

불국사 석탑의 지반 특성에 대한 지구물리탐사

서만철*, 오진용*, 최희수**

*공주대학교 문화재비파괴진단연구소

** (주)고려구조ENG

요 약

서기 751년에 축조되어 20세기에 해체 수리된 경주 불국사의 다보탑(높이 10.4 m, 기단폭 7.4 m, 하중 123.2 ton)과 석가탑(높이 10.8 m, 기단폭 4.4 m, 하중 82.3 ton)은 국보급 문화재이나, 현재 석탑의 풍화는 물론 지대석의 어긋남 현상들이 관찰된다. 이 연구에서는 두 석탑의 안정성 진단에 필요한 지반 특성을 파악하기 위하여 탄성과, 전기비저항, 지하레이다 등의 지구물리탐사를 실시하였다. 전기비저항 분포는 두 석탑 부근에서 최대 2200 Ωm의 값이나 석탑 외부의 지반은 200 Ωm 내외의 낮은 비저항치를 보이며 특히 북쪽 지반이 전반적으로 더 낮은 값을 보인다. 탄성과 P파의 속도분포에서는 다보탑 지반은 500~800 m/s를 보여 300~500 m/s의 범위를 갖는 석가탑 지반보다 상대적으로 견고하다. 이들 결과와 지하레이더 영상을 종합하여 탑의 지반 형태를 파악하였다. 다보탑 지반의 형태는 한 변의 길이가 약 6 m인 8각형 모양으로 약 4 m 깊이를 갖고, 석가탑지반은 약 9 m × 10 m의 직사각형 형태로 약 3 m 깊이까지 분포한다. 이는 석탑 건립 당시 약 8 ton/m²의 탑하중을 견디기 위해 구축한 기초구조로 해석한다. 대체로 두 석탑의 북서쪽 부분이 주변지역보다 낮은 탄성과 속도와 낮은 비저항값이 관찰되는데 이 부분은 연약한 지반으로 판단한다.

주요어: 지반특성, 다보탑, 석가탑, 탄성파탐사, 전기비저항탐사

Mancheol Suh, Jinyong Oh and Huisoo Choi, 2002, Geophysical exploration for the site characteristics of the stone pagodas in Bulguksa Temple. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 2, p. 143-151

ABSTRACT: Bulguksa temple in the city of Kyungju, Korea, built in 791 and reconstructed in the 20th century, is the home of seven national treasures including two three-story stone pagodas, Dabotap (height 10.4 m, width 7.4 m, weight 123.2 ton) and Seokgatap (height 10.8 m, width 4.4 m, weight 82.3 ton). An earlier archaeological investigation shows that stone pagodas have experienced severe weathering process which will threaten their stability. At the base part of Dabotap, an offset of the stone alignment is also observed. For the purpose of the structural safety diagnosis of two pagodas, we introduce the nondestructive geophysical methods. Site characteristics around the pagodas are determined by the measurement of multiple properties such as seismic velocity, resistivity, image of GPR (ground-penetrating radar). Near the pagodas, the occurrence of high resistivity (up to 2200 Ωm) is obvious whereas their outskirts have as low as 200 Ωm. For the velocity of the P wave, the site of Dabotap has the range of 500~800 m/s which is higher than the counterpart of Seokgatap with the velocity of 300~500 m/s, indicating the solid stability of Dabotap site. Consequently, in addition to GPR images, the foundation boundaries beneath each stone pagodas are revealed. The Dabotap site is in the form of an octagon having 6-m-long side with the depth of ~4 m, whereas the Seokgatap site is the 9 m × 10 m rectangle with the depth of 3 m. These subsurface structures appear to reflect the original foundations constructed against the stone load of ~8 ton/m². At the subsurface beneath the northeast of each pagoda, low seismic velocity as well as low resistivity is prominent. It is interpreted to represent the weak underground condition.

Key words: site characteristic, Dabotap, Seokgatap, seismic survey, electrical resistivity survey

(Mancheol Suh, Nondestructive Research Lab. Cultural Property, Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea, E-mail: mcsuh@kongju.ac.kr; Jinyong Oh, Nondestructive Research Lab. Cultural Property, Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea, E-mail: 2002class@hanmail.net; Huisoo Choi, Korea Structure Engineering Co., E-mail: choi06@hanmail.net)

1. 서론

지하 심부 매질의 물성 변화를 파악하기 위해 사용된 지구물리탐사는 넓은 지역을 적절한 시간과 비용으로 수행할 수 있다는 장점 때문에 석유탐사를 비롯한 여러 분야에서 오래 전부터 적용하여 괄목할 만한 성과를 보여주었다. 근래에는 비교적 얇은 지반 탐사에서 지구물리탐사를 적용하여 거대 구조물 건설, 지하수 개발 및 관리, 민감한 환경 지역의 정확한 천부구조 해석 그리고 퇴적물 분포 파악 등에서 효과 있음을 보여주고 있다. 특히, 문화재의 발굴 및 보존에 앞서 정밀한 진단이 우선적으로 요구되는 고고학 분야에서 비파괴 진단을 목적으로 하는 고해상의 지구물리탐사의 활용 기회는 점점 커지고 있다.

국내에서도 지구물리학적 방법을 이용하여 유적지를 찾아내거나(서만철·이남석, 2000; 김기현·서만철, 2001), 유적지에 대한 지속적인 관찰을 하거나(Suh, 2001), 석조문화재 주변의 지반을 조사하거나(류제라·서만철, 2001; 오선환·서만철, 2001; 이성민 외, 2002), 석조물 자체의 물성을 측정하였다(서만철 외, 2001). 국내에서는 석탑, 석불, 부도, 당간지주, 비석, 성곽 등의 석조문화재가 비교적 많이 산재하여 있다. 대체로 석조문화재에 대한 지구물리학적 접근은 석조물을 중심으로 주변 지역의 지반에 대한 비파괴 지구물리탐사를 통하여 지반의 구조와 지층의 상태를 파악하거나 초음파 탐사를 통하여 석재의 물성을 측정하였다. 그 결과는 육안조사를 통하여 얻어진 부재 사이의 접촉부상태, 거동관찰과 변위조사 등의 결과와 비교되는 구조안전진단으로 확인할 수 있다. 일반적으로, 석조문화재를 훼손시키는 주된 요인은 풍화에 따른 훼손이며, 우리나라의 자연환경을 고려할 때, 주로 빗물, 대기오염, 지하습기, 염분, 기온변화, 생물서식 등이며, 인위적 훼손도 가끔 관찰된다(김수진, 2001).

이 연구는 경상북도 경주시 진현동 15번지의 불국사 내에 위치한 “불국사 다보탑”(이하 다보탑)과 “불국사 3층 석탑”(이하 석가탑)부근의 지반구조를 알아내는데 목적이 있다. 이 석탑들은 신라 제35대 경덕왕 10년(서기 751년)에 축조된

것으로 각각 국보 제20호, 국보 제21호로 지정되었으며, 세계문화유산으로 등록되었다. 현재 다보탑의 경우 박리현상의 발생과 미생물체의 서식 등으로 인하여 석탑을 구성하는 부재들이 풍화가 심하게 진행된 상태이다. 석가탑의 경우도 석재의 풍화는 물론 지대석의 어긋남 현상들이 발생하고 있는데 이는 석탑의 안정성 및 지반의 연약함과 관련이 있는 것으로 추정되었다.

이 연구결과를 통해 석탑에 대한 구조안전진단의 방법의 하나로써 지구물리학적 적용의 타당성을 확인한다. 여러 가지 물리탐사 방법을 불국사 석탑을 중심으로 하는 지역에 적용하고 그 결과들을 종합하여 석탑 주변의 지반구조를 파악한다. 국내 석탑지반에 대한 기존연구로는 익산 미륵사지 서탑의 예(류제라·서만철, 2001)가 있는데, 주요 차이점은 이번 연구에서는 격자형의 전기비저항 탐사측선을 설정하여 석탑지반의 정밀한 수평 및 수직변화를 탐지하였다. 지구물리탐사에서 얻어진 석탑의 주변 지반에 대한 지질정보는 석탑 안정화에 필요한 방안을 제시할 수 있으며, 추후 보수·보강이 필요하거나 유지관리를 할 때 기본 자료로서 이용할 수 있다. 그리고 향후 국내의 석조물과 관련된 문화재 안전진단을 실시할 때 참고자료로서 활용할 수 있다.

2. 불국사 부근 지질 및 석탑 환경

불국사는 경주시 북동쪽의 최대 해발고도 745 m의 토함산 중턱에 위치한다. 토함산은 백악기 화강암질 암체로 이루어져 있는데 이들은 기반암인 백악기 퇴적암류를 관입하며 제 3기 화산암 및 퇴적암류에 의하여 덮여 있다(Fig. 1). 이 화강암체를 지나가는 대규모 구조선으로는 북서-남동방향의 울산단층이 있다. 경주 부근의 화강암체에 대하여 Lee *et al.*(1995)는 조성적 차이를 기준으로 3종류, 즉 각섬석 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암, 알칼리 화강암으로 구분하였으며, 이준동·황병훈(1999)은 기재적 차이에 따라 화강섬록암, 세리에이트 화강암, 반상 화강암, 등립질 화강암, 미문상 화강암 및 알칼리 화강암의 6가지 암상 구분하였다.

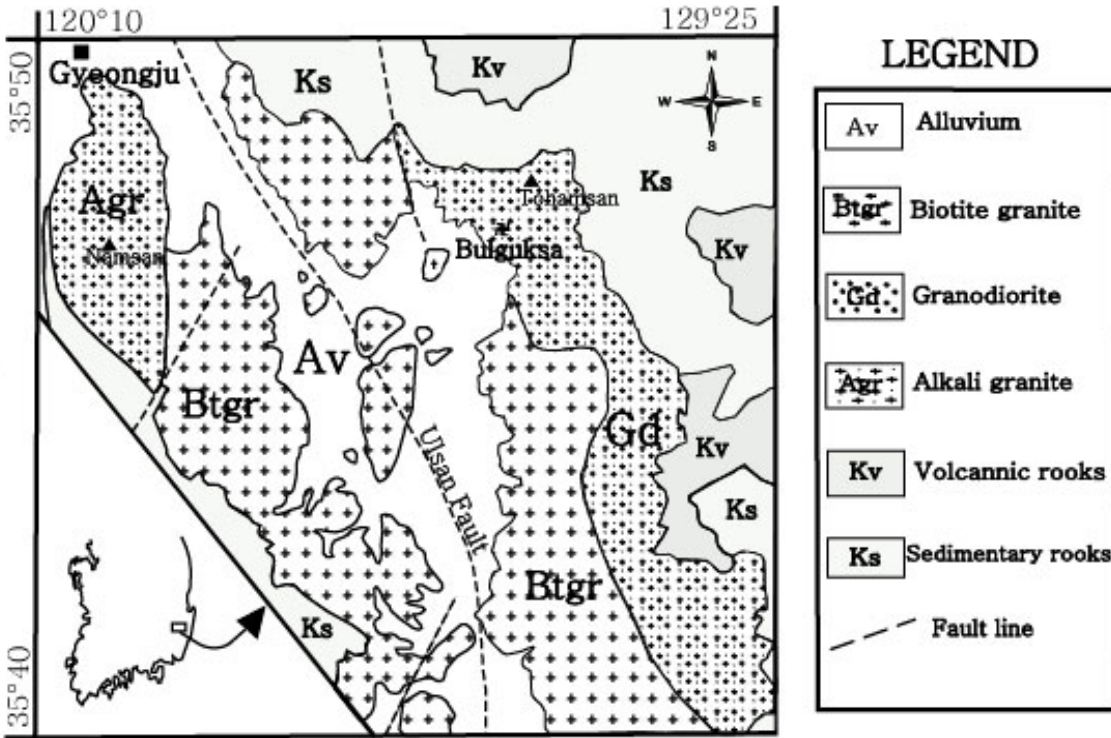


Fig. 1. Location map with geological boundaries (modified from Lee *et al.*, 1995).

각섬석 흑운모 화강섬록암은 토함산 화강섬록암으로 불리는 것으로 중립질 내지 조립질이고 대체로 등립질이며 주 구성광물은 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석, 흑운모 등인데 유색광물의 함량이 많고, 염기성 미립포획체를 많이 포함하는 것이 특징이며, 알칼리 화강암은 흔히 남산 화강암으로 알려져 있는 우백질의 조립질이고 등립질 조직을 보인다. 김수진 외(2000)는 다보탑의 석재는 구성광물과 조직에 근거하여 토함산 화강섬록암에 해당하는 것으로 보았고, 좌용주 외(2000)는 전암 대자율(magnetic susceptibility)을 측정하여 다보탑과 석가탑은 거의 동일한 부재로 되었으며 암석적으로는 남산화강암과 유사함을 주장하였다.

다보탑은 전체높이 10.4 m, 기단폭 7.4 m를 가지며 기단부, 탑신부, 상륜부의 3부분으로 구성되어 있다. 1925년경 일본인이 탑을 완전히 해체, 보수하였는데 당시 발견된 유물 및 수리 기록은 남아 있지 않다. 높이 10.8 m, 기단폭 4.4 m의 석가탑은 전체가 3층으로 2층의 기단위에 세워져 있고, 기

단부는 여러 개의 장대석으로 구축된 지대석 위에 놓여있다. 석가탑 역시 1925년 일본인에 의해 수리된 바 있고, 1966년 도굴범에 의한 석탑 훼손으로 그 해 12월 해체 수리작업이 이루어졌으며, 1972년에는 상륜부의 복원을 완료하였다. 현재 석가탑은 지반의 약화에 의하여 기단부의 각 면과 모서리, 그리고 각 탑신의 면이나 모서리에서 이격이 아주 심하며 중앙부는 침강하고 양단은 융기한 모양을 보인다. 특히, 서쪽 기단부가 균열이 심하며, 탑의 구조적 불균형에 의한 하중 편중으로 인하여 1층 탑신부 바로 밑 기단석 상부의 각 부재 틈이 역 V자 형으로 벌어져 있다. 초음파 측정에 의한 석가탑 부재의 일축압축강도의 범위는 134 ~ 844 kg/cm²이다(서만철 외, 2001).

1990년대에 경주를 포함하는 포항-울산 지역은 제4기 단층운동의 결과가 다수 발견되어 활성단층 및 지진에 대한 지반안정성 논의가 있는 지역이다(Kyung, 1997; 최범영 외, 2002). 역사적 지진분석에 의하면 경주 인근에 비교적 큰 지진이

발생한 것으로 알려져 있는데 779년의 지진으로 100여명 사망한 한반도에서 가장 큰 인명피해가 있었다(이기화, 1998). 경주부근에 진앙을 갖는 가장 최근의 계기지진으로는 1997년 6월 26일에 규모 4.2의 지진이 보고 되었다.

3. 지구물리탐사

3.1. 측선

다보탑과 석가탑을 중심으로 남서방향의 모서리 부분에 각각의 기준점(base point)을 설정하고, 이를 기준으로 측점 간격이 1m인 18 m × 24 m 크기의 격자(grid)를 구성하였다(Fig. 2). 설정된 각각의 격자에서 탄성파탐사는 6-7개 측선, 지하레이다 탐사는 4개 측선, 전기비저항 탐사는 20개 측선에서 실시되었다.

3.2. 탐사 방법

3.2.1. 탄성파 탐사

탄성파탐사는 다보탑과 석가탑 부근에서는 각각 남북방향 2개 측선과 동서방향 2개 측선을 설

치하여 총 8개 측선을 전개하였다(Fig. 2). 다보탑의 전체 측선 연장 길이를 126 m이며, 석가탑은 145m이다. 수신기(geophone) 간격은 모두 1 m로 하였으며, 발파점과 최초 수신기간의 거리(offset) 또한 1m로 하였다. 굴절법 및 반사법 탄성파탐사에 사용된 에너지원은 2kg 소형 해머로서 1회 타격 후 14 Hz 수신기를 이용하여 OYO사의 DAS-1 system에 기록하였다. 얻어진 모든 측정자료(shot gather)로부터 1 m의 송수신 간격을 갖는 자료를 취합하여 단일채널 반사파단면도를 작성하였다.

현장에서 디지털 방식으로 기록된 정방향과 역방향의 측정자료는 실내작업을 통하여 각 채널 기록에서 초동시각(first arrival time)을 읽어서 주시곡선(time-distance curve)을 작성하였다. 측정별 주시곡선에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 최적 직선의 기울기와 절편을 구하여 측정 구간의 탄성파속도와 각 층의 두께를 구한다. 이 연구에서는 상용프로그램(Intelligent Resources사의 RAYFRACT)을 이용하여 연속 측정들의 주시곡선으로부터 전체 측선의 2차원 탄성파 속도분포도를 작성하였다. Fig. 3a

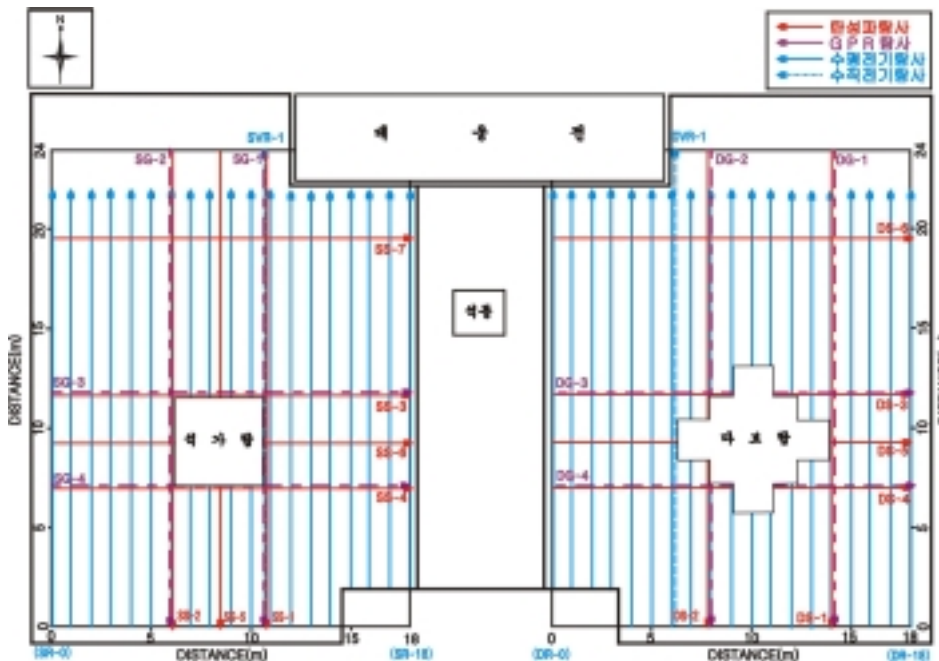


Fig. 2. Survey lines around two stone pagodas in Bulkuk Temple.

와 Fig. 3b는 각각 석가탑과 다보탑 부근의 일부 측선들에 대한 탄성과 속도분포도이다.

3.2.2. 지하레이다 탐사

이 연구에서는 중심주파수 250 MHz의 안테나를 선택하였다. 다보탑 부근에서는 길이가 24 m인 남북방향의 2개 측선과 길이가 18 m인 동서방향의 2개 측선에서 실시하였다(Fig. 2). 측선에서의 취득간격은 1 cm, 트레이스당 샘플수는 512, 샘플링 주파수는 2555.56 MHz, 그리고 중합(stacking)은 4~8로 하여 탐사를 실시하였다. 한편, 석가탑 부근에서는 길이가 22 m인 남북방향 2개 측선과 길이가 18 m인 동서방향의 2개 측선에서 실시하였다. 측선에서의 취득간격은 5 cm, 트레이스당 샘플수는 512, 샘플링 주파수는 1022.22 MHz, 그리고 stacking은 4~8로 하였다. 사용한 탐사장비는 스웨덴 MALA GeoScience의 RAMAC/GPR 제품이다.

일반적으로 전자기파는 지하 매질로 방사됨에 따라 그 진폭이 기하급수적으로 감쇠하게 된다. 이렇게 감쇠되어 미약하게 나타나는 반사파를 전

체 시간대역에서 반사와 진폭이 균일하게 나타나도록 하기 위하여 이득보정을 실시하게 된다. 또한 탐사 자료에는 잡음이 상당히 많이 섞여 있는데, 잡음을 감쇠시키고 부드러운 영상을 얻기 위해 인접샘플의 평균값을 계산하여 그 값을 중심샘플의 값으로 정하는 평균 필터링을 거친다.

3.2.3. 전기비저항 탐사

전기비저항탐사는 다보탑과 석가탑 지반에 대하여 남북방향 19개의 수평탐사 측선과 다보탑의 좌측면과 석가탑의 우측면 각각 1개씩의 수직탐사 측선을 배열하였다(Fig. 2). 사용한 탐사기기는 OYO사의 McOHM Mark-2이다. 수평탐사는 전극간격 1 m의 Wenner 배열을 이용하였는데, 자료의 신뢰성을 높이기 위해 한 측정점에서 4회씩 반복 측정하였으며, 측정수치가 일정치 않을 경우 16회 반복 측정으로 측정의 정확성을 기하였다. 수직탐사에서 전극간격을 1~9 m로 점차 증가시키는 Wenner 배열법을 활용하여 석탑 지하의 2차원 전기비저항 분포를 파악하였다.

수평탐사 자료는 겉보기 비저항(apparent resis-

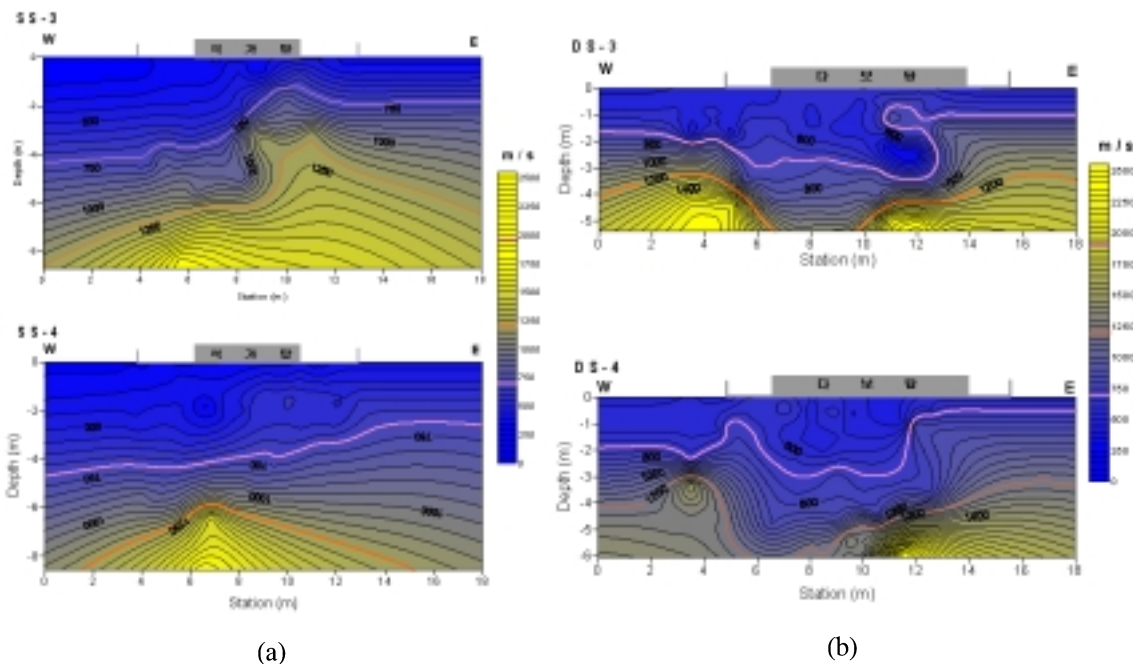
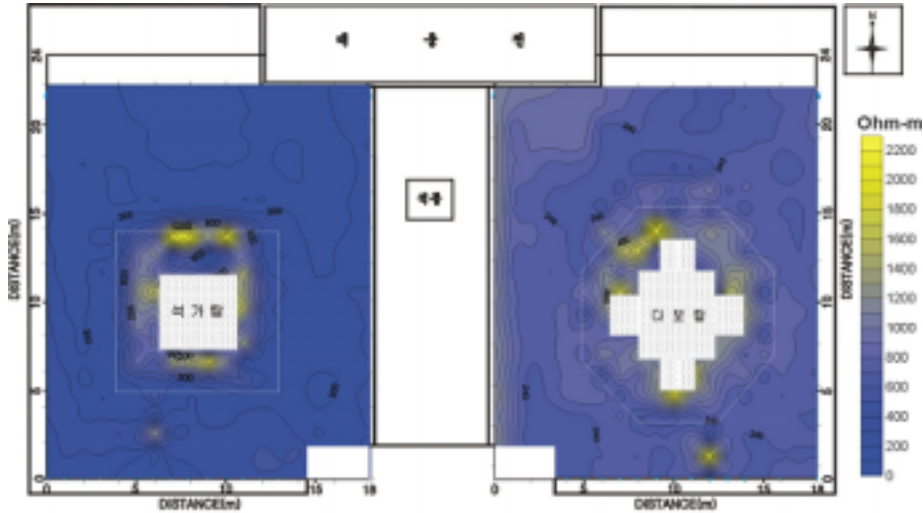


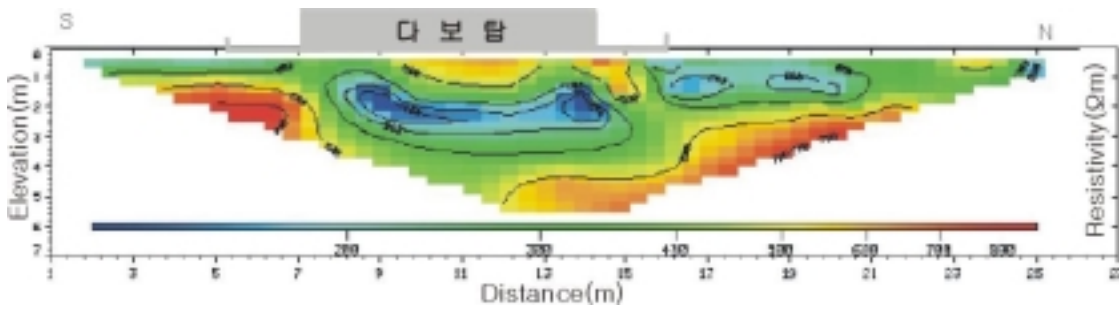
Fig. 3. (a) Seismic velocity structures along the selected survey lines in the Seokgatap site. See Fig. 2 for the location, (b) Seismic velocity structures along the selected survey lines in the Dabotap site. See Fig. 2 for the location.

tivity)으로 전환하고, 전환된 겉보기 비저항치를 이용하여 각 측선별로 비저항의 분포와 지반의 변화 경향을 도시하였다(Fig. 4a). 역산에 의한 지하 지질

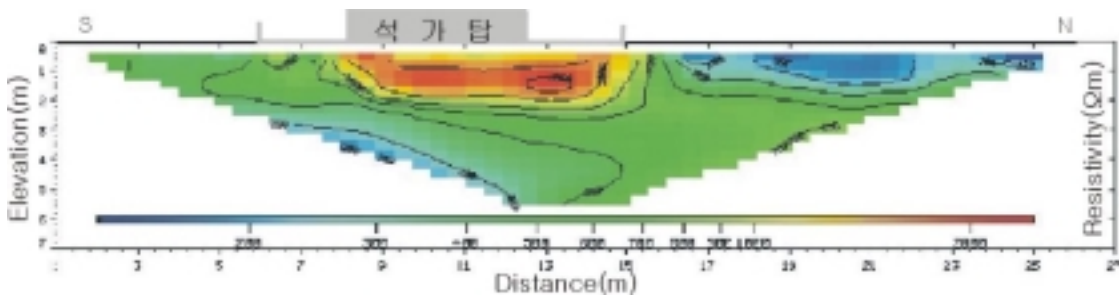
구조에 대한 2D 전기비저항 모델을 결정하기 위하여 상용프로그램(Interpex사의 Resix)을 이용하여 전기비저항 단면도를 제작하였다(Fig. 4b와 4c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. (a) Resistivity map around two stone pagodas from the Wenner method with the pole interval of 1 m. Resistivity profiles along Line DVR-1 in the Dabotap site (b) and along the Line SVR-1 in the Seokgatap site (c). All results are obtained by the Wenner method. See Fig. 2 for the location.

4. 석탑 지반환경 해석

4.1. 다보탑 지반

다보탑 부근의 전기비저항 탐사 결과, 전반적으로 65~1071 Ωm의 범위를 보이고 있으며, 대체적으로 석탑과 인접한 부분에서 저비저항과 고비저항의 경계가 나타났다(Fig. 4a). 다보탑 지반의 외부는 전기비저항이 200 Ωm 내외의 저비저항을 나타내고 있는 반면, 다보탑 지반은 최대 1071 Ωm의 상대적인 고비저항을 나타낸다. 특히 다보탑 북동측 3m 지점 하부 지반이 주변보다 저비저항을 보여 지반이 상대적으로 연약함을 보이고 있다. 또한 다보탑 하부 1m 깊이부터는 최저 100 Ωm 정도의 저비저항층이 지지기반을 형성하는데, 이는 지반 구축시 점토층을 중간 중간에 넣었을 가능성을 시사한다(Fig. 4b).

다보탑 지반의 탄성과 P파 속도는 500~800m/s의 범위를 보이는데 이는 석가탑 지반보다 약 244 m/s 정도 높은 탄성과 속도로서 다보탑 지반이 상대적으로 견고함을 의미한다. 또한, 남북방향인 DS-1, DS-2 축선의 반사파단면도에서 9~19 m 사이와 그 밖의 지역에서 첫 반사면의 서로 다른 도달 시간의 차이를 발견하였다. 다보탑 지반의 북서측 약 3 m 지점은 탄성과 속도가 주변보다 150~200 m/s 낮은 연약지반으로 관찰되는데 이는 전기비저항 분포와도 일치한다.

지하레이더 축선에서 나타난 탑 부지와 그 외 지역의 경계면에서 매질변화를 확인할 수 있었고, 축선상 20.5~22.5 m 지점의 지하 0.5~1 m에서 발견되는 곡선모양이 관찰되는데 이는 지하에 매설물이 존재함을 나타내는 것으로써 배수로일 것으로 판단된다.

4.2. 석가탑 지반

전기비저항 수평탐사의 결과는 다른 탐사에 비해 석가탑 지반 범위를 분명하게 나타낸다(Fig. 4a). 석가탑 지반에 대한 비저항값은 전반적으로 98~2387 Ωm의 범위를 보이고 있으나, 석가탑 지반의 외부 지역은 그 값이 400 Ωm 이하로서 상대적으로 낮은 비저항을 나타낸다. 대체적으로 탑 주변에서 주변지역보다 상대적으로 높은 비저항을 나

타내고 있어 석가탑 건립시 지반안정 대책을 실시한 것으로 판단된다. 특히 석가탑 북측면과 인접한 지점의 지반이 주변보다 낮은 비저항이 관찰되는데 이는 지반이 상대적으로 연약함을 나타낸다.

석가탑 지반에 대한 탄성과 속도의 분포는 풍화토~연암의 지반 특성에 해당하는 200~1832 m/s의 범위를 보이고, 주변보다 깊게 지하 약 6 m까지 연장되어 있는 것으로 보인다. 석가탑 북측면 울타리 부근의 축선 10 m 지점은 탄성과 속도가 주변보다 150~200 m/s 낮게 나타나는 연약지반으로 해석된다. 또한 굴절법탐사 동서방향의 단면도에서는 지층분포가 서측 부분의 탄성과 속도가 약 250 m/s 정도 낮게 나타나고 있다. 남북방향 축선인 SS-1, SS-2의 반사파 단면도에서도 첫 반사면 도달 시간이 9~21 m 사이와 그 밖의 지역에서의 뚜렷한 차이가 관찰되었다. 석가탑 지반에 대한 지하레이더 탐사에서는 석가탑 부지와 원지반의 경계에서 뚜렷한 매질변화를 확인할 수 있었고, 또한 배수로의 위치를 확인할 수 있었다.

5. 토 의

5.1. 석탑 기초의 경계

다보탑, 석가탑 부근 지반의 전기비저항은 대체로 200~2200 Ωm의 분포이다. 석탑지반의 외부는 200 Ωm 내외의 낮은 비저항을 나타내는 반면, 석탑지반은 최대 2200 Ωm의 상대적인 높은 비저항을 나타내고 있다. 특히 다보탑과 석가탑의 북쪽 지반이 주변보다 낮은 비저항을 보여 상대적으로 연약함을 보이고 있다.

탄성과탐사, 전기비저항탐사, 지하레이더 탐사를 통하여 밝혀진 다보탑지반은 동서방향으로 약 10m, 남북방향으로 약 10m, 한 변의 길이는 약 6m의 8각형 모양을 하고 있으며 약 4m 깊이까지 분포하는 것으로 해석된다. 그러나, 석가탑지반은 동서방향으로 약 9m, 남북방향으로 약 10m의 직사각형 모습을 하고 있으며 약 3m 깊이까지 분포하는 것으로 해석한다. 이러한 지하구조의 형태를 근거로 석탑건립 당시 주변부보다 깊게 지반을 파서 기초를 다지고 그 상부에 다보탑과 석가탑을 놓았다고 판단한다.

5.2. N치 추정

표준관입시험에 의한 N치를 산출해야 하지만, 문화재라는 이유 때문에 S파 속도를 이용하여 석탑 지반의 N치를 추정하였다. 각 축선별로 매 0.5 m마다 3~5m 깊이에 대하여 P파 전파속도를 구한 후 미고결층에 대한 P파와 S파 속도간의 경험식을 활용하여 S파 속도를 구하였다. 석가탑 지반의 P파 속도는 300~500 m/s이며, 이 P파 속도로부터 경험식을 이용하여 구한 S파 속도는 140~200 m/s의 범위이다. 이를 다시 N치로 환산하면 약 5 정도에 해당한다. 다보탑 지반의 P파 속도는 500~800 m/s, S파 속도는 200~350 m/s의 범위를 보이며 N치는 약 6정도로 해석된다.

5.3. 지반 환경 비교

탄성과 P파 속도는 다보탑 지반의 500~800 m/s, 석가탑의 300~500 m/s의 범위인데, 다보탑 지반이 석가탑 지반보다 약 244 m/s 정도 높은 탄성과 속도를 보여 지반이 상대적으로 견고한 것으로 나타나고 있다. 공통적으로 다보탑, 석가탑 지반의 북서쪽은 상대적으로 낮은 탄성과 속도와 비저항을 형성하여 연약지반으로 판단되며, 다보탑, 석가탑이 북북서쪽으로 기우는 현상의 원인을 제공할 가능성이 있다. 특히, 다보탑 지반의 북서쪽 약 3 m 지점은 탄성과 속도가 주변보다 150~200 m/s 낮은 분포를 보인다.

탄성과 속도분포를 볼 때 다보탑과 석가탑 직하부 지반의 P파 속도는 200~698 m/s의 속도로서 건설교통부 기준 암반분류에 의하면 다보탑의 지반은 풍화토층에 해당하는 미고결층이다. 이는 우리나라 전통적인 석탑지반 축조과정에 의해 형성된 사질토층·진흙층의 교호되는 다짐층의 경우에 나타날 수 있는 탄성과 속도에 해당된다. 표준관입 시험 N치는 대략 5(석가탑)~6(다보탑) 범위로 추정되는데 이는 연약지반에 해당되는 값이다.

허용지지력에 대한 값은 수정 Meyerhof식이나 Pack-Hanson-Thornburn에 의한 방법(Das, 1998)을 적용하여 구할 수 있다. 석가탑 지반의 허용지지력은 대략 5~7 ton/m²의 값으로 분석되는데, 석가탑 상층기단부와 하층기단부의 내부석재와 석재 사이의 공극률을 50%로 인정할 경우 석가탑

의 현재 단위 면적당 하중은 약 8.6 ton/m²이며, 이는 석가탑 지반의 허용지지력을 훨씬 상회하는 값으로서 석탑의 침하현상의 원인이 되고 있다. 현재 석가탑 지반의 지표면에는 하대중석 하부에 놓인 기초석들이 방사형으로 밖으로 밀려나는 현상을 보이는데, 이는 석가탑의 침하현상에 의한 결과로 해석된다. 다보탑 지반의 허용지지력이 대략 7~9 ton/m²이나, 실제하중은 약 8 ton/m²로서 허용지지력과 비슷한 수치를 나타내어 충분히 안전한 범위는 아니나 현재까지는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 실제로 기단석의 대부분이 이격되고 어긋나 있는 석가탑과는 달리 다보탑은 비교적 그 자세를 잘 유지하고 있다.

결론적으로 현재 석가탑의 지반상태는 탑의 하중을 지지하기에 충분치 않은 것으로 해석되며, 침하현상 발생시 부등침하에 의하여 탑의 구조에 변형이 발생하는 것으로 판단된다. 우기에는 지반의 함수비가 증가하여 지반의 허용지지력이 더욱 감소할 것이므로 강우의 침투를 방지할 시설이 필요하다. 그리고, 다보탑, 석가탑의 북서쪽 연약지반의 안정을 위한 지반공학적 보강방법과 배수로 확보 및 차수벽의 설치가 강구되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

국가 주요 문화재인 불국사의 다보탑과 석가탑의 지반특성을 파악하기 위하여 지구물리학적 방법을 적용하여 탄성과탐사, 전기비저항탐사, 지하레이다탐사를 실시하였으며 지층구조 및 지반상태의 결과는 다음과 같다.

(1) 다보탑, 석가탑의 전기비저항은 200~2200 Ωm의 분포로 나타났다. 석탑지반의 외부는 200 Ωm 내외의 낮은 비저항값을 갖는데 비하여 석탑지반은 최대 2200 Ωm의 상대적으로 높은 비저항값을 보인다. 특히 다보탑과 석가탑의 북쪽 지반이 주변보다 비저항값이 낮아서 지반이 상대적으로 연약함을 보이고 있다.

(2) 탄성과 P파 속도는 다보탑 지반이 500~800 m/s, 석가탑이 300~500 m/s의 범위이다. 다보탑 지반이 석가탑 지반보다 높은(~244 m/s) 탄

성과 속도를 보여 지반이 상대적으로 견고한 것으로 나타나고 있다. 또한, 다보탑 지반의 북서쪽 약 3m 지점은 대체로 150~200m/s 낮은 속도분포를 나타내어 주변보다 연약지반으로 판단된다.

(3) 다보탑지반은 한 변의 길이가 약 6m인 8각형 모습을 하고 있으며 약 4m 깊이까지 분포하는 것으로 해석되며, 석가탑지반은 약 8m×10m 크기의 직사각형 형태가 약 3m 깊이까지 분포하는 것으로 해석된다. 이 결과는 석탑 건립 당시 주변 부보다 깊게 지반을 파서 기초를 구축한 후 그 상부에 다보탑과 석가탑을 건립한 것으로 판단된다.

(4) 석탑의 북서쪽 부분이 주변지역보다 저속도대/저비저항값 지역으로 나타났다. 이러한 공통적인 결과는 석탑의 북서쪽 부분이 연약한 지반으로 조사되었다.

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.

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, 이남석, 2000, 매장문화재 확인을 위한 자력탐사 및 발굴 비교연구: 충남 천안시 두정동 발굴지역, 대한지구물리학회, 지구물리 3, 3, 175-184.
 오선환, 서만철, 2001, 방어산 마애여래입상의 안전진단을 위한 지구물리탐사, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 1, 11-20.
 이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료, 대한지구물리학회, 지구물리 1, 1, 3-22.
 이성민, 이수근, 권경원, 백용진, 서만철, 2002, 충주 미륵사 사지내 석굴석축의 구조, 문화재과학기술, 1, 1, 101-115.
 이준동, 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구, 한국지구과학회지, 20, 80-95.
 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여, 대한지질학회, 지질학회지, 36, 3, 335-340.
 최범영, 류충렬, 권석기, 최위찬, 황재하, 이승렬, 이병주, 2002, 포항-울산 지역의 단층 구조 분석: 활구조 운동에 대한 접근, 지질학회지, 38, 1, 33-50.
 Das, B.M., 1998, Principles of geotechnical engineering (4th ed.), PWS Publishing Co., Boston, U.S.A., 712.
 Kyung, J.B., 1997, Paleoseismological study on the Mid-northern part of the Ulsan Fault by trench method, Journal of Engineering Geology, 7, 81-90.
 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.

2002년 5월 6일 원고접수
 2002년 6월 21일 원고채택