

불국사 다보탑과 석가탑의 지반 특성

서만철¹⁾ · 최희수²⁾

1. 서 언

신라 제35대 경덕왕 10년(서기 751년)에 축조된 불국사 다보탑과 3층석탑(석가탑)은 신라의 많은 탑 중에서 가장 빼어난 대표작으로 평가되며, 1962년 12월에 각각 국보 제20호, 국보 제21호로 지정되었다. 다보탑의 경우 박리현상의 발생과 미생물체의 서식 등으로 인하여 석탑을 구성하는 부재들이 풍화가 심하게 진행된 상태이며, 석가탑의 경우도 석재의 풍화는 물론 지반의 불안정에 따른 지대석의 어긋남 현상들이 발생하고 있어 석탑의 안정성에 대한 정밀진단이 필요한 것으로 판명되었다. 이 연구는 2001년에 경북 경주시청 주관으로 시행된 다보탑과 석가탑의 구조정밀 안전진단의 일부로서 다보탑과 석가탑의 지반 특성을 파악하기 위하여 탄성과탐사와 전기비저항탐사를 실시하였다.

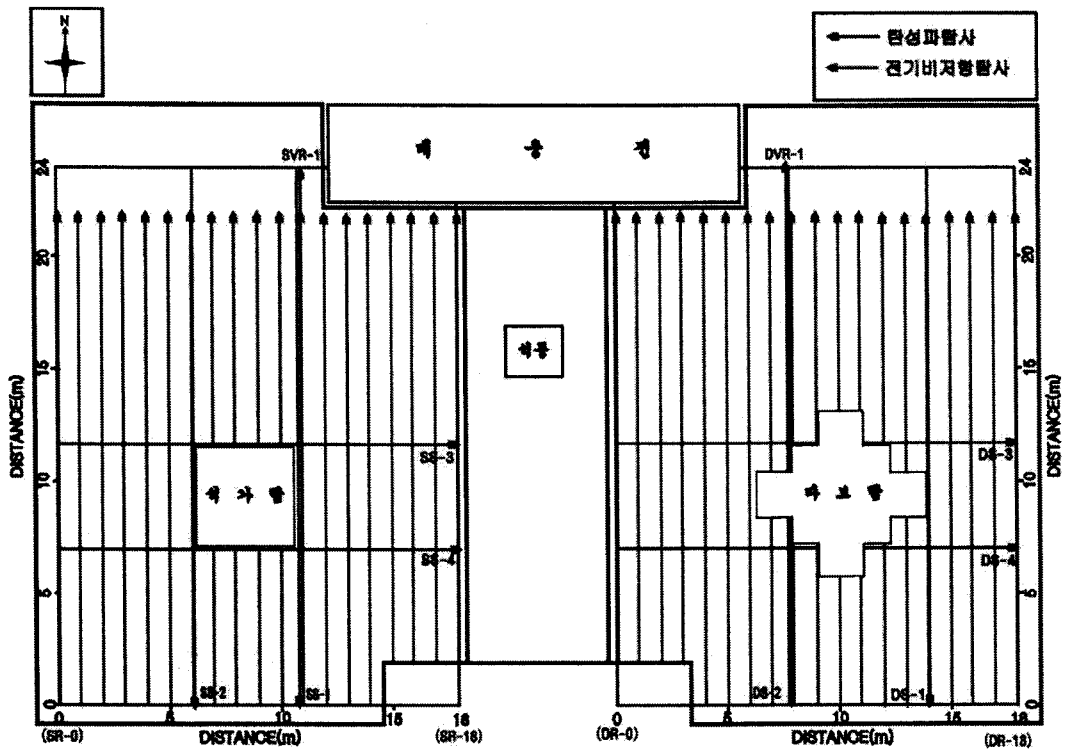


Fig 1. 다보탑, 석가탑 탐사 축선도

2. 조사방법

탄성과탐사는 다보탑 측면에서 NS방향의 2개 축선과 EW방향의 2개 축선을 설치하였으며, 석가탑 지반에서는 NS방향의 2개 축선과 EW방향의 2개 축선을 설치하여 총 8개 축선을 실시하였으며, 전기비저항탐사는 다보탑과 석가탑 지반에 대하여 NS방향으로 19개의 수평전기탐사 축선과 다보탑의 좌측면과 석가탑의 우측면 각각 1개씩의 수직전기탐

1) 공주대학교 문화재비파관진단연구실

2) (주)고려구조ENG

사측선을 설치하여 실시하였다(Fig 1).

탄성파탐사에 사용된 에너지원은 2 kg 소형 hammer로서 1 회 타격 후 도달되는 파형을 관찰하여 굴절파를 관찰할 수 있는 자료를 기록하여 속도분석에 활용하였으며, 1 m 간격의 shot gather를 취득하여 반사파 자료처리를 실시하였다. 탄성파기록은 14 Hz geophone을 이용하여 24 채널을 기록하였다.

전기비저항탐사는 전극간격 1 m 의 Wenner 배열을 이용한 수평탐사를 실시하여 석탑 지반의 수평적 분포를 파악하였으며, 수직탐사에서도 전극간격을 1 ~ 9 m로 점차 증가시키는 Wenner 배열법을 활용하여 석탑 지하의 2D 전기비저항 분포를 파악하였다.

3. 결과고찰

1) 다보탑 지반

굴절법 탄성파 속도분포를 볼 때 다보탑 지반 직하부의 P파 속도는 200~698 m/sec의 속도로서 건설교통부 기준 암반분류에 의하면 다보탑의 지반은 풍화도층에 해당하는 미고결층이다. 이는 우리나라 전통적인 석탑지반 축조과정에 의해 형성된 사질토층-진흙층의 교호되는 다짐층의 경우에 나타날 수 있는 탄성파 속도의 경우에 해당된다.

S파 속도(V_s)는 대략 93.8 ~ 355 m/s 의 범위를 보이며, N 치는 대략 6로서 연약지반으로 분류된다.

또한 허용지지력에 대한 수정마이어 호프식(1986)이나 Pack-Hanson-Thornburn (1976)에 의한 방법을 적용할 경우, 다보탑 지반의 허용지지력이 대략 7~9 ton/m²인 바, 실제하중은 약 8 ton/m² 로서 허용지지력과 비슷한 수치를 나타내어 충분한 안전도를 유지하는 것은 아니나 현재까지는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 실제로 석가탑의 경우 지반의 부동침하에 의해 기단석의 대부분이 이격되고 어긋나 있는 반면 다보탑의 경우는 그 자태를 잘 유지하고 있다.

다보탑의 현재구조를 유지하는 경우 탄성파 탐사 단면도 확인한 결과에 의거하여 반사법 탄성파 탐사 도면의 남북방향의 DS-1, DS-2 축선의 9 m ~ 19 m 사이와 그 밖의 지역에서 서로 다른 매질차이를 발견하였다(Fig 2).

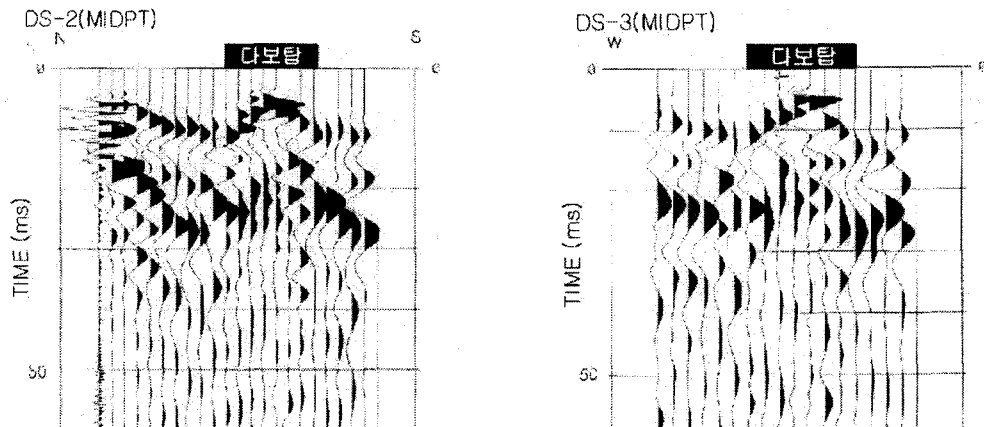


Fig 2. 반사법 탄성파탐사 단면도(DS-2, DS-3)

다보탑지반 전기비저항 탐사 결과, 전반적으로 65 ~ 1071 Ωm의 범위를 보이고 있으

며, 대체적으로 석탑과 인접한 부분이 저비저항과 고비저항의 분포로 나타났다.

다보탑지반 외부는 전기비저항이 200 ohm-m 내외의 저비저항을 나타내고 있는 반면, 다보탑지반은 최대 1071 ohm-m 의 상대적인 고비저항을 나타내고 있어 다보탑 건립시 지반안정대책을 실시한 것으로 판단된다. 특히 다보탑 북동측 3 m 지점하부 지반이 주변보다 저비저항을 보여 지반이 상대적으로 연약함을 보이고 있다. 또한 다보탑 하부 1 m 깊이부터는 최저 100 ohm-m 정도의 저비저항층이 지지기반을 형성하고 있는 바, 이는 지반 구축시 점토층을 중간 중간에 넣었을 가능성을 시사한다(Fig 3,4).

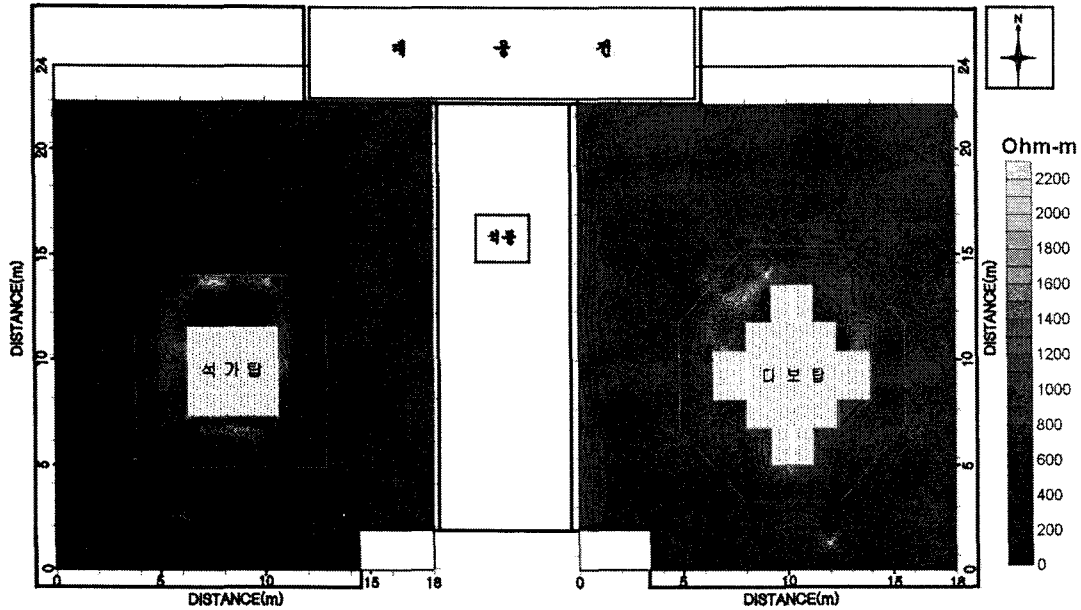


Fig 3. 수평전기비저항 분포도

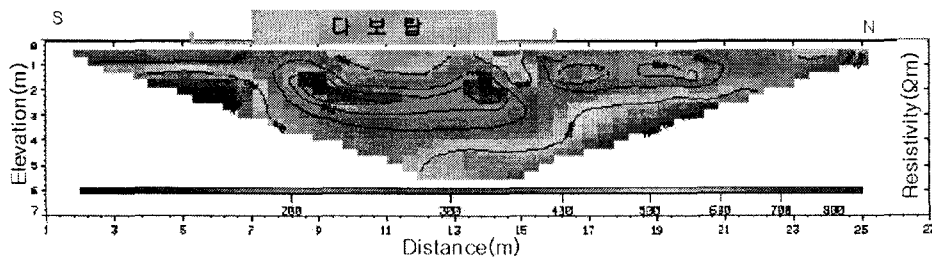


Fig 4. 2차원 전기비저항 단면도(DVR-1)

2) 석가탑 지반

굴절법 탄성과 속도분포를 볼 때 석가탑 지반 직하부의 P파 속도는 200~698m/sec의 속도로서 건설교통부 기준 암반분류에 의하면 석가탑의 지반은 풍화토층에 해당하는 미고결층이다. S파 속도(V_s)는 대략 140 ~ 300 m/s 의 범위를 보이며, N 치는 대략 5로서 연약지반으로 분류되며, 허용지지력은 약 5 ton/m²의 값을 지니는 것으로 분석된다.

또한 허용지지력에 대한 수정마이어 호프식(1986)이나 Pack-Hanson-Thornburn (1976)에 의한 방법을 적용할 경우에도 석가탑 지반의 허용지지력은 대략 5~7 ton/m²의 값을 지니는 것으로 분석된다. 한편, 석가탑 상층기단부와 하층기단부의 내부석재와 석재

사이의 공극률을 50%로 인정할 경우 석가탑의 현재 단위 면적당 하중은 약 8.6 ton/m²이며, 이는 석가탑 지반의 허용지지력 5~7 ton/m² 을 훨씬 상회하는 값으로서 석탑의 침하현상의 원인이 되고 있다.

현재 석가탑 지반의 지표면에는 하대중석 하부에 놓인 기초석들이 방사형으로 밖으로 밀려나는 현상을 보이고 있는 바, 이는 석가탑의 침하현상에 의한 결과로 해석된다.

석가탑의 현재구조를 유지하는 경우 탄성과 탐사 단면도 확인한 결과에 의거하여 반사법 탄성과 탐사 도면의 남북방향의 SS-1, SS-2 축선의 9 m ~ 21 m 사이와 그 밖의 지역에서 서로 다른 매질차이를 발견하였다. 이와 같은 결과로부터 석가탑의 지반은 동서 및 남북 방향으로 약 10 m 의 정방형 경계면으로 구성된 것으로 판단된다(Fig 5).

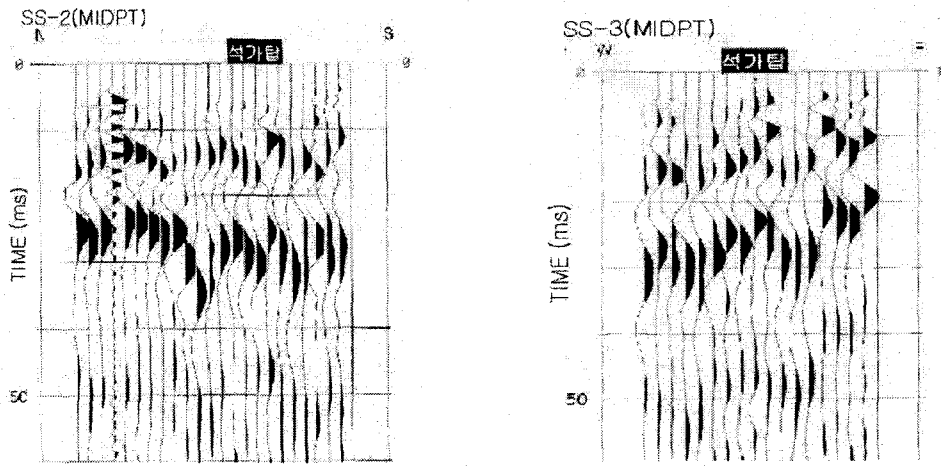


Fig 5. 반사법 탄성과탐사 단면도(SS-2, SS-3)

석가탑지반 전기비저항 탐사 결과, 수평비저항 분포에 의하면 석가탑 지반의 범위가 분명하게 밝혀지고 있는 바, 석가탑지반 외부는 전기비저항이 400 ohm-m 이하의 저비저항을 나타내고 있는 반면, 석가탑지반은 최대 2200 ohm-m 의 상대적인 고비저항을 나타내고 있다(Fig. 3). 대체적으로 탐 주변에서 주변지역보다 상대적으로 고 비저항을 나타내고 있어 석가탑 건립시 지반안정대책을 실시한 것으로 판단된다. 특히 석가탑 북측면과 인접한 지점의 지반이 주변보다 저비저항을 보여 지반이 상대적으로 연약함을 보이고 있다. 결과적으로 수평전기비저항 분포로 밝혀진 석가탑지반은 동서방향 약 8 m, 남북방향 약 10 m의 직사각형 모습을 하고 있는 것으로 밝혀졌다. 또한 수직비저항탐사 결과에 의하면 석가탑 지반은 약 3 m 깊이 까지 분포하는 것으로 해석된다(Fig 6).

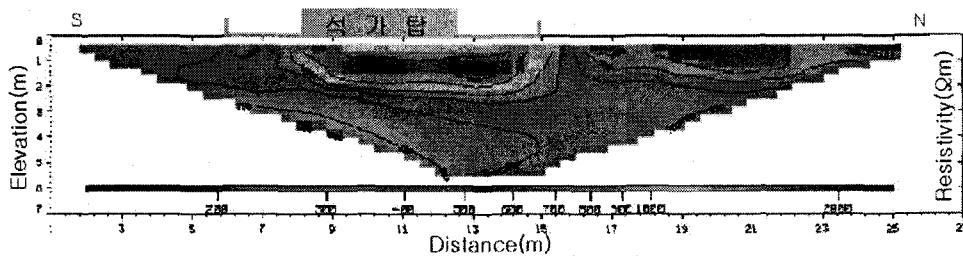


Fig 6. 2차원 전기비저항 단면도(SVR-1)

4. 결 론

- (1) 다보탑, 석가탑의 전기비저항은 200~2200 ohm-m의 분포로 나타났다. 석탑지반의 외부는 200 ohm-m내외의 저비저항을 나타내고 있는 반면, 석탑지반은 최대 2200 ohm-m의 상대적인 고비저항을 나타내고 있다. 특히 다보탑과 석가탑의 북쪽 지반이 주변보다 저비저항을 보여 지반이 상대적으로 연약함을 보이고 있다.
- (2) 탄성과 P파 속도는 다보탑 지반이 500 ~ 800 m/s, 석가탑이 300 ~ 500 m/s의 범위로 다보탑 지반이 석가탑 지반보다 약 244 m/s 정도 높은 탄성과 속도를 보여 지반이 상대적으로 견고한 것으로 나타나고 있다.
또한, 다보탑 지반의 북서쪽 약 3 m 지점은 탄성과 속도가 주변보다 150 ~ 200 m/s 낮은 분포를 보이는 연약지반으로 판단된다.
- (3) 탄성과탐사, 전기비저항탐사를 통하여 밝혀진 다보탑지반은 동서방향으로 약 10 m, 남북방향으로 약 10 m, 한 변의 길이는 약 6 m의 8각형 모습을 하고 있으며 약 4 m 깊이까지 분포하는 것으로 해석되며, 석가탑지반은 동서방향으로 약 8 m, 남북방향으로 약 10 m의 직사각형 모습을 하고 있으며 약 3 m 깊이 까지 분포하는 것으로 해석되어 석탑 건립 당시 주변부보다 깊게 지반을 파서 기초를 구축한 후 그 상부에 다보탑과 석가탑을 건립한 것으로 판단된다.

결론적으로 현재 석가탑의 지반 상태는 탑의 하중을 지지하기에 충분치 않은 것으로 해석되며, 침하현상 발생시 부등침하에 의하여 탑의 구조에 변형이 발생하는 것으로 판단된다. 특히, 우기에는 지반의 함수비가 증가하여 지반의 허용지지력이 더욱 감소할 것이므로 강우의 침투를 방지할 시설이 필요하다.

그러므로, 다보탑, 석가탑의 북서쪽 연약지반의 안정을 위한 지반공학적 보강방법과 배수로 확보 및 차수벽의 설치가 강구되어야 할 것으로 판단된다.