

감은사지 3층석탑(서탑)의 지반 특성을 위한 지구물리탐사

서만철* · 최희수** · 이찬희* · 오진용*

*공주대학교 문화재비파괴진단연구소

** (주)고려구조ENG

요 약

경상북도 경주시 양북면 용당리 감은사지터에 위치한 쌍둥이 3층석탑(전체높이 약 13.4 m, 기단 폭 6.78 m x 4.4 m)은 682년에 건립된 국내 최대 3층 석탑으로 국보급 문화재이다. 3층석탑의 서탑(이하 감은사지서탑)은 1959년에 해체 수리되었으나, 현재는 석탑 석재인 화강섬록암의 심한 풍화가 관찰되며, 탑의 구조적 불균형에 의하여 생겨난 하중의 편중으로 일부 옥개석 사이가 역 V자 형태로 벌어져 있다. 일반적으로 석탑 안정성 진단을 위해서는 석탑과 인근의 지반환경을 이해하는 것이 필수적이다. 이 연구에서는 감은사지서탑 주변에서 탄성파탐사와 전기비저항탐사의 복합 지구물리탐사를 실시하였다. 웨너법에 의한 천부층의 전기비저항 수평 분포는 55~350 Ωm의 범위인데, 대체로 석탑 남서측면이 상대적으로 높은 비저항인 반면 북동측은 100 Ωm이하의 낮은 비저항 지역으로서 연약지반으로 해석된다. 이는 동측 방향으로의 구조적인 기울임이 관찰된 석탑의 변위측정 결과와 부합한다. 탄성파 굴절법 탐사에 의하면 석탑인근의 약 3 m 두께의 최상부층의 탄성과 P파 속도범위는 200~700 m/s이다. 복합지구물리 탐사결과 나타난 감은사지서탑의 기초는 약 11 m x 11 m의 장방형 형태로 약 3 m 깊이까지 분포하는 것으로 해석된다.

주요어: 지반특성, 감은사지석탑, 탄성파탐사, 전기비저항탐사

Mancheol Suh, Huisoo Choi, Chan Hee Lee, and Jinyong Oh, 2003, Geophysical exploration for the site characteristics of the western three-story stone pagoda in Gameum Temple. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 6, n. 1, p. 39-46

ABSTRACT: Twin stone pagodas of the ruins of Kamunsa temple at Kyongju city, Kyungsangbukdo were believed to be built in 682 during the Unified Shilla Kingdom. The 13.4-m-high granodiolite pagodas with the base of 6.78 m x 4.4 m are the largest three-story stone pagoda in Korea. The western pagoda which was re-organized in 1959 is observed to be on the process of severe weathering. Also, some stone contacts are represented by the shape of sharp chevron, which is probably caused by the uneven loading due to the structural unbalance. For the structure-safety diagnosis of the western pagoda, it is necessary to understand its site characteristics and surrounding subsurface environment. Combined geophysical survey such as seismic and resistivity methods was carried out around the western pagoda. The range of 55~350 Ωm is shown around the pagoda from the electrical resistivity mapping by the Wenner method. The higher resistivities occur the southwestern area, while the lower (<100 Ωm) values indicating the weaker subsurface appear to be on the northeastern area. This result coincides with the measurement of a leaning angle of the pagoda. Along 6 seismic lines, about 3-m-thick uppermost section around the pagoda shows the P-wave velocity of 200~700 m/s from the refraction survey. Based on the integrated geophysical survey, the foundation of the pagoda is estimated to be in the form of 11-m-side square down to the depth of 3 m.

Key words: site characteristics, Kamunsa stone pagoda, seismic survey, electrical resistivity survey

(Mancheol Suh, Chan Hee Lee and Jinyong Oh, Nondestructive Research Lab. Cultural Property, Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea, E-mail: mcsuh@kongju.ac.kr; Huisoo Choi, Korea Structure Engineering Co., E-mail: choi06@hanmail.net)

1. 서 론

지구물리탐사가 고고학 분야의 연구에 적용되기 시작한 것은 1940년대 이후이다. 조속한 기간 내에 매장된 유적을 찾아내는 장점 등으로 지구물리학적 방법이 고고학적 발굴에 많은 도움을 주었다. 문화재 발굴분야 뿐만 아니라 정밀한 진단이 우선적으로 요구되는 문화재 보존분야에서도 비파괴 진단을 목적으로 하는 고해상 지구물리탐사의 가치가 널리 인식되면서 활용 기회는 점점 커지고 있다. 국내 고고학계에 비파괴 지구물리탐사 방법이 소개된 이래(김유선, 1997; 임효재, 1997), 유적지 탐사 및 거동관찰 등에 대한 여러 지구물리탐사가 수행되었다(서만철 외, 1977; 서만철 · 이남석, 2000; 김기현 · 서만철, 2001; Suh, 2001).

국내에서는 석탑, 석불, 부도, 당간지주, 비석, 성곽 등의 석조문화재가 비교적 많이 산재하여 있다. 전반적으로 다른 문화재에 비하여 석조문화재 보존을 위한 지구물리탐사의 활용성이 많은 편이다. 석조문화재에 대한 지구물리학적 접근 방법은 석조물 지반에 대한 비파괴 지구물리탐사를 통하여 지반의 구조와 지층의 상태를 파악하거나(류제라 · 서만철, 2001; 오선환 · 서만철, 2001; 이성민 외, 2002; 서만철 외, 2002) 초음파 탐사를 통하여 석재의 물성을 측정 하는 것이다(서만철 외, 2001). 일반적으로 석조문화재의 육안조사를 통하여 얻어진 부재 사이의 접촉부상태, 거동관찰과 변위조사 등의 관찰내용은 문화재 주변 환경에 대한 지구물리탐사 해석결과와 비교하여 관찰 결과의 원인분석은 물론 나아가 문화재의 구조안전진단이 이루어 질 수 있게한다. 일반적으로, 석조문화재를 훼손시키는 주된 요인은 풍화에 따른 훼손인데, 우리나라의 자연환경을 고려할 때 주로 빗물, 대기오염, 지하습기, 염분, 기온변화, 생물서식 등에 기인하며, 인위적 훼손도 가끔 관찰된다(김수진, 2001).

이 연구는 경상북도 경주시 양북면 용당리에 위치한 감은사지 3층석탑 부근의 지반구조를 알아내는데 목적이 있다. 연구 기초는 2001년에 경북 경주시청 주관으로 감은사지서탑의 정밀안전

진단을 수행하는 과정에서 실시한 석재의 물성조사 및 지반구조를 위한 지구물리탐사에 근거한다. 특히, 이 연구에서는 탐사자료의 신뢰성을 높이기 위해 감은사지서탑을 중심으로 주변 지역에 복합 지구물리탐사 방법을 적용하였고 그 결과들을 종합하여 석탑 주변의 지반구조를 파악하였다. 이 연구에서 밝혀진 석탑의 주변 지반에 대한 지질 정보는 석탑 안정화에 필요한 방안을 제시할 수 있다. 그 밖의 활용방안으로서는 감은사지 문화재에 대한 추후 보수 · 보강이 필요하거나 유지관리를 할 때 기본 자료로서 이용할 수 있다. 그리고 향후 국내외 석조물과 관련된 문화재 안전진단을 실시할 때 참고자료로서의 가치가 있다.

2. 감은사지 석탑과 인근 지질 및 암석

감은사는 신라 신문왕 2년(682년)에 낙성된 사찰이지만 현재는 2개의 3층석탑만 남아있다(김재원 · 윤무병, 1960; 이상현, 1996). 화강암의 2층기단 위에 세워진 두 3층탑은 거의 동일한 형태로 서로 마주 바라보고 있는데 위치에 따라 동탑과 서탑으로 알려져 있다. 전체높이 약 13.4 m, 기단폭 6.78 m x 4.4 m에 달하는 두 탑은 국보 제112호로 지정된 신라 최대의 3층 석탑이다. 감은사지는 1959년에 국립중앙박물관에서 처음으로 발굴 조사하였으며 이 때 서탑을 해체 수리하였다. Fig. 1은 감은사지 3층석탑의 서탑(이하 감은사지서탑) 남쪽면을 보여준다.

감은사지서탑의 기단부의 각 면과 모서리 및 각 탑신과 옥개석의 면이나 모서리에는 양파껍질 모양으로 발달되는 박리와 탈락이 많으며 표면의 요철과 공동화 현상 및 토양화 작용도 관찰된다. 이러한 현상은 감은사지서탑이 심한 풍화를 겪어서 암석의 강도가 약해짐에 따라 발생하는 암석학적인 문제점이다. 이는 직사광선 및 해수분무의 영향이 심할 것으로 보이는 동남쪽에서 심하였다. 또 다른 문제점은 탑의 구조적 불균형에 의하여 생겨난 하중의 편중으로 옥개석의 틈은 역 V자형으로 벌어져 있다는 것이다. 현재 감은사지서탑은 전반적으로 남동방향으로 약 1°의 경사를 보이고 있다. 이 정도의 경사는 탑의 안정성에 크게

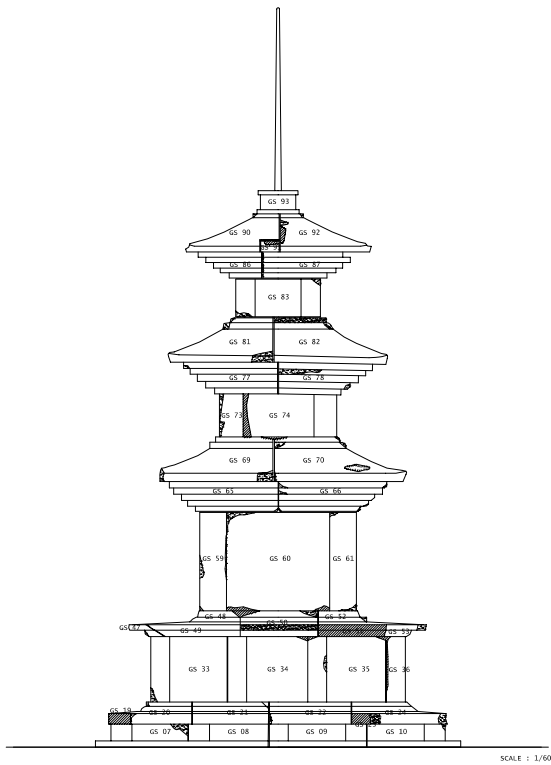


Fig. 1. The southward-facing view of the western pagoda of Gameun Temple. Numbers represent each stone block.

영향을 끼치지 않지만, 석탑 주변지반의 특성과 관련이 있는 것으로 여겨진다.

감은사지 3층석탑의 동탑(이하 감은사지동탑)은 1995년에 부재의 이탈 때문에 해체보수를 실시하여 지대석과 같은 탈락 부재에 대하여서는 동질의 석재로 복원 교체하였고, 파손 및 균열이 있는 부재는 합성수지 접착복원 등의 보존처리를 실시하였다(이상헌, 1996). 그러나, 2002년 7월에는 1층 옥개석 받침부재의 일부가 탈락하기도 하였다. 국립문화재연구소는 접합부 사이로 유입되는 빗물에 의하여 균열 및 박리현상이 심한 일부 부분이 탈락한 것으로 추정하였다.

감은사지가 위치한 경상북도 감포 지역은 백악기 퇴적암류와 이를 덮고 있거나 또는 관입하고 있는 백악기 말에서 에오세의 화성암류로 이루어져 있다(Fig. 2). 퇴적암류는 하양층군의 대구층에 해당되는 것으로 주로 암회색의 세일과 적색사암으로 구성되며, 지역에 따라서 역암층이 소규모로

분포한다. 백악기 말에서 제 3기에 분출한 화산암류는 주로 암회색의 안산암질 응회암과 담홍색 또는 연녹색의 유문암질 응회암으로 이루어져 있다. 제3기초에서 에오세동안에 관입한 화강암류는 광물조성에 따라 각섬석-흑운모 화강섬록암 그리고 알칼리 화강암으로 분류된다. 토합산을 중심으로 동부 지역에 분포하는 각섬석-흑운모 화강섬록암은 중립질에서 조립질 암상을 보이며 석영, 사장석, 알칼리 장석, 흑운모 및 각섬석이 주 구성광물이다. 알칼리 화강암은 경주시 남산을 중심으로 소규모로 분포하는데 중립 내지 조립질의 담색을 보이며, 주구성 광물은 알칼리장석, 석영, 흑운모 및 각섬석이다. Lee *et al.*(1995)에 의하면 이들 화강암류들의 분류에 의하면 화강섬록암에서 알카리 화강암에 해당되고, 절대연령측정에 의하면 각섬석-흑운모화강암과 흑운모화강암은 47.6 ~ 50.0 백만년 그리고 알카리 화강암은 46.5±0.9 백만년 사이에 관입한 것으로 생각된다.

감은사지서탑을 구성하고 있는 암석은 암석기재적, 화학적 및 조암광물로 보아서 명명이 쉽지 않은 암석이다. 풍화양상은 일견 응회암으로도 오인될 수 있으나, 암석명은 대소의 염기성(섬록암질암) 포획암을 많이 가지고 있으며 부분적으로 반정을 가지고 있는 화강섬록암으로 중립질의 괴상을 나타낸다. 암석의 색은 암회색이나 풍화면은 보통 담갈색을 띤다. 입자들의 크기는 비슷하나 유색광물인 흑운모는 약간 작은 편이다. 암석의 표면에 아주 작은 공극들이 발달되어 있는데 이는 기공인 1차적인 것과 풍화에 의해 석영 입자들이 부분적으로 떨어져 나가 형성된 2차적인 것으로 구분이 된다. 심하게 풍화되어 떨어져 나온 암석 파편을 박편으로 제작하여 현미경하에서 관찰한 바에 의하면, 이 암석은 주로 석영, 사장석 및 흑운모로 구성되어 있으며, 소량의 정장석, 미사장석, 백운모, 불투명광물 및 녹염석 등이 수반된다. 감은사지서탑의 암석중 기공이 발달하거나 포획물을 함유하는 경우가 있는데 이로부터 흑운모를 소량 함유하는 석영이 풍부한 화강암은 이 지역에 비교적 넓게 분포하고 있는 각섬석-흑운모화강섬록암의 연변부에 발달하는 암상임을 지시하여준다. 감은사지 3층석탑에서 떨어져 나온

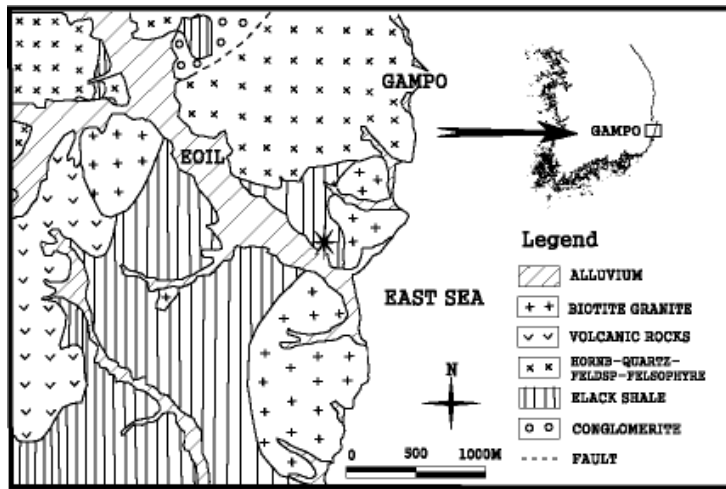


Fig. 2. Location map with geological boundaries (modified from Lee *et al.*, 1995). Star symbol represents the location of Gameun Temple.

시료의 일부를 분석한 결과를 Lee *et al.*(1995)의 분류와 비교하면 각섬석-흑운모 화강섬록암의 것과 매우 비슷하다. 한편, 감은사지 인근에 있는 비슷한 형성시기의 신라시대 석탑인 불국사 석가탑과 다보탑의 석재는 화강암이나 그 근원에 대하여 토함산 화강섬록암(김수진 외, 2000) 또는 남산 알카리화강암(좌용주 외, 2000)이라는 의견이 있다.

3. 지구물리탐사

3.1. 측선

감은사지서탑을 중심으로 측점 간격이 1 m인 20 m × 24 m의 격자(grid)를 설정하였다(Fig. 3). 격자의 기준점은 남서방향 모서리이며, 지구물리탐사는 2001년 6월에 실시하였다. 설정된 격자에서 전기비저항 탐사를 위하여 평행한 21개 측선에서 수평탐사와 2개의 측선에서 수직탐사를 실시하였다. 탄성파 탐사는 6개 측선을 따라서 수행하였다. 전기비저항 탐사기기는 OYO사의 McOHM Mark-2이며, 탄성파기록은 OYO GEO-SPACE사의 DAS-1 system을 사용하였다.

3.2. 탐사 방법

3.2.1. 전기비저항 탐사

탐을 중심으로 주변지역의 전기비저항 수평적

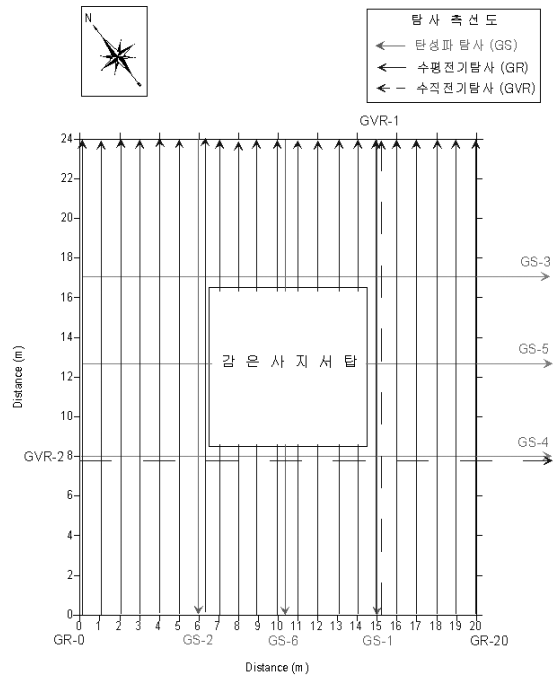


Fig. 3. Survey lines around the western pagoda(square in the middle) in Gameun Temple. Red lines are for seismic methods and blue lines are for resistivity measurements using sounding(solid) and profiling(dashed) methods.

변화를 살펴보기 위하여 측선 GR-0부터 GR-20까지 21개의 측선(각 측선 길이 24 m, 측선 간격 1 m)에서 웨너배열(Wenner array)을 이용한 수평탐사를 실시하였다(Fig. 3). 각 측선에 대해서 전

극간격은 1 m, 측정간의 간격은 1 m로 유지한 상태에서 전류전극, 전위전극을 이동하였고, 자료의 신뢰성을 높이기 위해 한 측정점에서 4회씩 반복 측정하였다. 측정수치가 일정치 않을 경우 16회 반복 측정으로 조사의 정확성을 기하였다. Fig. 4a는 수평탐사 결과를 보여주는데 전반적으로 56~351 Ω-m의 범위를 보인다.

전기비저항의 수직적인 변화를 파악하기 위하여 탑의 동측면(GDR-1)과 서측면(GDR-2)에 각각 1개 측선을 설치하여 전극간격을 1 m에서 9 m까지 변화시켜 수직 탐사를 실시하였다(Fig. 3). 측정자료는 겉보기비저항값으로 변환시킨후 상용프로그램(Interpex사의 Resix)을 이용하여 각 측선의 지하 지질구조에 대한 2차원 전기비저항 단면도를 제작하였다(Fig. 4b).

3.2.2. 탄성과 탐사

탄성과 탐사에 이용된 에너지원-수진기 배열방식은 일렬식 전개(end-on spread)이다. 사용된 에너지원은 2 kg 해머를 이용한 철판 타격이며, 1 회 타격 후 도달되는 파형을 관찰하여 적합한 자료로 판단할 때 기록을 하였다. 사용한 수진기의 고유주파수(natural frequency)가 14 Hz이며, OYO사의 DAS-1 기록계에 기록하였다. 단일채널

반사단면도 작성을 위하여 GS-1, GS-2, GS-3, GS-4 측선에서 반사법 탐사를 실시하였다(Fig. 3). 송수신기 간격은 1 m를 유지하였고, 기록된 각 트레이스(trace) 길이는 300 ms(샘플링 간격 0.125 ms)이다. 저장된 야외자료는 필터링과 같은 전처리 과정을 생략한 기록이다. 탑의 동쪽(GS-1)과 서쪽(GS-2) 측선의 단일채널 반사단면도를 Fig. 5에 제시하였다.

굴절법 탐사의 경우 남북 방향의 GS-1, GS-2, GS-6, 동서 방향의 GS-3, GS-4, GS-5의 측선에서 실시하였다(Fig. 3). 수신기 간격은 모두 1 m로 하였으며, 발파점과 최초 수신기간의 거리(offset) 또한 1 m로 하였다. 정방향과 역방향의 측정자료에서 각 채널에 기록된 초동시각(first arrival time)을 판별하여 주시곡선(time-distance curve) 작성한 후, 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 최적 직선의 기울기와 그 절편을 구하여 해당 측정 구간간의 탄성과속도와 각 층의 두께를 구한다. 이 연구에서는 상용프로그램(Intelligent Resources사의 RAYFRACT)을 이용하여 연속 측정들의 주시곡선으로부터 전체 측선의 2차원 탄성과 속도분포도를 작성하였다. 탑의 북쪽(GS-3)과 남쪽(GS-4) 측선을 따라서 얻어진 속도단면도를 Fig. 6에 제시하였다.

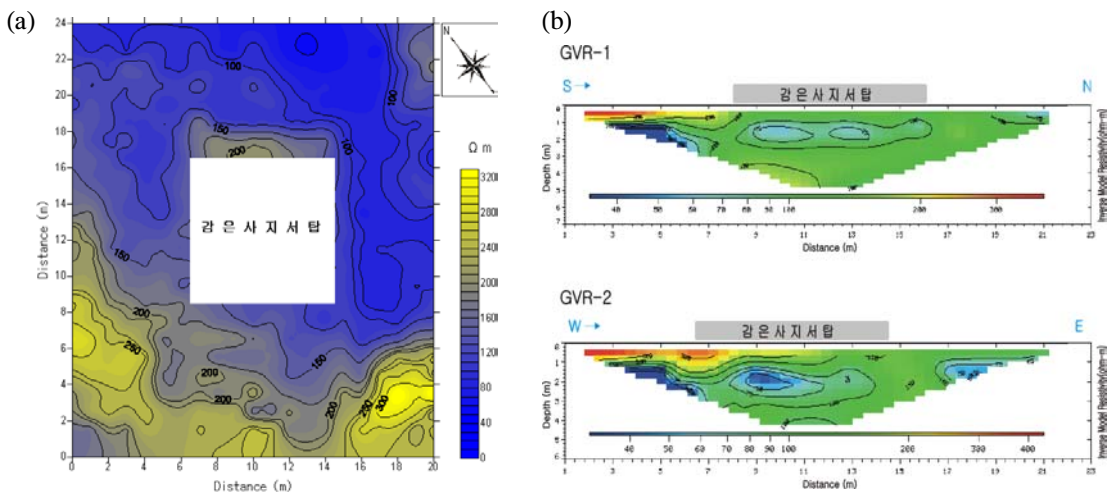


Fig. 4. (a) Resistivity map around the pagoda using the Wenner sounding method with the pole interval of 1 m. See Fig. 3 for the location, (b) Resistivity profiles obtained by the Wenner method along GVR-1(upper) and GVR-2(lower) near the western pagoda in Gameun Temple. See Fig. 3 for the location.

4. 지반환경 해석 및 토의

4.1. 석탑 부근의 지반환경

굴절법 탄성과 탐사에서 얻은 속도에 근거하여 감은사지서탑 부근 천부지층의 속도구조를 4층으로 나누었다. 제시한 각 층의 속도 및 두께 결정은 건설부 표준품셈의 암반기준 분류에 의한 탄성과속도 범위를 기준으로 하였다. 최상부층 탄성과 속도는 약 200~700 m/s의 범위를 갖는데 이는 다져지지 않은 풍화토에 해당하는 값이며 2층은 약 700~1200 m/s의 탄성과 속도를 갖으며 풍화암층에 해당한다. 3층은 약 1200~1900 m/s의 탄성과 속도를 갖는 연암층에 해당하며, 4층은 1900 m/s 이상의 탄성과 속도를 갖는 보통암층에 해당한다. 층간 경계면 분포를 살펴보면 1층과 2층의 경계면은 0.3~3.2 m 사이에 위치하며, 2층과 3층의 경계면은 1.5~7.7 m 범위의 깊이 분포를 갖고, 3층과 4층의 경계면은 3.9~11.5 m 범위에 놓인다.

전극간격 1 m의 전기비저항 수평탐사에서는 전반적으로 55~350 Ωm의 범위를 보이는데 대체적으로 탑을 기준으로 남측면과 서측면 인접지역이 북측면이나 동측면 인접 지역보다 상대적으로 높은 비저항 분포로 보여준다(Fig. 4a). 이 결과는 석탑이 동쪽 방향으로 경사도를 보이는 것

과 부합한다. 이러한 탑의 천부지층의 상대적인 전기비저항 값의 차이는 감은사지 부지의 지하수의 유출에 의한 결과로 해석된다.

4.2. 석탑 기반의 비교

전기비저항 및 탄성과 탐사 결과를 종합하면 감은사지서탑의 지반은 동서방향으로 약 11 m, 남북방향으로 약 11 m의 장방형 형태로서 약 3 m 깊이 까지 분포하는 것으로 해석된다. 감은사지서탑의 지반 형태는 인근의 불국사의 석가탑과 다보탑과 비교된다. 불국사의 두 석탑은 감은사지 석탑보다 약 70년 후에 세워진 주요 문화재이다. 지구물리탐사에 의해 밝혀진 다보탑지반은 한 번의 길이가 약 6 m인 8각형으로 약 4 m 깊이까지 연장되어 있고, 석가탑지반은 약 9 m x 10 m의 직사각형으로 약 3 m 깊이까지 분포하는 것으로 알려져 있다(서만철 외, 2002). 이러한 지하구조의 형태를 근거로 석탑건립 당시 주변부보다 깊게 지반을 파서 기초를 다지고 그 상부에 석탑들을 놓았다고 판단한다.

4.3. 석탑 지반의 허용지지력 추정

일반적으로 지반이 갖는 허용지지력을 알아내기 위해서는 표준관입시험에 의한 N치를 산출하는 것이 필요하다. 그러나, 문화재 특성 때문에

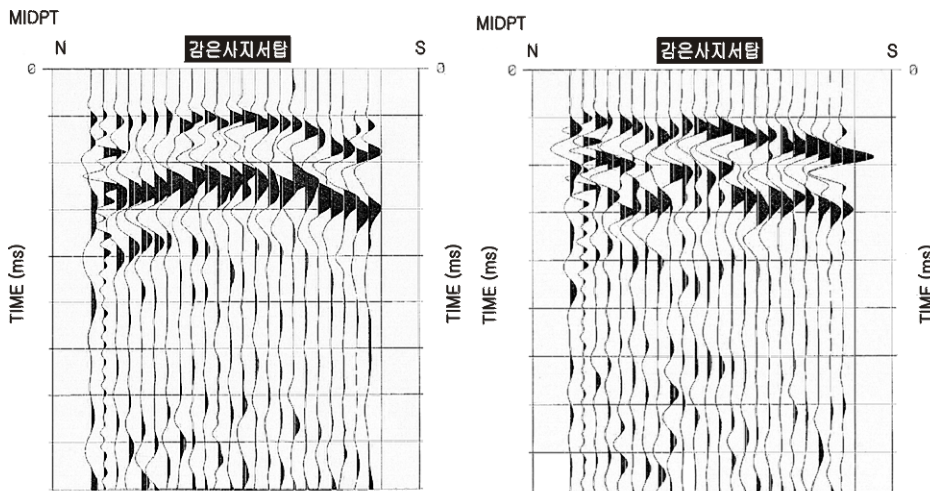


Fig. 5. Single-channel reflection profiles along GS-1(right) and GS-2(left) near the western pagoda in Gameun Temple. See Fig. 3 for the location.

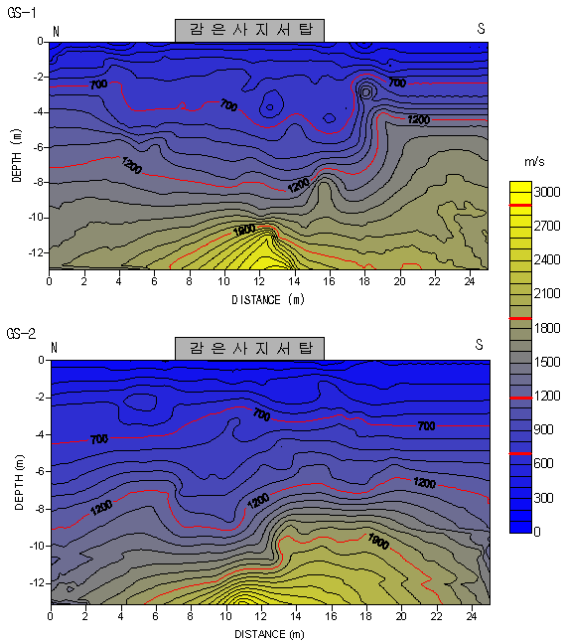


Fig. 6. P-wave seismic velocity profiles along GS-1(upper) and GS-2(lower) near the western pagoda in Gameun Temple. See Fig. 3 for the location.

감은사지서탑 지반의 N값은 탄성파를 이용한 간접적인 방법으로 추정하였다. 탄성과 축선을 따라서 굴절과 탐사에 의한 P파 전파속도를 구한 후 미고결층에 대한 P파와 S파 속도간의 경험식을 활용하여 S파 속도를 구하였다. 감은사지서탑 지반 표층의 P파 속도는 350~500 m/s의 범위이며, 이 P파 속도로부터 경험식을 이용하여 구한 S파 속도는 140~200 m/s의 범위이고, 다시 N값으로 환산하면 약 5 정도에 해당한다. 한편, 불국사의 석가탑과 다보탑 지반의 N값은 같은 방법에 의해 각각 약 5와 6 정도로 추정된다(서만철 외, 2002).

표준관입시험에 의한 5~6 범위의 N값은 연약 지반에 해당되는 값이다. 한편, 감은사지서탑 지반의 표층에 해당하는 P파 속도 350~500 m/s는 건설교통부 기준 암반분류에 의하면 풍화토층에 대비되는데, 여기서는 미고결층으로 해석한다. 이러한 탄성과 속도 범위는 우리나라 전통적인 석탑지반 축조과정에 의해 형성된 사질토층-진흙층의 교호되는 다짐층에 해당된다고 판단한다.

5. 결론

전기비저항탐사와 탄성과 탐사를 통하여 밝혀진 감은사지서탑의 지반에 대한 탐사 결과는 다음과 같다.

1. 감은사지서탑 기초의 형태는 약 11 m x 11 m의 장방형 모습을 하고 있으며 약 3 m 깊이인 것으로 해석된다.
2. 감은사지서탑 천부지반에 대한 전기비저항 탐사 결과 전반적으로 55~350 Ωm의 범위를 보이고 있으며, 대체적으로 탑을 기준으로 남측면과 서측면 인접지역이 북측면이나 동측면 지역보다 상대적으로 높은 비저항 분포로 나타났다.
3. 감은사지서탑 지반의 P파 속도는 350~500 m/s, S파 속도는 140~200 m/s의 범위를 보이며 N값은 약 5 정도로 해석된다.

사 사

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업으로 지원된 공주대학교 자연과학대학 문화재비파괴진단연구실의 재정적 도움으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김기현, 서만철, 2001, 공주 능치지역 천부 지하구조에 대한 지구물리학적 연구, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 2, 103-111.
- 김수진, 여상진, 장세정, 성소영, 이범한, 2000, 불국사 다보탑의 훼손현황과 보존대책. 한국문화재보존과학회, 제12차 학술회의 논문집, 19-26.
- 김수진, 2001, 한국의 석조문화재 보존, 문화재 보존에 있어서의 지질학의 역할(서만철 편집), 대한지질학회·대한자원환경지질학회, 제17차 학술강연회 논문집, 16-26.
- 김유선, 1997, 매장문화재의 과학적보존 개요, 보존과학회지, 6, 100-109.
- 김재원, 윤무병, 1960, 감은사지 발굴조사 보고서, 국립박물관 특별조사 보고 제2편, 국립박물관.
- 류제라, 서만철, 2001, 익산미륵사지 지반특성에 대한 지구물리학적 연구, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 1, 1-10.
- 서만철, 송인선, 최희수, 2001, 암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단, 지구물리 4,

- 1, 57-69.
- 서만철, 오진용, 최희수, 2002, 불국사 석탑의 지반 특성에 대한 지구물리탐사, 대한지구물리학회, 지구물리, 5, 2, 143-151.
- 서만철, 이남석, 2000, 매장문화재 확인을 위한 자력탐사 및 발굴 비교연구: 충남 천안시 두정동 발굴지역, 대한지구물리학회, 지구물리 3, 3, 175-184.
- 서만철, 이창환, 정계옥, 김동현, 1997, 송산리 고분군의 지구물리학적 조사를 통한 고분축조방법 고찰, 보존과학회지, 6, 1, 61-70.
- 오선환, 서만철, 2001, 방어산 마애여래입상의 안전진단을 위한 지구물리탐사, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 1, 11-20.
- 이상헌, 1996, 감은사지 삼층석탑(동탑)과 나원리 5층 석탑의 암석과 풍화현상의 특징에 대한연구. 보존과학회지, 5, 20-40.
- 이성민, 이수곤, 권경원, 백용진, 서만철, 2002, 충주 미륵리 사지내 석굴석축의 구조, 문화재과학기술, 1, 1, 101-115.
- 임효재, 1997, 고고학적 발굴과 출토과정에서의 제문제점, 보존과학회지, 6, 2, 110-118.
- 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여, 대한지질학회, 지질학회지, 36, 3, 335-340.
- Lee, M.J., Lee, J.I. and Lee, M.S., 1995, Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju area, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 31, 6, 583-607.
- Suh, M. 2001, Conservation of the Muryong Royal Tomb of Baekje dynasty, Korea, The Ohio State University, on Campus. 30, 14, 6-10.

2003년 2월 14일 원고접수

2003년 3월 24일 원고채택