MUNHWAJAE *Korean Journal of Cultural Heritage Studies Vol. 52 No. 4, December 2019, pp.264~271.*
Copyright©2019, National Research Institute of Cultural Heritage

GPR 탐사를 통해 본 경주 첨성대 기초 및 주변의 유구 분석

오현덕* 국립강화문화재연구소 학예연구실 실장
권문희 국립문화재연구소 고고연구실 연구원
장한길로 국립문화재연구소 고고연구실 연구원
*Corresponding Author : hyundok@gmail.com

국 문 초 록

별을 관측하는 천문대로 잘 알려진 경주 첨성대는 그 모양과 성격이 독특하고 원래의 모습으로 잘 보존되어 있어 역사적·학술적·예술적 가치가 높은 문화재이다. 그동안 많은 연구자들이 첨성대의 외부 구조와 지반 안전성, 지진 재해 위험도 평가 연구 등 과학적인 조사를 이용한 첨성대의 평가를 진행해왔으나 첨성대의 지하 구조에 대해서는 조사가 매우 미흡하였다.

이 논문에서는 첨성대와 관련한 주변의 매장문화재 존재 여부와 첨성대의 기초부를 확인하기 위하여 지하투과레이더(GPR) 탐사를 수행하고 2차원과 3차원 영상을 통해 첨성대의 지하 구조를 정밀 분석하였다.

그 결과, 0.4~0.6m 깊이에서는 절반 정도만 남아 있긴 하지만 12개의 작은 물체들이 원형의 배치를 이루고 있고, 0.7~1m 깊이에서는 정면 4칸, 측면 3칸의 건물지로 추정되는 반응이 첨성대를 중심으로 주변에 분포하는 것이 확인되었다. 또한 첨성대의 직하부에는 이미 알고 있는 2단의 기단부 외에 7×7m 크기의 방형 시설이 깊이 0.6m에 존재하며, 깊이 1.2~3m에서는 첨성대의 기초시설로 추정되는 반응이 확인되었다. 이 기초시설은 동서 11m, 남북 12m의 타원형이며 첨성대 기단을 중심으로 북·서·동측면은 1m 이내로 짧고 남측면은 5m 정도로 넓게 분포하고 있다.

주제어 첨성대, 지하투과레이더(GPR), 주변 유구, 첨성대 기초, 3차원 영상

투고일자 2019. 09. 30 ● **심사일자** 2019. 10. 21 ● **게재확정일자** 2019. 10. 30

Ⅰ. 서론

경주 첨성대(국보 제31호)는 신라 선덕여왕 때(632~647년) 쌓았다는 내용이 『삼국유사』에 기록되어 있다. 별을 관측하는 천문대로 잘 알려져 있으며, 그 모양과 성격이 독특하고 원래의 모습이 잘 보존되어 있어 경주를 대표하는 상징물로 자리매김하고 있다.

과거 1950년대 항공사진에서는 첨성대에 인접하여 북편에 길이 나 있고 주변에 건물이 있었지만 1968년 경주동부사적지대로 지정된 이후로 정비되어 첨성대는 약 1,004㎡ 타원형 울타리로 둘러싸여 있다〈그림 1〉. 첨성대의 기단부는 진북으로부터 반시계 방향으로 약 20도 회전된 방향으로 있고, 가로 5.31m, 세로 5.34m로 정사각형에 가깝다.[1]

최근 경주에서 발생한 지진(2016/9/12, M=5.8)은 경주 지역의 가옥과 도로에 피해를 주었을 뿐만 아니라 첨성대 맨 윗단의 정자석이 돌아가는 등 약간의 변형을 가져온 바 있어 첨성대에 대한 사람들의 염려는 점점 높아지고 있다.

그럼에도 불구하고 첨성대를 해체하여 내부 구조를 수리한다든지, 주변을 발굴하여 첨성대의 기초나 첨성대와 관련한 주변 유구를 확인한다든지 하는 직접적인 조사는 아직 없었다.

그동안의 연구는 첨성대의 구조 안정성과 지반 안전성, 지진 재해 위험도 평가 연구 등 과학적인 부분에서 연구가 꾸준히 진행되어왔고 지진 발생 이후 실시간적인 모니터링이 이루어지고 있다.[2]

첨성대의 기능에 대한 연구는 그동안 많은 인문·천문학자들에 의하여 꾸준히 있어왔으며 다양한 의견들이 제기되었다.[3] 하지만 첨성대는 관련 역사문헌 기록이 적고 첨성대 주변에 관련 유적이 전혀 없는 독립적인 조형물이기 때문에 심도 있는 연구에 한계가 있어왔다.

또한 앞선 연구에서 첨성대 기초부를 확인하기 위한 물리탐사[4]가 여러 차례 있었으나 범위와 깊이, 모양 등 명확한 구조가 확인되지 않은 것에 반하여 이번 연구는 지하투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR) 탐사를 이용한 정밀 영상화에 성공하여 기초부의 모양을 또렷하게 파악할 수 있어 첨성대의 실체를 밝히는 데 도움을 주리라 생각한다.

Ⅱ. GPR 탐사 개요 및 자료 취득

첨성대는 북쪽으로 1도 이상 기울어져 있고 첨성대를 이루는 석재 사이에 간극이 벌어지고 있어[5] 첨성대 아래 기초부와 주변의 지반 구조를 확인하여 지반 침하 원인을 규명하는 것이 필요하다. 이에 따라 기초부를 정밀 영상화하고 압력·진동으로 인해 첨성대 안정성에 영향을 끼치지 않는 비파괴 조사 방법으로서의 GPR 탐사를 실시하였다.

GPR 탐사는 지표에서 인위적으로 발생시킨 전자기파를 안테나를 통해 송신하고 지하로부터 반사되어 돌아오는 파(波)의 시간과 진폭을 분석하여 지하의 구조와 매

1 국립문화재연구소, 2009, 『경주 첨성대 실측 훼손도 평가 조사보고서』.

2 국립문화재연구소, 2011, 『석조문화재 안전관리 방안 연구보고서 - 첨성대를 중심으로』; 경주시, 2014, 『경주 첨성대 정밀구조 안전진단 용역 보고서』; 국립문화재연구소·다인시스템, 2017, 『경주 첨성대 자동계측시스템 구축 완료보고서』; Park et al., 2012, 'Noninvasive geotechnical site investigation for stability of Cheomseongdae', Journal of Cultural Heritage 13.

3 서금석, 2017, 「천문대로서의 첨성대 이설에 대한 재론」『한국고대사학회』 86, 한국고대사학회; 이문규, 2004, 「첨성대를 어떻게 볼 것인가 -첨성대 해석의 역사와 신라시대 천문관-」『한국과학사학회』 26; 한국과학기술원(KAIST), 2009, 『제4차 첨성대 대토론회』. 첨성대의 역할에 대해서는 별자리를 관측하는 고대의 천문대로서의 역할 또는 그림자의 길이로 태양의 시차를 관측하는 규표로서의 역할, 춘하추동의 정확한 측정을 위한 별자리 관측의 역할 등 여러 가지 학설이 있다.

4 손호웅 외, 2004, 「석조구조물의 효율적 유지 관리를 위한 형상역공학적, 지반공학적 및 구조동역학적 특성 연구 -첨성대를 중심으로-」『물리탐사 기술 심포지움 -유적조사를 중심으로-』, 사단법인 한국물리탐사학회; 앞의 글, 2014; 앞의 글, 2017.

5 국립문화재연구소, 2009, 『경주 첨성대 실측 훼손도 평가 조사보고서』.

장물의 위치 및 존재 여부를 영상화하는 물리탐사 방법 중 하나이다. 전자기파는 지하 매질의 유전상수 및 전파 속도가 달라지는 층의 경계나 이상체에서 반사하는데 그 차이가 클수록 강한 반사가 일어난다. 이러한 강한 반사는 매질 중에 성질이 다른 물질(이상체)을 구분하기 쉽게 하고, 우리가 찾고자 하는 흙 속의 돌이나 금속 같은 매장문화재가 있을 가능성을 암시한다. 이러한 원리를 이용해 발굴을 위한 지표조사나 발굴 지역 근처의 미발굴지에서 건물의 초석이나 유물의 부존 상태를 확인할 수 있다.

조사 가능한 깊이와 탐지 물체의 크기에 따른 분해능은 안테나의 중심주파수 및 측선 간격에 따라 달라진다. 주파수가 낮아질수록 깊이 투과하는 반면 분해능은 낮고, 주파수가 높을수록 분해능은 좋은 반면 투과깊이는 얕아지는 상반되는 특성을 보인다. 그러므로 탐지하고자 하는 깊이와 예상되는 매장문화재의 크기를 고려하여 안테나를 선택하고 측선 간격을 적용하여야 한다.

본 조사에서 적용한 GPR 탐사 장비는 미국 GSSI사의 SIR3000 모델이며 400MHz 안테나를 사용하였고, 분석 프로그램은 GPR-Slice(Dean Goodman)를 사용하였다.[6]

GPR 이동거리 측정에 있어서 카트와 거리 측정 휠을 사용할 경우 첨성대의 울타리에 의해 조사 면적이 좁아지므로 막대를 이용해 끌며 거리 마커를 삽입하는 방법을 택하였다.

측선 간격이 촘촘할수록 공간적 분해능은 높아지나 조사 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 하지만 본 조사에서는 정밀한 3차원 영상 결과 취득을 위해 <그림 1>처럼 0.5m 간격의 격자 모양으로 탐사를 수행하였다.

탐사 구역은 울타리에 내접하는 방형으로 설정하였으며 면적은 575㎡이다. 탐사 측선의 x축은 첨성대 기단부와 나란한 남쪽으로 약간 기울어져 있으며 x축의 동서 거리는 25m, x축과 직교하는 y축의 남북 거리는 23m이다.

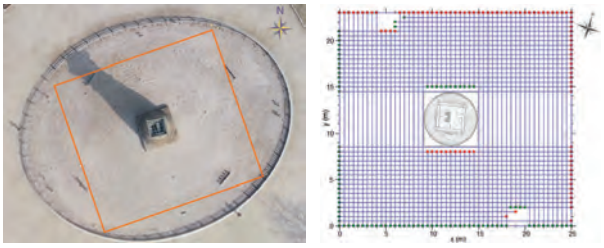


그림 1 경주 첨성대 GPR 탐사 구역 및 측선 현황(측선 간격 = 0.5m, x축 방향, y축 방향 탐사).

현장에서 획득한 데이터에는 반사된 파가 안테나로 수신될 때 해석에 방해가 되는 직접파 등의 신호와 잡음을 포함하고, 파의 전파시간에 따른 감쇠를 보정해주기 위해서 주파수 대역 필터(bandpass filter), 지표 반사 제거(background filter), 이득 보정(regain) 등을 실시하고, x-z의 수직 단면 데이터를 x-y의 2차원 평면도(Time slice)로 추출하여 깊이별 결과로 나타냈다.

3차원 입체 분석은 일정 크기 이상의 진폭대 반응들만 모아 3차원으로 가공한 것으로 첨성대 기초부의 상태를 실제에 가깝게 표현하였다.

Ⅲ. 분석 결과 및 해석

GPR 탐사의 탐지 깊이 내에서 토양 구조에 큰 변화가 없다고 가정하였을 때, GPR 수신기에 측정되는 강한 세기의 반응은 토양과 크게 대비되는 전기적 특성을 지니는 지하 매장 물체에서 발생된 반사파가 대부분이며 이러한 지하 매장 물체는 석재일 가능성이 높다.[7] 따라서 본 논문에서 강한 세기의 GPR 반응은 석재로 추정하여 결과를 해석하였으며, 특히 유구로 판단되는 반응 위주로 설명하였으므로 설명에서 누락 된 곳이 있음을 먼저 밝힌다.

첨성대 부분을 포함하는 25×23m 면적 내의 GPR 반응을 깊이별 x-y 평면도로 나타내고 주요 추정 유구의 형태를 살펴본 결과, 크게 4개의 층으로 구분 지을 수 있었

6 Goodman, D., and Piro, S., 2013, GPR remote sensing in archaeology, Heidelberg: Spring.

7 김소구·오현덕, 2003,「유적 발굴에 있어서 GPR 탐사의 응용에 관한 연구」『지질공학』 13.
오현덕·신종우, 2004,「경주 월성 지하 유구에 대한 GPR 탐사자료의 고고학적 해석」『물리탐사』 7.

다. 깊이별 각 반응의 형태에 집중하여 첨성대 주변 지하 매장 유구 분포를 추정하고 기술하였다.

0.4~0.6m 깊이의 x-y 평면도를 살펴보면 작은 물체(약 0.7m)들이 일정한 간격(약 2m)을 두고 배치된 것이 특징적인데(그림 2A), 총 12개의 물체들이 첨성대를 중심으로 남서편에 반원 형태로 배치되어 있다(그림 2B). x=7m, y=6m 지점에서의 GPR x-z 단면도를 살펴보면 작은 매장 물체의 반응임이 명확하다(그림 2C). GPR 반응에서 탐지되지 않았지만(또는 토양이 교란되어 일부 사라졌다면), 만약 이 물체들이 반대편에도 일정한 간격으로 배치되어 첨성대를 중심으로 원을 이루고 있었다고 가정한다면 그 원의 지름은 15m이며 모두 24개의 작은 매장 물체가 있었을 것으로 추정 가능하다.

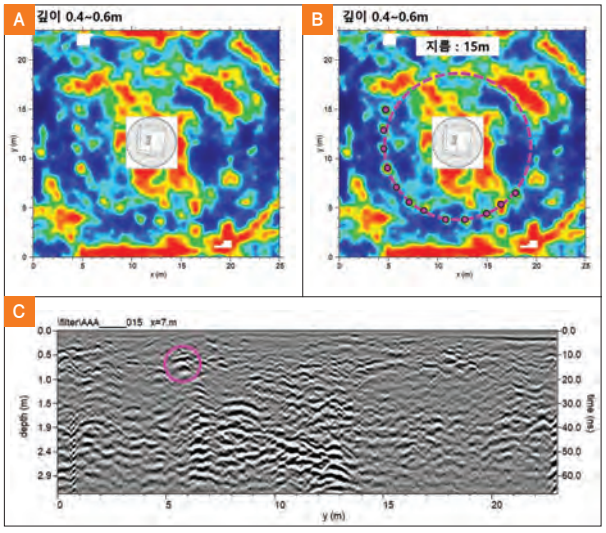


그림 2 A: 깊이 0.4~0.6m에서의 GPR 탐사 평면 결과, B: 해석, C: x=7m 측선의 수직 단면 데이터.

0.7~1m 깊이의 GPR 탐사 반응에서는 새로운 반응물들이 첨성대를 중심에서 일정 거리 이격되어 방형으로 배치되는데(그림 3A), 약 1.5m 크기의 물체 10개가 확인된다(그림 3B). x=4.5m, y=9m, y=13m, y=18m 지점에서의 GPR x-z 단면도를 살펴보면 물체로 추정했던 위치에서 좁은 쌍곡선 GPR 반응이 나타나므로 매장 물체임이 확실하다(그림 3C). 이 반응물들 역시 첨성대를 중심으로 배치되어 있으며 가로 15m, 세로 16m로 정면 4칸, 측면 3칸의 형태로 나타나고 있으며 첨성대 기단을 기준으로 3도가량 반시계 방향으로 틀어져 있다.

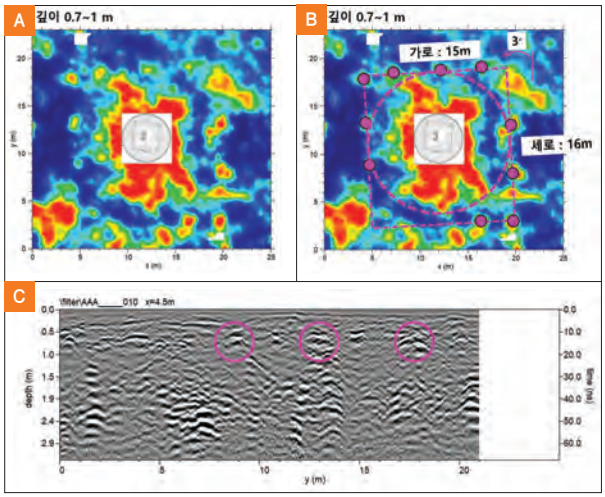


그림 3 A: 깊이 0.7~1m에서의 GPR 탐사 평면 결과, B: 해석, C: x=4.5m 측선의 수직 단면 데이터.

0.6~0.9m 깊이의 x-y 평면도로 살펴보면 첨성대의 바로 주변부에서 강한 세기의 GPR 반응이 방형으로 나타난다(그림 4A). 이 GPR 반응의 경계를 구분하여 선을 긋고 면적을 구하면 7×7m로 확인되며, 첨성대가 위치한 영

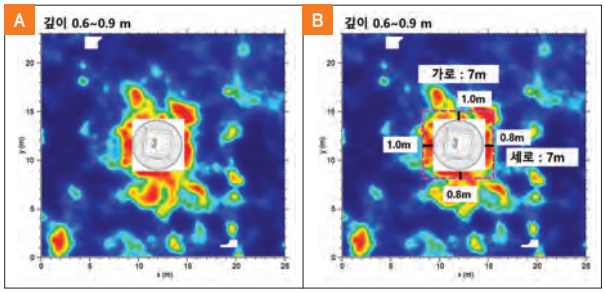


그림 4 A: 깊이 0.6~0.9m에서의 GPR 탐사 평면 결과, B: 해석.

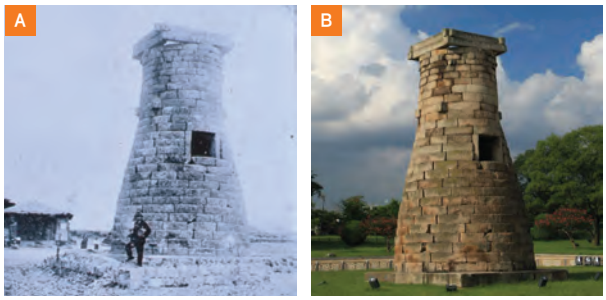


사진 1 1930년대 첨성대 기단부와 지금의 모습 비교, A: 1930년대 모습(출처: 한국학중앙연구원), B: 현재 모습(출처: 오세윤 작가).

역의 경계로부터 1.0m 혹은 0.8m의 거리를 차지한다(그림 4). 이 반응은 현재 지표면에 살짝 드러나 있는 첨성대 맨 아래 기단에 의한 반응이 아니라 그 기단보다 더 아래에 위치한 새로 발견된 기단에 의한 반응으로 추정된다. 이것은 1930년대에 촬영한 것으로 추정되는 옛 사진에서도 확인할 수 있다(사진 1).

〈그림 5A〉는 추정 심도 1.2~3m의 GPR 반응 중첩 x-y 평면도이다. 첨성대의 근접거리에서 넓은 원형의 GPR 반응이 나타나며, GPR 신호가 강하게 나타나는 타원형 영역에 선을 긋고 면적을 측정하면 가로 11m, 세로 12m로 확인되며, 첨성대의 기단으로부터 타원형의 경계가 가장 넓은 곳은 첨성대 남편으로서 5m 떨어져 있다. 이것은 Park 외(2012)의 linear offset seismic test 결과에서 첨성대 북편이 남편보다 저속도로 측정된 결과와 일치하는 것으로, 이 반응은 첨성대의 하부 기초 부분에 의한 반응으로 추정된다.

〈그림 5〉에서 보여준 수평 단면도의 GPR 반응을 수직 단면도에서 재확인하기 위해서 x방향 2개, y방향 4개의 측선을 표시하고(그림 6), 이들 측선에 해당하는 GPR x-z 단면도를 모두 도시하였다(그림 7). 〈그림 5〉에서 강한 GPR 반응으로 짐작하건대 첨성대의 하부 기단 부분으로 추정했던 위치의 수직 단면도들을 살펴보면 무수히 많은 GPR 쌍곡선 반응들이 겹쳐서 나타나는 것이 확인된다. 즉 이것은 어떤 지층의 경계나 단일 석재에 의한 반응이 아니라 무수히 많은 석재들이 겹겹이 쌓인 구

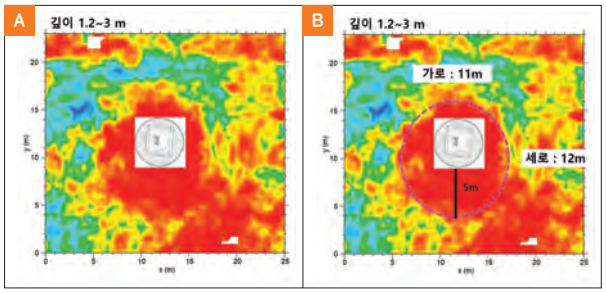


그림 5 A: 깊이 1.2~3m 깊이에서의 GPR 탐사 평면 결과, B: 해석.

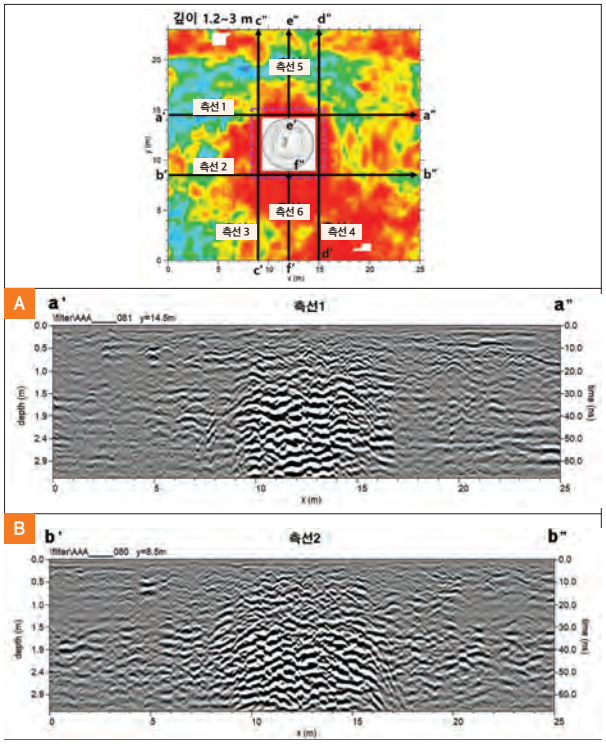


그림 6 첨성대 기초부의 측선별 수직 단면 데이터, A: 측선 1, B: 측선 2.

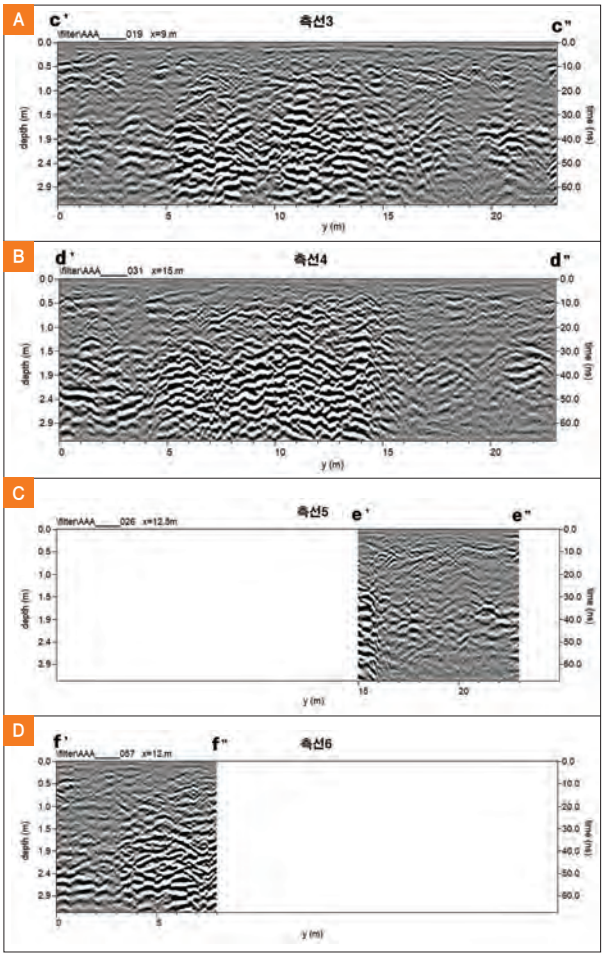


그림 7 첨성대 기초부의 측선별 수직 단면 데이터, A: 측선 3, B: 측선 4, C: 측선 5, D: 측선 6.

조에서 나타나는 반응으로 생각하는 것이 타당하며, <그림 5>에서 앞서 설명했던 강한 GPR 반응이 첨성대의 기단 부분으로 추정된다는 주장을 뒷받침한다.

마지막으로 〈그림 8〉은 0.4~3m 깊이에서 확인된 상기(上記)의 반응을 3차원 입체(iso surface)로 분석한 것으로 첨성대의 기초 부위를 잘 보여주고 있다.

이상으로 각 깊이별로 첨성대 주변의 매장 물체를 살펴본 바, 첨성대와 관련한 매장문화재가 다양한 형태로 잘 남아 있으며 첨성대 기초부의 범위와 깊이를 확인하였다.

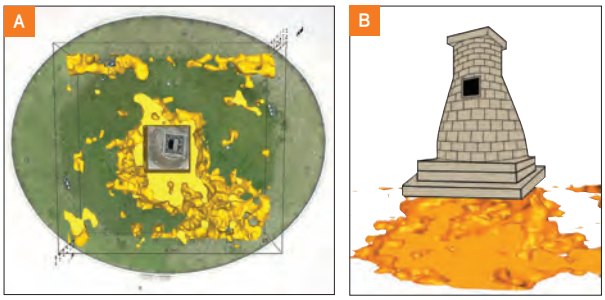


그림 8 0.4~3.0m 깊이에서 확인된 첨성대 기초, A: 3차원 입체(iso surface), B: 첨성대 기초 모식도.

Ⅳ. 결론

본 논문은 첨성대와 관련한 주변의 매장문화재 존재 여부와 첨성대의 기초부를 확인하기 위하여 GPR 탐사를 수행하고 그 연구 결과를 수록하였다.

첨성대의 안전을 고려하여 비파괴 조사법이면서 진동이나 충격이 전혀 없는 GPR 탐사를 적용하였다. 또한 탐사의 정확도를 최대한 높이기 위하여 0.5m의 조밀한 측선 간격으로 x방향과 y방향 탐사를 병행하여 실시하였으며 3차원 정밀 분석을 실시하였다.

그 결과, 첨성대 주변에는 매우 의미가 있는 매장문화재가 존재하고 있으며 첨성대의 기초부가 잘 탐지되어 그 범위와 깊이를 측정할 수 있었다.

그 세부 결과는 다음과 같다.

1. 첨성대 주변 깊이 0~0.4m에는 교란된 층과 근대 시설물이 확인되며 첨성대의 기초는 보이지 않음
2. 첨성대 남서편 깊이 0.4~0.6m에서 약 2m 간격으로 12개의 작은 물체가 반원 형태로 배치됨을 확인함. 북동편은 교란되어 사라진 것으로 추정됨
   - 북동편에도 같은 간격으로 추가 배치한다면 모두 24개가 있을 수 있으며 첨성대를 기준으로 지름 15m의 원형 배치를 이룸
3. 같은 위치의 깊이 0.7~1m에서 동서 15m, 남북 16m의 정면 4칸, 측면 3칸의 직사각형 건물의 기초로 추정되는 반응이 확인됨
4. 첨성대의 직하부에는 기존에 알고 있던 2단의 기단부 외에 깊이 0.6~0.9m, 7×7m 크기의 방형 기단이 확인되며, 이것은 1930년대의 옛 사진과 일치함. 반면에 깊이 1.2~3m에는 타원형(동서 11m, 남북 12m)의 기초시설이 확인되며 첨성대 기단을 중심으로 북·서·동측면은 1m 이내로 짧고 남측면은 5m 정도로 넓게 분포하고 있음*

* 본 논문은 국립문화재연구소가 2019년에 실시한 '디지털 고고과학 기술을 활용한 문화유산복원' 사업의 일환으로 실시한 연구 결과임을 밝힌다.

참고문헌

- 경주시, 2014,『경주 첨성대 정밀구조 안전진단 용역 보고서』
- 국립문화재연구소, 2009,『경주 첨성대 실측 훼손도 평가 조사보고서』
- 국립문화재연구소, 2011,『석조문화재 안전관리 방안 연구보고서 - 첨성대를 중심으로』
- 국립문화재연구소·다인시스템, 2017,『경주 첨성대 자동계측시스템 구축 완료보고서』
- 서금석, 2017,「천문대로서의 첨성대 이설에 대한 재론」『한국고대사학회』86
- 손호웅 외, 2004,「석조구조물의 효율적 유지 관리를 위한 형상역공학적, 지반공학적 및 구조동역학적 특성 연구 -첨성대를 중심으로-」
- 이문규, 2004,「첨성대를 어떻게 볼 것인가 -첨성대 해석의 역사와 신라시대 천문관-」『한국과학사학회』26
- 한국과학기술원(KAIST), 2009,『제4차 첨성대 대토론회』
- 한국물리탐사학회, 2004,『물리탐사 기술 심포지움 -유적조사를 중심으로-』
- Goodman, D., and Piro, S., 2013, GPR remote sensing in archaeology, Heidelberg: Spring
- Park et al., 2012, 'Noninvasive geotechnical site investigation for stability of Cheomseongdae', Journal of Cultural Heritage 13

MUNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies Vol. 52 No. 4, December 2019, pp.264~271.
Copyright©2019, National Research Institute of Cultural Heritage

GPR Analysis on Underground Features and Foundation Structure of Cheomseongdae, Gyeongju

Hyundok Oh* Head of a department, Archaeology Division, Ganghwa National Research Institute of Cultural Heritage
Moonhee Kwon Researcher, Archaeology Division, National Research Institute of Cultural Heritage
Hangilro Jang Researcher, Archaeology Division, National Research Institute of Cultural Heritage
*Corresponding Author : hyundok@gmail.com

Abstract

Cheomseongdae in Gyeongju, known as an astronomical observatory, is a cultural monument with great historical, academic, and artistic value, as its unique shape is preserved well in its original form. The outer structure, ground stability, and seismic reliability of Cheomseongdae have been assessed by numerous researchers through various scientific methods, but research on the underground structure has been insufficient.

This paper contains detailed models of the underground structure of Cheomseongdae interpreted in 2D and 3D images based on the data acquired through GPR surveys conducted of features in and around the base of Cheomseongdae.

As a result, the existence of twelve small features arranged in a circle, although only about half of them remain, was confirmed at a depth of 0.4 – 0.6m. Furthermore, a structure three bays long (north-south direction) and four bays wide (east-west direction) was detected beneath Cheomseongdae at the depth of 0.7 – 1.0m. Other than 2 layers of foundations as is known, a square structure with the dimensions of 7m x 7m is situated at a depth of 0.6m, directly under Cheomseongdae, and what is reading that is expected to be the foundation structure of Cheomseongdae was detected and confirmed. This foundation structure is circular with a diameter in the east-west direction of 11m and in the north-south direction of 12m.

The northern, western, and eastern edges of this foundation structure are about 1m away from the foundation of Cheomseongdae, whereas the the south side extends to about 5m wide.

Keywords Cheomseongdae, Ground Penetrating Radar (GPR), Features in the Vicinity, Cheomseongdae Foundation, 3D image

Received 2019. 09. 30 • **Revised** 2019. 10. 21 • **Accepted** 2019. 10. 30