

## 지구물리탐사 방법의 석탑지반 안전진단에의 적용

서만철, 오진용, 김기현<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>공주대학교 문화재비파괴진단연구실

## Application of geophysical exploration methods for safety diagnosis of the basement of stone pagoda

Mancheol Suh, Jinyong Oh, Kihyun Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Kongju Univ., Nondestructive Research Lab. of Cultural Properities

**요 약 :** 문화유산의 안전진단에 대한 가장 중요한 전제는 비파괴에 있다. 석조문화재에 대하여서도 비파괴진단과 보존을 위한 연구는 필수적이며 주요한 기술적 핵심이다. 비파괴진단 기술로서 지구물리탐사는 석조문화재 지반의 특징을 밝히는 중요한 역할을 하는데, 그 이유는 지반의 특성을 이해하는 것이 안전진단에 필수적이기 때문이다. 탐사사례로 국보급 문화재인 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)에 대한 지구물리탐사가 이루어졌다. 현재 석탑에서는 풍화는 물론 탑의 기울임 및 지대석의 어긋남 현상들이 관찰된다. 두 탑을 구성하는 석재의 역학적 성질을 위해 초음파 속도 측정을 실시하였고 천부지하구조를 위해 탄성파, 전기비저항, 지하레이더 등의 비파괴 복합 지구물리탐사를 석탑 주변에서 수행하였다. 초음파 속도 범위는 석가탑에서는 1217~4403 m/s이며, 다보탑에서는 584~5845 m/s이며 이로부터 추정된 일축강도 평균치는 각각 463 kg/cm<sup>2</sup>, 409 kg/cm<sup>2</sup>이다. 탄성파 속도 분포에서는 다보탑 지반이 더 큰 속도를 보여 상대적으로 석가탑 지반보다 견고함을 보여준다. 대체로 석탑지반의 전기비저항은 최대 2200 Ωm이며 200 Ωm내외의 외부지반보다 더 높은 값을 보인다. 복합 지구물리탐사 결과를 종합하면 다보탑지반의 형태는 팔각형(한 변은 6 m)으로 그 깊이는 약 4 m 이나, 석가탑지반은 약 8 x 10 m의 직사각형 형태로 깊이는 약 3 m 이다. 이는 석탑 건립 당시 약 8 ton/m<sup>2</sup>의 탑 하중을 견디기 위해 구축한 기초구조로 해석한다. 대체로 두 석탑의 북서쪽 부분이 주변지역보다 낮은 탄성파 속도와 낮은 비저항값이 관찰되는데 이 부분은 연약한 지반으로 판단하며 각 석탑이 북북서쪽 방향으로 기우는 원인으로 판단한다.

**주요어 :** 석탑, 초음파속도, 전기비저항탐사, 탄성파탐사

**Abstract :** The safety diagnosis of cultural assets is primarily focused on its non-destructiveness. Research on the nondestructive diagnosis and conservation of masonry cultural heritage is the key which is considered by technologic kernel. Geophysical prospecting as nondestructive diagnostic technology plays an important role

in the characterization of the foundation of stone pagodas. It is natural that understanding of shallow subsurface condition beneath them is essential for their structural safety diagnosis. As an example, the nondestructive geophysical methods were applied to two three-story stone pagodas, Seokgatap (height 10.8 m, width 4.4 m, weight 82.3 ton) and Dabotap (height 10.4 m, width 7.4 m, weight 123.2 ton) which were built in 791 at Bulkuksa temple. An earlier archaeological investigation shows that stone pagodas have experienced severe weathering process and are slightly leaning, which will threaten their stability. At the base part of Dabotap, an offset of the stone alignment is also observed. Direct measurements of ultrasonic velocities was introduced for the mechanical properties of the stone. The velocity ranges of ultrasonic waves for Dabotap and Seokgatap are 1217~4403 m/s and 584~5845 m/s, respectively, and the estimated averages of the uniaxial compressive strength are 463 kg/cm<sup>2</sup> and 409 kg/cm<sup>2</sup>, respectively. Site characteristics around the pagodas are determined by the measurement of multiple properties such as seismic velocity, resistivity, image of ground-penetrating radar. On the basis of the higher velocity structure, the site of Seokgatap appears to have solid stability than the Dabotap site. Near the pagodas, higher (up to 2200 Ωm) resistivity is present whereas their outskirts have as low as 200 Ωm. By the combined results of each geophysical methods, the subsurface boundaries of two 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 8x10 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/m<sup>2</sup>. 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 which is the possible cause of the slightly leaning pagodas toward the NNW.

**Keywords** : stone pagoda, ultrasonic velocity, electrical resistivity survey, seismic survey

## 1. 서론

석조문화재란 석재로 구성된 문화유산들을 말한다. 오늘날 남아 있는 우리나라의 역사적 유적 유물은 그 수요가 석조물이 단연 으뜸인 것이다. 이것은 우리나라에는 화강암 등 여러 종류의 석재가 풍부할 뿐만 아니라 전 역사를 통하여 수많은 재난을 겪을 때마다 모두 소실, 파괴되어 대부분이 그 흔적조차도 없어지고 남은 것이라고는 견고한 석조물뿐이라는 점에서도 또한 원인을 찾을 수 있을 것이다 (이상현외, 1997). 현실적으로 목조문화재보다 내구성 면에서 석조문화재가 우수한 것은 사실이지만, 영구적으로 안전한 것은 아니다. 석조문화재의 보존에 있어서 가장 위험 요소가 되는 요인들은 석재 자체의 풍화 현상과 석조문화재를 받치고 있는 지반의 불안정에 의한 도괴 현상이다 (권경원과 송인춘, 1995).

우리나라에는 180여개의 석불과 300여개의 석조물등 암석으로 건축된 석조문화재가 있다. 대표적으로 석굴암, 익산 미륵사지석탑, 첨성대, 서산 마애삼존불과 관촉사 미륵보살입상 등은 역사성과 예술성 뿐만 아니라 문화적 교육적 가치로서도 세계적인 문화유산이다. 일반적으로 석조문화재는 단단하여 안전하다고 생각하나, 산성비, 풍화, 자연변화 등으로 인하여

변색, 변질, 퇴색하고 실링재의 잘못된 선택과 먼지 및 오염, 또한 이끼 및 조류 등의 영향으로 빠르게 부식되고 마모되기도 하며, 심한 경우에는 균열이 발생하여 귀중한 문화재가 전도되거나 형체를 알아볼 수 없게 된다 (김수진, 2001). 특히 전국에 산재하여 있는 석탑, 석불, 부도, 비석, 당간지주 등의 석조 문화재의 대부분이 옥외에 위치해 있기 때문에 빗물, 대기 또는 생물 등에 직접 노출되어 위험한 상태에 도달할 수 있다.

그러나, 이들의 영향을 우리들이 쉽게 규제하거나 조절할 수 있는 것이 아니기 때문에 보존을 위한 조치를 강구하는데 중요한 문제가 될 수밖에 없다. 특히, 유럽이나 다른 나라들의 석조문화재들이 사암 종류의 퇴적암류와 대리암들의 변성암류로 되어 있는 반면, 국내의 석조문화재들은 화강암류가 대부분을 차지한다 (김은영, 1997). 자연적인 풍화에 있어서 화강암은 퇴적암류와 변성암류에 비하여 훨씬 취약한 것이 사실이다 (임길재외, 1994). 실제로 많은 석조문화재들이 이러한 자연적인 영향에 의하여 매우 심하게 훼손되어 있으며 경우에 따라 원형이 많이 훼손되었다. 이런 영향은 특히 공업화가 급속히 진행된 근래에 이르러 더욱 심해지고 있으며 현재와 같은 상태가 계속되면 가까운 기간내에 일어날 훼손의 정도는 지금까지 일어난 것보다 더 심할 것으로 판단된다.

이를 극복하기 위한 석조문화재 안전진단은 기초적이고 필수적인 단계이다. 일반적으로 문화재와 관련된 연구는 대상 자체가 중요한 문화재이기 때문에 조금의 손상도 허용되지 않는다. 또한 대상 자체를 이동시키거나 변형을 가할 수도 없는 상태 즉, 현재 그대로의 상태에서 문화재 자체에 대한 상태를 파악하여야만 하는 특성이 있다. 그러므로 석조 문화재의 물성 파악 및 안전 진단 자료를 취득하기 위해서는 비파괴적 조사 방법이 반드시 필요하다 (서만철외, 1997). 석조문화재의 보존에 있어서 또 다른 위험요소중 하나인 지반의 부등침하에 의한 석조 문화재의 기울어짐 현상 등에 대한 체계적인 조사가 필요하다. 이를 위해 다른 산업분야에서 일찍부터 적용된 각종 비파괴 조사 방법을 문화재 특성에 알맞은 적용법으로 개발되어야 하며, 댐, 건축물 등의 안전진단에 이용되는 구조거동계측시스템을 활용하여 문화재에 대한 자동계측이 적용될 수 있다 (Suh, 2001).

석조문화재의 물성적 특성과 지반환경을 밝혀내는 비파괴 진단의 하나로서 지구물리학적 접근 방법이 있다. 석조문화재에 대한 지구물리학적 접근은 석조물을 중심으로 주변 지역의 지반에 대한 지구물리탐사를 통하여 석조문화재 주변 지반의 구조 및 지지력 그리고 지층 상태를 파악하며, 초음파 탐사를 통하여 석재의 물성을 측정한다 (서만철외, 2001; 류제라와 서만철, 2001). 그 결과는 석재유물의 육안조사를 통하여 얻어진 부재 사이의 접촉부상대, 거동관찰과 변위조사 등의 결과와 비교하여 구조안전진단을 실시하게 된다.

## 2. 방법론적 고찰

석조문화재 안전진단 기술의 핵심으로는 문제점 진단 시에는 비파괴라는 전제가 필수적이어야 한다는 것과 대상 석조문화재는 우리나라 고유의 기술로 제작된 것이므로 우리 문화재에 대한 이해를 바탕으로 한 안전진단과 그에 따른 보존대책이 수립되어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 지구물리탐사는 매우 적절한 방법이 될 수 있다. 특히, 문화재의 발굴 및 보존하기에 앞서 정밀한 진단이 우선적으로 요구되는 고고학 분야에서도 비파괴 진단을 목적으로 하는 고해상의 지구물리탐사의 활용 기회가 점점 커지고 있다.

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 고해상 지구물리탐사의 가치가 널리 인식되면서 활용 기회는 점점 커지고

있다. 국내 고고학계에 지구물리탐사 방법이 소개된 이래 (김유선, 1997; 임효재, 1997), 유적지 탐사 및 거동관찰 등에 대한 여러 지구물리탐사가 수행되었다 (서만철외, 1977; 서만철과 이남석, 2000; 김기현과 서만철, 2001; Suh, 2001). 이 외에도 초음파측정을 실시하여 석조물 자체의 물성을 측정하였다 (서만철외, 2001; 서만철외, 2002).

국내 석탑 문화재의 지반에 대하여 지구물리탐사를 이용한 기존연구로서 익산 미륵사지 서탑 (류제라와 서만철, 2001), 불국사 3층석탑 (서만철외, 2002), 감은사지 3층석탑 (서만철외, 2003), 그리고 하남시 춘궁동 5층석탑 (류제라와 서만철, 2004) 등이 발표된 바 있다. 이들의 공통적인 연구 방식은 석탑을 중심으로 격자형의 탐사측선을 설치하고 각 측선을 따라서 탄성파, 전기비저항, 지하레이다 등의 2차원 복합 지구물리탐사를 실시하였다. 그리고, 각각의 해석 결과들을 종합하여 석탑 주변 지반의 정밀한 수평 및 수직변화를 파악하였다. 이러한 기존의 연구결과를 통해 석탑에 대한 구조안전진단 방법의 하나로서 지구물리학적 적용의 타당성을 확인하였다. 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.

### 3. 응용사례 - 불국사 석탑의 지반조사

이번 연구에서 석탑 지반의 안전진단을 위한 지구물리탐사의 적용 사례로서 우리나라 대표적인 문화재인 불국사의 석탑들에 대한 결과를 소개한다 (Fig. 1; 서만철외, 2002; 최희수외, 2003). 경상북도 경주시 진현동 15번지의 불국사 내에 위치한 “불국사 다보탑”(이하 다보탑)과 “불국사 3층석탑”(이하 석가탑)의 구조정밀 안전진단을 경북 경주시청 주관으로 2001년 5월과 6월에 종합 연구를 시행하였고, 여기서는 그 일부인 석탑 부근의 지반구조를 조사한 내용을 소개한다. 기초 야외자료는 다보탑과 석가탑의 석재의 물성을 파악하기 위한 암석학적 관찰 및 초음파 측정뿐만 아니라 석탑과 주변의 지반 특성을 파악하기 위하여 실시한 탄성파탐사와 전기비저항탐사, 지하레이더 탐사 등의 지구물리탐사에서 얻어졌다.

다보탑과 석가탑(석가여래상주설법탑 또는 무영탑)은 신라 제35대 경덕왕 10년(서기 751년)에 축조된 것으로 각각 국보 제20호, 국보 제21호로 지정되었으며, 세계문화유산으로 등록되었다. 이미 역사학적, 고고학적 및 미술사학적 연구는 많이 있었으나 석탑의 지반환경과 관련된 지질학적 구조안정성 그리고 암석학적 풍화와 관련된 석재 물성에 관한 기초적인 연구는 미진한 실정이었다. 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 있으며, 특히 수직변위측정 결과 북북서 쪽으로 약 0.9° 기울어진 현상이 발견되었다.

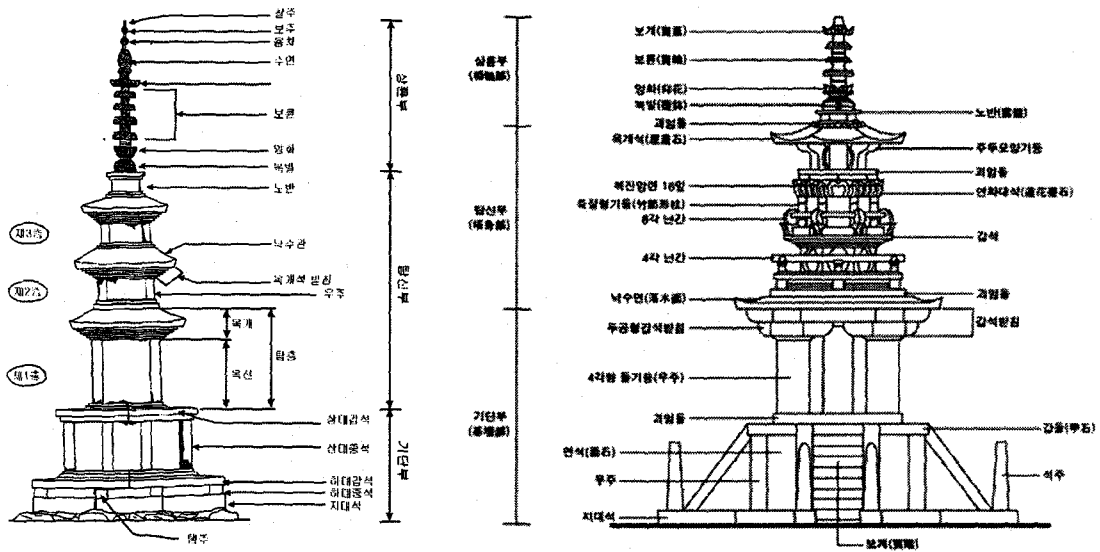


Fig. 1. Name of rock blocks of Seokgatap(left) and Dabotap(right).

### 3.1 석탑의 구조적 형태

석가탑은 높이 10.8 m, 기단폭 4.4 m으로서 전체가 3층으로 2층의 기단위에 세워져 있고, 기단부는 여러 개의 장대석으로 구축된 지대석위에 놓여있다(Fig. 1). 1925년에는 일본인에 의해 수리된 바 있고, 1966년에는 도굴범의 석탑 훼손으로 인하여 해체 수리작업이 이루어졌으며, 1972년에는 상륜부의 복원을 완료하였다. 석가탑은 지반의 약화에 따른 본체의 불안이 가중되어 기단부의 각 면과 모서리, 그리고 각 탑신의 면이나 모서리에서 이격이 아주 심하며 중앙부는 침강하고 양단은 융기한 모양을 보인다. 또한 박리 및 박락현상이 잘 나타나고 특히 서쪽의 기단부가 균열이 심하다. 풍화가 진행됨으로 암석의 강도가 약해지고 탑의 구조적 불균형에 의한 하중의 편중에 의하여 1층 탑신부 바로 밑 기단석 상부의 각 부재의 틈이 역 V자 형으로 벌어져 있었으며, 연결된 곳에서는 두 부재간 높이 차가 관찰되었다. 이러한 틈을 따라 풍화가 더욱 촉진되었다. 또한 지대석의 부재별 이격과 사이에 충전된 잡석의 산출상태는 기단석의 융기흔적과 서로 어긋난 이격이 잘 나타나 있다. 왼쪽과 오른쪽으로 융기된 지대석과 이를 지지하는 잡석의 충격으로 발달된 균열대도 잘 보여준다. 석가탑에 나타난 부재의 이격정도는 거의 모든 면에서는 부재와 부재 사이는 넓은 이격을 보이며 특히 지대석과 탑신부에서는 구조적 불안을 야기할 정도로 불균형이 심한 상태이다.

다보탑은 전체높이 10.4 m, 기단폭 7.4 m을 가지며 기단부, 탑신부, 상륜부의 3부분으로 구성되어 있다(Fig. 1). 1925년경 일본인이 탑을 완전히 해체, 보수하였는데 당시 발견된 유물 및 수리 기록은 남아있지 않다. 다보탑의 암석학적 훼손에 가장 큰 문제가 있는 것은 8각 난간 중앙부에서 빗물이 스미는 것으로서 이는 탑의 구조적 문제와도 관련이 있다고 본다. 대체로 대웅전 쪽으로 약간 기울어져 있는데 이는 2층 옥개석의 균열 및 중앙부 기둥의 경사에서도 확인 할 수 있다. 따라서 강수는 그쪽으로 모여들어 오랜 기간동안 배수되지 않고 남아있다. 또한 2층 난간의 간대와 난간석은 동남쪽의 것이 상대적으로 심한 풍화가 발생하여 암석이 갈라지고 터져 있으며 손으로 부스러질 정도로 이미 토양화가 진행되어 있다. 이는 현재 상태로는 어떠한 보존처리도 효과를 발휘하기 곤란한 상태이기 때문에 암석학적으로 동일한 부재를 선택하여 갈아 끼워야 할 처지에 있다. 이 부분이 상대적으로 심하

게 훼손된 것은 기상변화에 제일 민감한 동남쪽에 노출되어 있기 때문이다. 이것도 역시 탑의 구조상 피하기 어려운 상태이다.

### 3.2 석탑의 암석학적 특징

석조유물에 대한 연구에서 어려운 부분의 하나는 석재의 정확한 암석학적 감정이다. 첫 번째 이유는 풍화된 원암의 조직과 조성이 관찰되지 않은 경우가 대부분이며, 두 번째는 문화재의 특성상 조금이라도 훼손시킬 수 없어 오로지 육안관찰로 표면을 조사해서 판정해야 하기 때문이다. 따라서 문화재 석재의 정확한 감정이란 어려운 일이다. 기존 연구에서는 이대성(1980), 석굴암조사단(1990), 이상현 (1999), 좌용주 외(2000)는 지질조사와 분석자료를 토대로 석굴암의 부재는 인근지역에서 조달하였을 것으로 보고하였으나, 불국사의 다보탑과 석가탑의 부재에 관하여는 이견을 보이고 있다. 이번 조사에서는 석가탑의 옥개석과 탑신에 박락되어 떨어져 있는 암편을 회수하여 석재의 감정에 이용하였다. 불국사 다보탑의 석재는 구성광물과 조직으로 보아 불국사 및 토함산 지역에 분포하는 토함산 화강섬록암에 해당하는 것으로 보고 되었다(김수진 외, 2000).

최근에 좌용주 외(2000)는 암석의 성인적 특징에 따라 서로 다르게 나타날 수 있는 전암 대자율(magnetic susceptibility)을 측정하여 불국사와 석굴암 및 주변의 암석에 관한 분류를 시도하였다. 이는 석재에 손상을 입히지 않고 직접 측정할 수 있는 방법이나, 대자율치는 동일 암석에서도 부분적인 편차가 심하여 많은 혼란을 초래하기도 한다. 좌용주 외(2000)는 석가탑의 연화대, 기단석, 지대석, 중석, 갑석, 탑신 및 1층 옥개석까지 모두 24개의 석재에 관한 관찰과 측정을 실시하였고, 다보탑에 관하여는 기단석, 계단석, 갑석과 기둥 및 옥개석까지 44개의 부재에 대한 측정치를 보고하였다. 이 결과 다보탑과 석가탑의 부재는 거의 동일한 특성을 갖고 있으며 반론이 있을 수 있으나 암석학적으로 볼 때 남산화강암과 가장 유사함을 주장하였다. 이번 조사에서는 정밀한 육안관찰과 탑의 본체에서 탈락된 암편을 대상으로 현미경 관찰, X-선 회절분석 및 화학분석을 통하여 석가탑의 구성암석은 알카리 화강암이며 이는 A-형 화강암으로 알려진 남산화강암과 동일한 것임을 밝혔다.

### 3.3 석재의 초음파 측정

일반적으로 석조 문화재의 강도와 물성은 현장에서 암석시료에 대한 초음파의 전달특성을 파악하여 간접적인 방법으로 측정한다. 암석역학분야에서는 초음파를 통하여 매질의 강도 및 물성을 산출하는데 사용되어져 왔는데 그 근거는 초음파 속도가 매질의 탄성계수 및 밀도와 밀접한 관계를 갖는데, 같은 암석에서도 공극률 및 미세 균열의 발달 정도에 따라 다르다. 이러한 원리를 이용하면 암석의 물성 및 풍화 정도를 산출해 낼 수 있으며, 석조문화재의 안정성을 평가하는데도 이용될 수 있다(서만철 외, 2001; 서만철외 2002). 대체로, 같은 광물조성의 암석이라도 미세균열이 발달할수록 즉, 암석내의 공극이 커질수록 초음파 속도는 작아지며, 이를 통해 균열 발달 정도 및 풍화정도를 추정할 수 있으며 궁극적으로 암석의 강도도 산출할 수 있다(Goodman, 1989).

이번 조사에서는 두 개의 54 kHz 압전결정(piezoelectric crystal)을 석탑의 석조면에 직접 설치하고 측정하는 방법을 이용하였는데, 사용한 기기에서는 파형을 볼 수 없어서 신뢰성을 높이기 위해 한 지점에서 여러 번 측정하였다. 석가탑에서 실시한 초음파탐사 부재의 측정수는 전체 44개로서 총 456 지점을 측정하였는데, 속도 범위는 1217~4403 m/s이며 평균속도가 3227 m/s로 나타났다. 이 자료로부터 경험식을 이용하여 구한 일축강도는 134~844 kg/cm<sup>2</sup> 범위로 평균치가 463 kg/cm<sup>2</sup>이며, 이는 신선한 암석의 약 20~30%에 해당한다. 또한

## 물리탐사 기술 심포지움

풍화도는 14~76 %의 범위로 평균 37 %로 나타났다. 이는 석탑을 이루는 부재들이 중간풍화 정도의 상태임을 의미한다. 불국사 다보탑에서 실시한 초음파탐사 부재의 측정수는 전체 255개 부재에서 총 641 지점을 측정하였다. 얻어진 속도 범위는 584~5845 m/s의 분포로 평균 속도가 2901 m/s로 나타났다. 추정된 일축압축강도는 92~1943 kg/cm<sup>2</sup> 범위로 평균치가 409 kg/cm<sup>2</sup>이고, 풍화도는 7~88 %의 범위로 평균 43 %로 나타났다.

### 3.4 지구물리탐사

#### 3.4.1 측선 설치

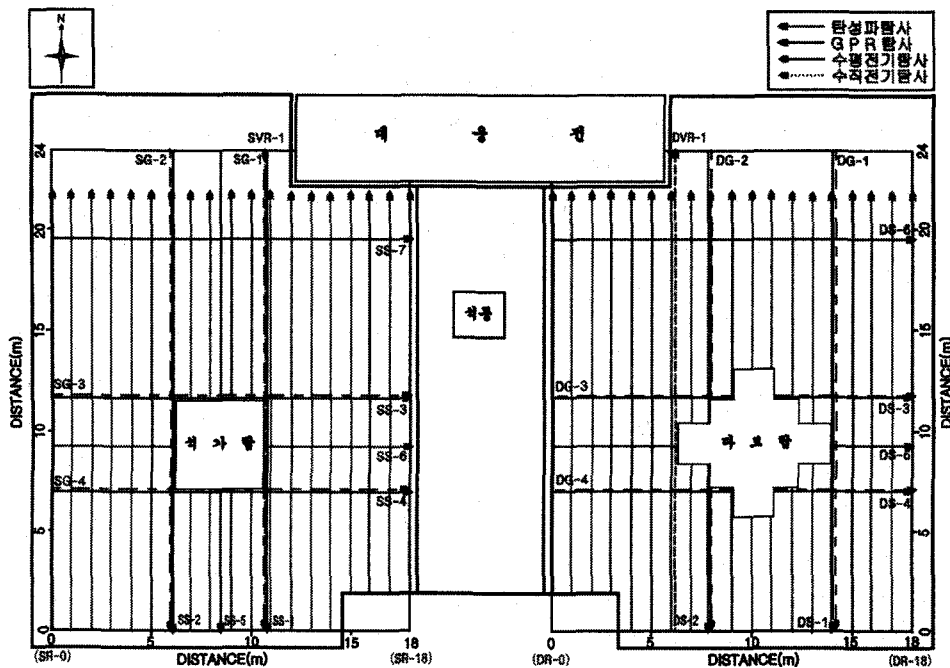


Fig. 2. Survey lines around two stone pagodas in Bulkuk Temple.

야외자료획득 다보탑과 석가탑을 중심으로 남서방향의 모서리 부분에 각각의 기준점을 설정하고, 이를 기준으로 측점 간격이 1m인 18 m×24 m 크기의 격자를 구성하였다 (Fig. 2). 설정된 각각의 격자에서 탄성과탐사는 6-7개 측선, 지하레이다 탐사는 4개 측선, 전기비저항 탐사는 20개 측선에서 실시되었다.

#### 3.4.2 탐사 방법

##### (1) 탄성과 탐사

탄성과탐사는 다보탑과 석가탑 부근에서는 각각 남북방향 2개 측선과 동서방향 2개 측선을 설치하여 총 8개 측선을 전개하였다 (Fig. 2). 다보탑의 전체 측선 연장 길이를 126 m이며, 석가탑은 145 m이다. 수신기 간격은 모두 1 m로 하였으며, 발파점과 최초 수신기간의 거리 또한 1 m로 하였다. 굴절법 및 반사법 탄성과탐사에 사용된 에너지원은 2 kg 소형 해머로서 1회 타격 후 14 Hz 수신기를 이용하여 OYO사의 DAS-1 system에 기록하였다. 사용된 현장자료 입력변수는 Table 1에 제시하였다.

현장에서 디지털 방식으로 기록된 정방향과 역방향의 측정자료는 실내작업을 통하여 각

채널 기록에서 초동시각을 읽어서 주시곡선을 작성하였다. 측정별 주시곡선에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 최적 직선의 기울기와 절편을 구하여 측정 구간의 탄성과속도와 각 층의 두께를 구한다. 이 연구에서는 상용프로그램(Intelligent Resources사의 RAYFRACT)을 이용하여 연속 측정들의 주시곡선으로부터 전체 측선의 2차원 탄성과 속도분포도를 작성하였다. Fig. 3a와 Fig. 3b는 각각 석가탑과 다보탑 부근의 일부 측선들에 대한 탄성과 속도분포도이다. 얻어진 모든 측정자료로부터 1 m의 송수신 간격을 갖는 자료를 취합하여 단일채널 반사파단면도를 작성하였다 (Fig. 4).

Table 1. Acquisition parameters for the seismic survey.

Number of Channel	6 CH
Natural Frequency of Geophone	14 Hz
Geophone Interval	1 m
Near Trace Offset	1 m
Record Length	300 ms
Sample Rate	0.125 ms
Notch Filter	Out
Spread Type	End-on Shot, Pushing the Cable

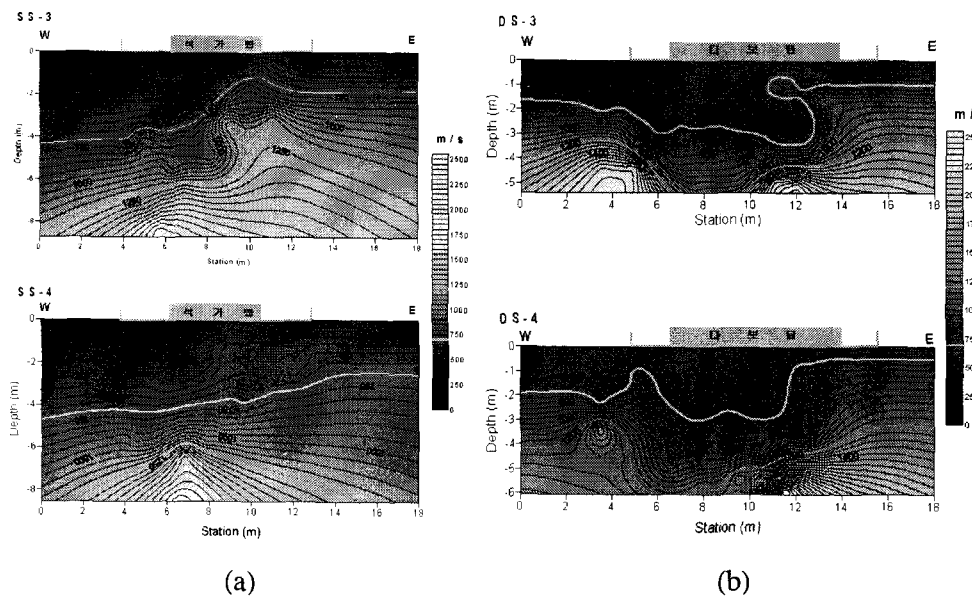
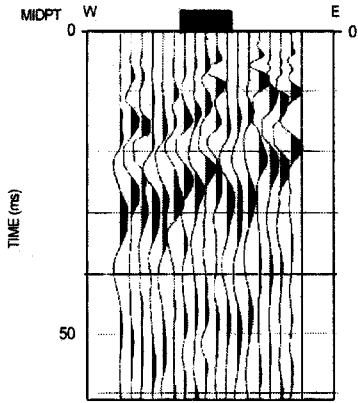


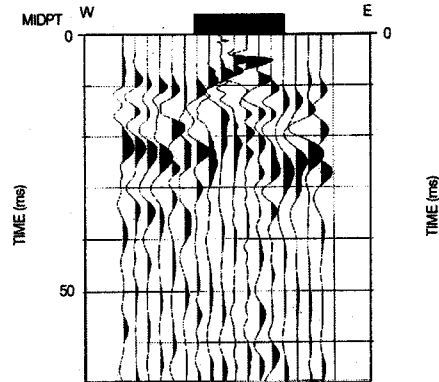
Fig. 3. (a) Seismic velocity structures along the selected survey lines in the Seokgatap site. See Fig. 2 for the location, (b) Seismic velocity structures along the selected survey lines in the Dabotap site. See Fig. 2 for the location.



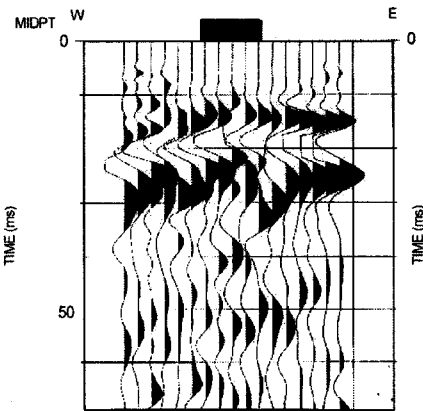
SS-3



DS-3



SS-4



DS-4

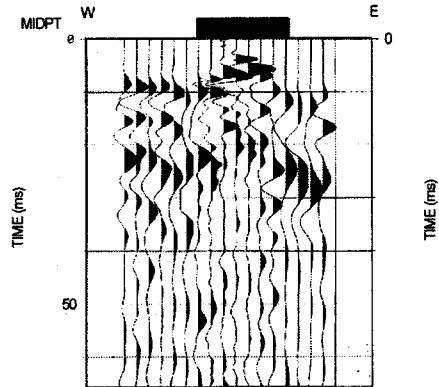


Fig 4. Single-channel reflection profiles across Seokgatap(left) and Dabotap(right). See Fig. 3 for the location of survey lines.

(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 탐사간격은 1 cm, 트레이스당 샘플수는 512, 샘플링 주파수는 2555.56 MHz, 그리고 중합은 4~8로 하여 탐사를 실시하였다. 한편, 석가탑 부근에서는 길이가 22 m인 남북방향 2개 측선과 길이가 18 m인 동서방향의 2개 측선에서 실시하였다. 측선에서의 탐사 간격은 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 전체 시간대역에서 반사파 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 중심 샘플의 값으로 정하는 평균 필터링을 거친다.

(3) 전기비저항탐사

전기비저항탐사는 다보탑과 석가탑 지반에 대하여 남북방향 19개의 수평탐사 측선과 다보

탑의 좌측면과 석가탑의 우측면 각각 1개씩의 수직탐사 축선을 배열하였다(Fig. 2). 사용한 탐사기기는 OYO사의 McOHM Mark-2이다. 수평탐사는 전극간격 1m의 Wenner 배열을 이용하였는데, 자료의 신뢰성을 높이기 위해 한 측정점에서 4회씩 반복 측정하였으며, 측정수치가 일정치 않을 경우 16회 반복 측정으로 측정의 정확성을 기하였다. 수직탐사에서도 전극간격을 1~9 m로 점차 증가시키는 Wenner 배열법을 활용하여 석탑 지하의 2차원 전기비저항 분포를 파악하였다. 수평탐사 자료는 겉보기 비저항으로 전환하고, 전환된 겉보기 비저항치를 이용하여 각 축선별로 비저항의 분포와 지반의 변화경향을 도시하였다(Fig. 5a). 역산에 의한 지하 지질구조에 대한 2D 전기비저항 모델을 결정하기 위하여 상용프로그램(Interpex사의 Resix)을 이용하여 전기비저항 단면도를 제작하였다(Fig. 5b와 5c).

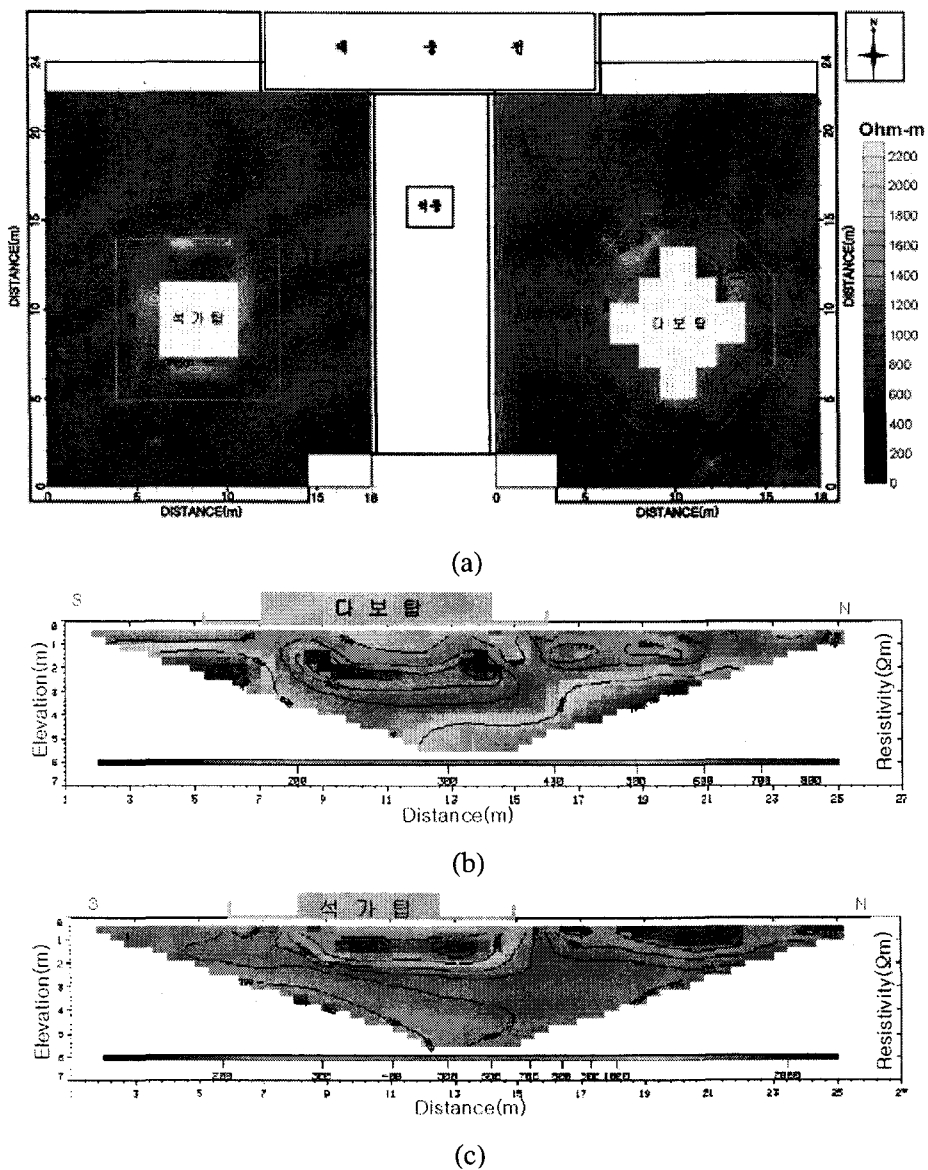


Fig. 5 (a) Resistivity map around two stone pagodas from the Wenner method with the pole interval of 1 m. Resistivity profiles along Line DVR-1 in the Dabotap site, (b) and along the Line SVR-1 in the Seokgatap site, and (c) All results are obtained by the Wenner method. See Fig. 2 for the location.

## 4. 지구물리탐사 결과 및 고찰

### 4.1 다보탐 지반

다보탐 부근의 전기비저항 탐사 결과, 전반적으로 65~1071  $\Omega\text{m}$ 의 범위를 보이고 있으며, 대체적으로 석탑과 인접한 부분에서 저비저항과 고비저항의 경계가 나타났다. 다보탐 지반의 외부는 전기비저항이 200  $\Omega\text{m}$  내외의 저비저항을 나타내고 있는 반면, 다보탐 지반은 최대 1071  $\Omega\text{m}$ 의 상대적인 고비저항을 나타낸다. 특히 다보탐 북동측 3 m 지점하부 지반이 주변보다 저비저항을 보여 지반이 상대적으로 연약함을 보이고 있다. 또한 다보탐 하부 1 m 깊이부터는 최저 100  $\Omega\text{m}$  정도의 저비저항층이 지지기반을 형성하는데, 이는 지반 구축시 점토층을 중간 중간에 넣었을 가능성을 시사한다(Fig. 5).

다보탐 지반의 탄성과 P파 속도는 500~800 m/s의 범위를 보이는데 이는 석가탑 지반보다 약 244 m/s 정도 높은 탄성과 속도로서 다보탐지반이 상대적으로 견고함을 의미한다. 또한, 탄성과 반사법 탐사 도면의 남북방향의 DS-1, DS-2 축선의 9~19 m 사이와 그 밖의 지역에서 서로 다른 매질차이를 발견하였다. 다보탐 지반의 북서측 약 3 m 지점은 탄성과 속도가 주변보다 150~200 m/s 낮은 연약지반으로 관찰되는데 이는 전기비저항 분포와도 일치한다. 이러한 현상은 다보탐이 전반적으로 북북서 방향으로 약 0.6°의 경사를 갖는 원인이라고 판단된다.

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

### 4.2 석가탑 지반

전기비저항 수평탐사의 결과는 다른 탐사에 비해 석가탑 지반의 범위가 분명하게 나타난다. 석가탑 지반에 대한 전기비저항값은 전반적으로 98~2387  $\Omega\text{m}$ 의 범위를 보이고 있으나, 석가탑 지반의 외부 지역은 그 값이 400  $\Omega\text{m}$  이하로서 상대적으로 낮은 비저항을 나타낸다(Fig. 5). 대체적으로 탐 주변에서 주변지역보다 상대적으로 높은 비저항을 나타내고 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 m 까지 연장되어 있는 것으로 보인다. 석가탑 북측면 울타리 부근의 축선 10m 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. 탄성과 탐사 단면도 결과에 의거하여 남북방향의 SS-1, SS-2 축선의 9~21 m 사이와 그 밖의 지역에서 서로 다른 매질차이를 발견하였다. 석가탑 지반에 대한 GPR 탐사에서는 석가탑 부지와 원지반의 경계에서 뚜렷한 매질변화를 확인할 수 있었고, 또한 배수로의 위치를 확인할 수 있었다.

### 4.3 탐사결과의 고찰

#### 4.3.1 석탑 기초의 경계

다보탐, 석가탑 부근 지반의 전기비저항은 대체로 200~2200  $\Omega\text{m}$ 의 분포이다. 석탑지반의

외부는 200  $\Omega$ m내외의 낮은 비저항을 나타내는 반면, 석탑지반은 최대 2200  $\Omega$ m의 상대적인 높은 비저항을 나타내고 있다. 특히 다보탑과 석가탑의 북쪽 지반이 주변보다 낮은 비저항을 보여 상대적으로 연약함을 보이고 있다.

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

#### 4.3.2 N치 추정

표준관입시험에 의한 N치를 산출해야 하지만, 문화재라는 이유 때문에 S파 속도를 이용하여 석가탑지반의 N치를 추정하였다. 석가탑의 지반에 대하여 각 축선별로 매 0.5 m 마다 3~5개 깊이에 대하여 P파 진파속도를 구한 후 미고결층에 대한 P파와 S파 속도간의 경험식을 활용하여 S파 속도를 구하였다. 석가탑 지반의 P파 속도는 300~500 m/s, S파 속도는 140~200 m/s의 범위를 보이며 N치는 약 5정도로 해석된다. 다보탑 지반의 P파 속도는 500~800 m/s, S파 속도는 200~350 m/s의 범위를 보이며 N치는 약 6정도로 해석된다. 또한 다보탑 지반이 석가탑 지반보다 약 244 m/s 정도 높은 탄성파 속도를 보여 지반이 상대적으로 견고한 것으로 나타나고 있다.

#### 4.3.3 지반환경비교

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

탄성파 속도분포를 볼 때 다보탑과 석가탑 직하부 지반의 P파 속도는 200~698 m/sec의 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 탄성파 속도의 경우에 해당된다. 표준관입시험 N치는 대략 5(석가탑)~6(다보탑) 범위로 추정되는데 이는 연약지반에 해당되는 값이다.

허용지지력에 대한 값은 수정마이어 호프식이나 Pack-Hanson-Thornburn에 의한 방법을 적용하여 구할 수 있다 (Das, 1998). 석가탑 지반의 허용지지력은 대략 5~7 ton/m<sup>2</sup>의 값으로 분석되는데, 석가탑 상층기단부와 하층기단부의 내부석재와 석재사이의 공극률을 50%로 인정할 경우 석가탑의 현재 단위 면적당 하중은 약 8.6 ton/m<sup>2</sup>이며, 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/m<sup>2</sup>이나, 실제하중은 약 8 ton/m<sup>2</sup>로서 허용지지력과 비슷한 수치를 나타내어 충분한 안전도를 유지하는 범위는 아니나 현재까지는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 실제로 기단석의 대부분이 이격되고 어긋나 있는 석가탑과는 달리 다보탑은 그 자태를 잘 유지하고 있다.

## 물리탐사 기술 심포지움

결론적으로 현재 석가탑의 지반상태는 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.

### 5. 결론

국가 주요 문화재인 불국사의 다보탑과 석가탑의 지반특성을 파악하기 위하여 복합 지구 물리탐사 및 초음파 속도측정을 실시하였으며 석재와 지층구조 및 지반상태의 결과는 다음과 같다.

(1) 두 석탑을 구성하는 석재에 대한 초음파 측정 결과는 석가탑에서는 속도범위는 1217~4403 m/s이며 평균 속도가 3227 m/s로 나타났고, 다보탑에서는 속도범위는 584~5845 m/s의 분포로 평균 속도가 2901 m/s이다. 이 속도값으로부터 경험식을 이용하여 구한 일축강도는 석가탑 부재는 평균치가 463 kg/cm<sup>2</sup>로서 신선한 암석의 약 20~30%에 해당하며, 풍화도는 평균 37%로 나타났다. 다보탑 부재에서 추정된 일축압축강도는 평균치가 409 kg/cm<sup>2</sup>이고, 풍화도는 평균 43%로 나타났다.

(2) 다보탑, 석가탑의 전기비저항은 200~2200 Ωm의 분포로 나타났다. 석탑지반의 외부는 200 Ωm내외의 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.

(3) 탄성과 P파 속도는 다보탑 지반이 500~800 m/s, 석가탑이 300~500 m/s의 범위이다. 다보탑 지반이 석가탑 지반보다 높은(~244 m/s) 탄성과 속도를 보여 지반이 상대적으로 견고한 것으로 나타나고 있다. 또한, 다보탑 지반의 북서쪽 약 3 m 지점은 대체로 150~200 m/s 낮은 속도분포를 나타내어 주변보다 연약지반으로 판단된다.

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

(5) 석탑의 북서쪽 부분이 주변지역보다 저속도대/저비저항값 지역으로 나타났다. 이러한 공통적인 결과는 석탑의 북서쪽 부분이 연약한 지반으로 조사되었으며, 이는 다보탑과 석가탑이 북서쪽으로 기우는 현상의 원인으로 판단한다.

## 사 사

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

## 참고문헌

- 권경원, 송인춘, 1995, 석재 오염 원인 및 오염물질의 성분 분석에 관한 연구: 대한 건축학회지 11(7), 81, 245-253.
- 김기현, 서만철, 2001, 공주 능치지역 천부 지하구조에 대한 지구물리학적 연구: 대한지구물리학회, 지구물리 4(2), 103-111.
- 김수진, 2001, 한국의 석조문화재 보존, 문화재 보존에 있어서의 지질학의 역할: (서만철 편집), 대한지질학회 · 대한자원환경지질학회, 제17차 학술강연회 논문집, 16-26.
- 김수진, 여상진, 장세정, 성소영, 이범한, 2000, 불국사 다보탑의 훼손현황과 보존대책: 한국문화재 보존과학회, 제12차 학술회의 논문집, 19-26.
- 김은영, 1997, 최근 석조문화재의 보존연구 동향: 한국보존과학회 제6회 학술발표회 논문집.
- 김유선, 1997, 매장문화재의 과학적보존 개요: 보존과학회지, 6, 100-109.
- 류제라, 서만철, 2001, 익산미륵사지 지반특성에 대한 지구물리학적 연구: 대한지구물리학회, 지구물리 4(1), 1-10.
- 류제라, 서만철, 2004, 춘궁리오층석탑 지반특성에 대한 지구물리탐사: 공주대문화재보존과학연구소, 문화재과학기술 3, 1, 21-28.
- 서만철, 송인선, 최희수, 2001, 암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단: 지구물리 4(1), 57-69.
- 서만철, 송인선, 최희수, 2002, 초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조 안전 진단: 지구물리 5(3), 199-209.
- 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, 손산리 고분군의 지구물리학적조사를 통한 고분 축조방법 고찰: 보존과학회지, 6(1), 61-70.
- 서만철, 최희수, 이찬희, 오진용, 2003, 감은사지 3층석탑(서탑)의 지반특성을 위한 지구물리탐사: 대한지구물리학회, 지구물리 6(1), 39-46.
- 석굴암조사단, 1990, 석굴암 조사보고서. 석굴암의 과학적 보존: 문화재관리국, 39-60.
- 이대성, 1980, 석질문화재에 미치는 자연환경 조사: 보존과학연구, 제1집.
- 이상헌, 1999, 석굴암을 이루는 암석의 풍화현상: 보존과학회지, 8, 1-9.
- 임길재, 민경원, 김재동, 1994, 국내산 석재류의 내구성에 관한 연구: 한국 자원공학회지, 31(5), 435-443.
- 임효재, 1997, 고고학적 발굴과 출토과정에서의 제문제점: 보존과학회지, 6, 2, 110-118.
- 오선환, 서만철, 2001, 방어산 마애여래입상의 안전진단을 위한 지구물리탐사: 대한지구물리학회, 지구물리 4(1), 11-20.
- 이상헌, 신철균, 최기주, 1997, 보존을 위한 석조문화재의 특성과 암석의 풍화현상에 대한 연구 (II) -전라남도 나주시, 화순군, 장흥군 일부지역-: 보존과학회지, 6(1), 31-60.
- 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공 급지에 대하여: 대한지질학회, 지질학회지, 36(3), 335-340.
- 최희수, 서만철, 오진용, 2003, 불국사 석탑의 물성 및 지반특성조사: 공주대문화재보존과학연구소, 문화재과학기술 2(1), 141-154.
- Das, B.M., 1998, Principles of geotechnical engineering (4th ed.), PWS Publishing Co., Boston, U.S.A., 712.
- Goodman, R.E., 1989, Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons, New York.
- Suh, M. 2001, Conservation of the Muryong Royal Tomb of Baekje dynasty, Korea, The Ohio State University, on Campus. 30, 14, 6-10.