의 동굴”이라는 단편적인 정보가 아닌 동굴 전체 단면에 대한 시작점에서부터 끝점까지의 경사거리, 수평거리, 수직거리에 대한 정확한 제원의 표시가 가능하였다. 그림 17은 동굴의 폭으로, No. 1 지점에서 최대값, No. 2 지점에서 최소값을 나타내었다. 표 2에 각 지점에서의 동굴 폭에 대한 제원을 나타내었다.

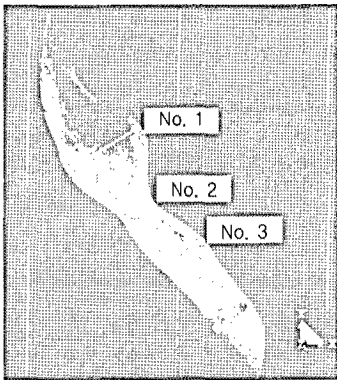


그림 17. 동굴의 폭

표 2. 동굴의 폭 (단위 : m)

구 분	경사거리(SD)	수평거리(H)	수직거리(V)
No. 1	16.86	16.74	2.03
No. 2	6.95	6.90	0.84
No. 3	10.02	9.93	1.33

당처물동굴의 최대 폭은 약 17m 정도였으며, 입구에서 내부로 갈수록 폭이 좁아지다가 다시 넓어지면서 두 갈래로 갈라지는 구조로 이루어져 있음을 알 수 있었다. 그림 18은 동굴의 높이이며, 표 3은 그 제원을 나타낸다.

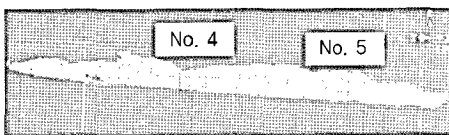


그림 18. 동굴의 높이

표 3. 동굴의 높이 (단위 : m)

구 분	경사거리(SD)	수평거리(H)	수직거리(V)
No. 4	4.54	4.14	1.86
No. 5	5.04	4.04	3.01

동굴의 높이는 2m~3m 정도였으며, 입구 부근에서 약 3m, 동굴이 갈라지는 부근에서 약 2m로 나타났다. 그림 19는 동굴 전체의 길이이고, 표 4에 그 제원을 나타내었다.

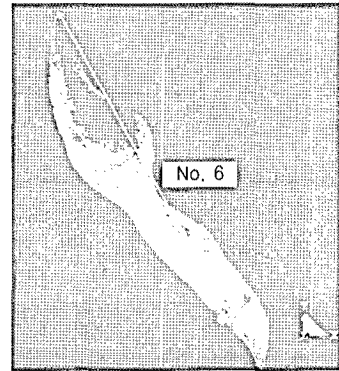


그림 19. 동굴의 길이

표 4. 동굴의 길이 (단위 : m)

구 분	경사거리(SD)	수평거리(H)	수직거리(V)
No. 6	82.56	82.55	1.36

당처물동굴의 전체 직선거리는 약 83m 정도였으며, 동굴의 입구 부근이 안쪽보다 약 1m 정도 높다는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 동굴의 단면 분석

구축된 3차원 공간정보를 이용하여 동굴의 단면 분석을 수행하였다. 그림 20은 입의 지점에서의 단면 분석을 나타낸다.

단면 분석은 입구에서 직선거리 약 50m 떨어진 지점을 대상으로 하였다. 이 지점은 동굴이 갈라지기 시작하는 지점으로 석순, 석주 및鐘유석 등 내부 생성물이 다양하게 발달되어 있다.

확대 단면에서 폭이 약 11m인 타원형이었다. 또한, 빗물의 유입을 통해 생성된鐘유석이 천장 중앙부에 집중 분포되어 있고, 왼쪽 벽면에는 천장과 바닥이 이어진 석

주가 존재하며, 오른쪽 벽면은 비교적 매끈한 상태의 수직면 또는 급사면이 형성되어 있는 것을 알 수 있었다.

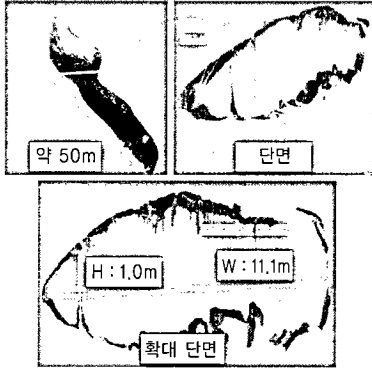


그림 20. 입의 지점의 단면 분석

3.2.4 동굴 내부의 형태 분석

본 연구를 통해 구축된 공간정보를 2003년에 기록된 “제주도 천연동굴 일제조사 보고서” 상의 조사표를 기초로 현재의 동굴 바닥, 천장, 벽면에 대한 각 부분별 형태를 분석하였다.

보고서에 따르면 천장의 균열을 따라 뺏어 내린 식물의 뿌리들을 축으로 다양한 종유석의 생성을 보이고, 동굴 내부는 일부 구간만 낙반이 산재하며, 발굴 초기에는 동굴생성물의 파손이 있었으나, 보고서 작성 시 파손된 동굴생성물들은 동굴 내부 한 곳에 모아져 있으며, 철저히 보호되고 있다고 기술하고 있다(문화재청, 2003). 그림 21은 동굴 바닥의 모습을 나타내고 있다.

바닥의 경우, 중앙부는 비교적 낮은 높이의 석순들이 분포되어 있고, 좌우 측면부는 천장에서 흘러내려서 생성된 석주의 밀집된 분포를 확인할 수 있었다.

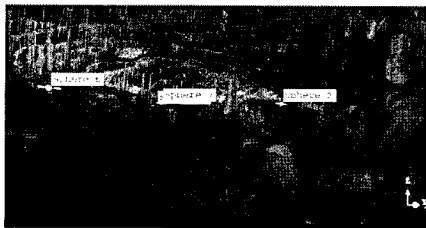


그림 21. 동굴 바닥

천장의 경우, 그림 22에서 보이는 바와 같이 불규칙적으로 생성된 다양한 종류의 종유석들을 확인할 수 있었

다. 이를 통해 천장의 균열을 따라 뺏어 내린 식물의 뿌리들을 축으로 종유석들이 다양하게 생성된다는 것을 알 수 있었다.

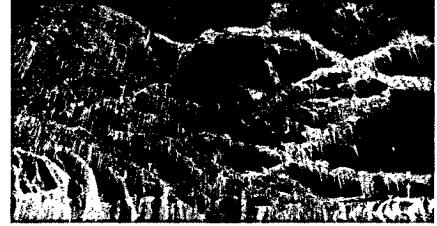


그림 22. 동굴 천장

벽면의 경우, 그림 23, 그림 24와 같이 천장에서 선형으로 발달된 종유석이 벽면을 타고 흐르며, 이 과정에서 생성된 종유석, 석순, 석주의 분포를 확인할 수 있다. 이를 통해 당처물동굴이 지하 침투수의 영향으로 생성된 동굴임을 추정할 수 있었다.



그림 23. 동굴 북동쪽 벽면



그림 24. 동굴 남서쪽 벽면

3.2.5 내부 생성물 분석

당처물동굴은 바닷가 바람에 의해 공급된 해양성 모래가 빗물에 녹아 동굴의 갈라진 틈과 식물의 뿌리를 따라 동굴 내로 유입되어 석회질 동굴생성물이 만들어진 것으로, 석회질 동굴생성물이 용암동굴 내에서 형성된 사실은 학술적 가치가 높을 뿐만 아니라 보존가치도 높

아 세계적인 자연유산으로 인정받고 있다. 또한, 10~30만년 전에 만들어졌지만 보존상태가 매우 양호한 당처물동굴의 내부 구조와 발달된 석회질 동굴생성물들은 세계에서 유일한 것으로 영구히 보존할 가치로 평가를 받고 있어 석회질 동굴생성물들을 대상으로 상세적인 제원 관리와 변화 추이 등의 포괄적인 데이터베이스 구축이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 관리 방안으로 지상라이다 측량을 통해 종유석, 석순, 석주 등의 동굴생성물에 대한 정확한 제원을 제시하고자 하였다.

(1) 종유석

당처물동굴의 종유석은 지상에서 자라고 있던 나무의 뿌리가 동굴 천장에 닿은 후, 이 뿌리를 덮는 과정에서 굳어진 석회질의 물방울들이 오랜 시간에 걸쳐 서서히 변화하면서 생성된 것으로 그 특이한 생성 원인으로 인해 학술적 가치가 매우 크다.

종유석은 그림 25에서 보이는 바와 같이 당처물동굴 전체에 고르게 분포되어 있으며, 얇은 고드름처럼 가로의 길이가 짧고, 세로의 길이가 긴 형태를 띠고 있어 훼손 가능성이 높다. 따라서 다른 생성물들에 비해 더욱 세심한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 표 5는 구축된 3차원 공간정보를 통해 분석한 종유석의 제원을 나타낸다.

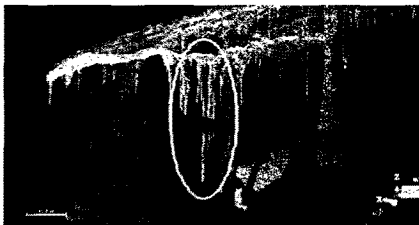


그림 25. 종유석

표 5. 종유석의 제원 (단위 : m)

구 분	폭	길이
종유석	0.005	0.608

(2) 석순

당처물동굴의 석순은 그 높이가 전체적으로 높지 않고, 옆으로 퍼져있는 형태가 대부분이지만 동굴의 양 측면의 경우, 천장과 거의 맞닿을 정도로 높은 석순도 분

포되어 있다. 향후, 지속적인 데이터 갱신을 통해 석순에 대한 석주로의 발달 과정이나 자연 노출로 인한 훼손 추이 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 26은 석순을 나타내며, 표 6은 구축된 3차원 공간정보를 통해 분석한 석순의 제원을 나타낸다.

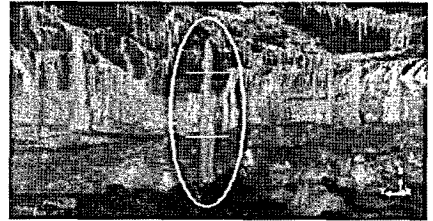


그림 26. 석순

표 6. 석순의 제원 (단위 : m)

구 분	상단폭	하단폭	길이
석 순	0.071	0.130	1.312

(3) 석주

당처물동굴의 석주는 동굴의 좌우 측면에 밀집되어 있으며, 그림 27에 보이는 바와 같이 하단부의 폭이 상단부의 폭보다 길어 안정된 형태를 띠고 있다. 또한, 종유석이 분포된 선을 따라 그대로 이어져서 생성된 것을 볼 수 있다.

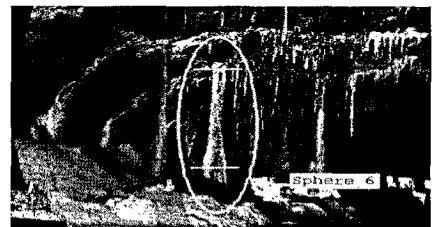


그림 27. 석주

표 7. 석주의 제원 (단위 : m)

구 분	상단폭	하단폭	길이
석 주	0.054	0.124	0.969

석주와 종유석이 매우 밀집된 당처물동굴의 측면에서 줄자를 이용하여 석주의 길이를 측정하는 것은 동굴의 훼손 가능성이 매우 높으므로, 본 연구에서와 같이 정밀

하게 구축된 3차원 공간정보를 활용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 표 7은 구축된 3차원 공간정보를 통해 분석한 석주의 제원을 나타낸다.

이와 같이 지상라이다를 통해 구축된 3차원 공간정보를 이용하여 동굴 내부 주요 생성물들의 제원 추출이 가능하였다. 기존의 일부 표본 추출과 줄자를 이용하던 동굴생성물들의 제원 관리에 지상라이다를 적용한다면 더욱 효과적인 관리가 이루어질 것이다. 또한, 이를 통해 획득한 데이터들은 고고학, 동굴학, 지질학 등 관련 연구의 기초자료로 활용 가능할 것이며, 특정 지역에 대한 주기적인 데이터 획득을 통해 동굴 내부 생성물들의 변형 및 훼손 정도를 모니터링 할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구는 제주특별자치도 당치물동굴을 대상으로 지상라이다 측량기법을 통해 보다 현실감 있는 3차원 공간정보를 획득하여 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 지상라이다를 이용하여 지하에 위치한 자연동굴의 정확한 3차원 위치정보와 색상정보를 갖는 점군데이터를 획득할 수 있었고, 자료처리 프로그램을 이용하여 3차원 모델을 생성할 수 있었다. 또한 고해상도 카메라에 의해 획득한 종유석, 석순, 석주 등의 동굴 내부생성물들의 표면 영상을 텍스처 매핑 프로그램을 이용하여 보다 현실감 있는 3차원 공간정보로 표현할 수 있었다.
2. 동굴 내부 생성물 중 대표적인 종유석, 석순, 석주를 추출하여 형상을 분석함으로써 추후 변형 및 변화 탐지의 기초데이터로 활용 가능성을 제시하였다.
3. 3차원 공간정보를 통해 동굴의 폭, 길이, 높이 측정은 물론, 역설계를 통해 기존의 부정확한 도면을 대체할 높은 정확도의 도면제작이 가능할 것으로 판단된다.

4. 향후 기존의 간이평판과 기록지를 이용하는 동굴 관리에 지상라이다를 적용한다면, 지하공간의 효율적 관리 및 보존을 위한 자료로 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김경수, 배대석, 김중열 (2008), 지하연구시설(KURT) 슬림홀 광학스캐너를 이용한 단열구조 입체화 연구, 대한지질공학회 2008년 학술대회 논문집, 대한지질공학회, pp. 185~190.
- 김범훈 (2007), 제주도 용암동굴의 보존 및 관리 방안 : 천연기념물 및 제주도기념물 지정 동굴을 대상으로, 석사학위논문, 제주대학교.
- 문화재청 (2003), 제주도 천연동굴 일제조사 보고서.
- 윤운상, 박정훈, 박성욱, 동승환, 임형규, 이근병 (2007), 특수지질에서의 암반구조물에 대한 레이저스캐너를 이용한 조사 적용사례 연구, 한국암반공학회 특별 심포지엄, 한국암반공학회, pp. 341~349.
- 최범일 (2009), 철도 NATM터널의 효율적 시공을 위한 터널계측 방법에 관한 연구, 석사학위논문, 서울산업대학교.
- 한창대(2000), 사진측량과 Laser scanning system 을 이용한 문화재 해석, 석사학위논문, 연세대학교.
- 환경부(2002), 전국 자연동굴 조사지침서 작성에 관한 연구보고서.
- 환경부 국립환경과학원 (2005), 2005 전국 자연동굴조사 보고서 : 분지미굴·청림굴/영월.