

# 공주 마곡사 오층석탑의 비파괴 지반탐사와 안전진단 및 거동계측

지윤정\* · 김성배\*\* · 조영훈\* · 김지영\* · 서만철\*\* · 이찬희\*

\*공주대학교 문화재보존과학과, \*\*공주대학교 지질환경과학과

## Non-destructive Geophysical Survey and Movement Monitoring for the Five-storied Stone Pagoda in the Magok Temple, Kongju, Korea

Yun Jung Jee\*, Sung Bae Kim\*\*, Young Hoon Jo\*, Jiyoung Kim\*,  
Man Cheol Suh\*\* and Chan Hee Lee\*

*\*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University,  
Kongju 314-701, Korea*

*\*\*Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University,  
Kongju 314-701, Korea*

### 1. 서 언

충남 공주시 사곡면 마곡사 경내에 위치한 마곡사 오층석탑은 보물 제799호로 지정된 석조문화재로 국내 다른 석탑에서는 볼 수 없는 라마식의 독특한 풍마동 상륜부를 가지고 있어 석탑의 조성 시기를 고려 말기로 추정할 수 있게 한다. 따라서 역사학적 및 미술사학적으로 많은 주목을 받아왔다. 그러나 이 탑은 현재 3층 탑신부부터 북서방향으로 경사지고 있어 구조적 문제점이 제기되고 있다.

이 탑은 여러 차례의 수리와 부분적인 보존처리가 있었으나, 전체적인 재질특성, 풍화훼손도 평가 및 안전진단은 실시된 바 없다. 따라서 이 연구에서는 석탑의 구조적 불안정의 원인을 규명하기 위하여 탑의 지반환경을 파악하고 거동 양상을 분석하였다. 이 결과는 마곡사 오층석탑의 보존과학적 문제점을 명확히 밝히고 보다 근본적인 보존수복계획 방안과 훼손방지대책을 수립하는데 효과적으로 활용될 것이다.

## 2. 현황 및 연구방법

마곡사 오층석탑은 1973년 대웅보전의 화재로 인해 원래의 위치에서 전면으로 이동했다는 기록이 있으며, 수차례의 보수공사를 통해 부분적으로 이질 석재로 대체되어 있다. 이 석탑은 균열과 박리박락이 주요 훼손현상으로 나타나고 있으며 기단부는 생물의 피도가 높다. 또한 육안으로 확인이 가능할 정도로 구조적인 불균형 상태에 놓여있다.

이 연구에서는 마곡사 오층석탑의 지반 환경을 파악하기 위하여 탄성파탐사, 지하레이더탐사(GPR), 전기비저항탐사를 적용하였다. 탄성파탐사는 and-on spread의 배열 방식을 이용하였으며, 전체 측선은 23m의 길이로 총 8개 설치하였다. 수신기 간격과 최초 수신기와의 간격은 모두 1m로 하였으며, 사용된 에너지원은 2kg 타격도구를 사용하였다.

GPR탐사는 중심주파수 250MHz의 쉴드 안테나를 선택하고, 측선은 33m 길이 4개와 6m 길이 7개를 적용하였다. 탐사간격은 5cm였으며 트레이스당 샘플 수는 512, 샘플링 주파수는 7914.22MHz이다. 전기비저항 탐사는 웨너배열을 활용하였으며, 측선은 40m의 길이로 6개, 전극간격은 1m로 유지하였다. 또한 거동 계측에서는 경사도 변화 계측기를 이용하여 석탑의 경사도 변위량을 산출하였다. 이 결과는 강수량과의 대비를 통해 기상환경 변화와 석탑의 거동과의 상관관계를 해석하는데 이용되었다.

## 3. 결과 및 해석

탄성파탐사 결과, 석탑 하부지반은 총 4개의 지반으로 104~2857m/s의 탄성파 속도 범위를 보이는 풍화토에서 보통암의 지반이며, 남북측선에서 석탑하부 지반은 북고남저 형태의 지반임을 알 수 있었다(그림 1A). 지하레이더 탐사결과 석탑의 동쪽 지점 심도 2m 부근에 지하 배수관에 의한 구조물이 나타났으나 이 외 특별한 이상대는 파악되지 않았다(그림 1B).

전기비저항 탐사결과, 겉보기 비저항 분포는 약 7~4,500 $\Omega$ m의 변위가 있으며 석탑 주변지반의 전기비저항 분포는 석탑의 서쪽이 동쪽보다 낮은 경향을 보였다. 또한 탐사지역의 심도별 수평적인 전기비저항 분포를 분석해 보면 심도 약 2.5m부터는 뚜렷하게 석탑의 북서쪽이 저비저항대를 보이는 것이 확인되었다(그림 1C).

거동계측은 고감도 센서를 석탑의 기단부와 5층 탑신부 서측면에 동서방향과 남북방향에 각각 2개씩 부착하여 시간에 따른 경사변화를 측정하였다. 계측기간은 2006년 02월 10일부터 2006년 07월 06일까지이며 20분 간격으로 측정하였다.

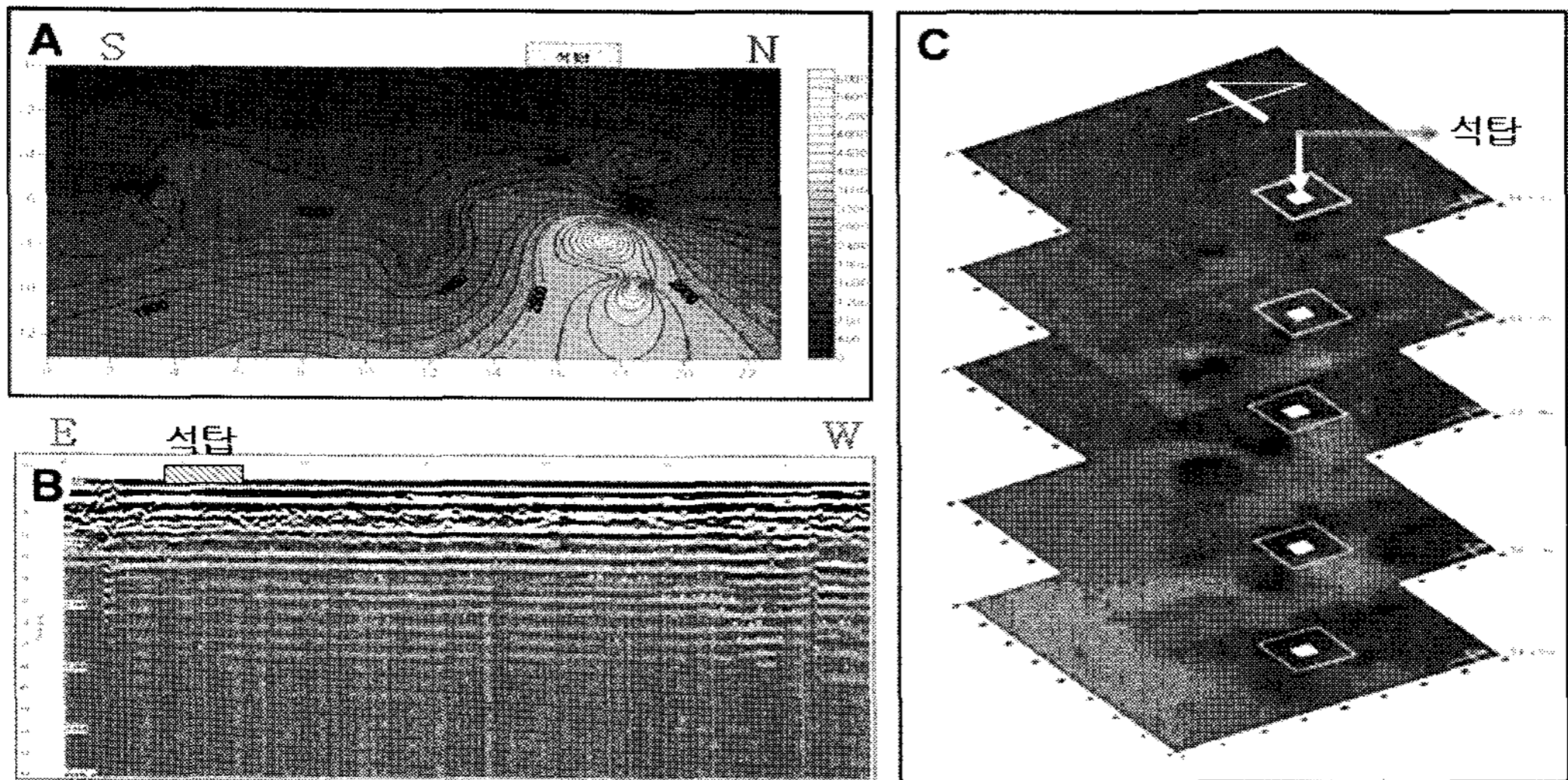


그림 1. 마곡사 오층석탑의 지반탐사 결과. (A) 탄성파탐사 결과 단면도, (B) GPR탐사 결과 단면도, (C) 전기비저항탐사 결과의 깊이별 3D 단면도.

표 1. 마곡사 오층석탑의 경사도 변화 계측결과.

Sensor		관측기간	변화량			방향
			$\mu\text{rad}$	mm/m	년간변화량 mm/m·y	
5층 탑신부의 Sensor 1 (801H)	T1 X 방향	06.02.01 - 06.07.06	17.122	0.017	0.044	+북
	T2 Y 방향	06.02.01 - 06.07.06	47.316	0.047	0.122	+서
기단부의 Sensor 2 (801S)	T3 X 방향	06.02.01 - 06.07.06	30.892	0.031	0.079	+북
	T4 Y 방향	06.02.01 - 06.07.06	887.186	0.887	2.280	+서

X방향: 마곡사 5층석탑을 남쪽에서 볼 때 앞(S)으로 기울면 -  
Y방향: 마곡사 5층석탑을 남쪽에서 볼 때 왼쪽(W)으로 기울면 +  
기준점: 2006년 2월 10일 0시 정각, 기준종점: 2006년 7월 6일 0시 정각

거동계측 결과, 5층 탑신부 센서의 연간 변화량은 북쪽으로 0.044mm, 서쪽으로 0.122mm이었으며, 기단부 센서의 연간 변화량은 북쪽으로 0.079mm, 서쪽으로 2.280mm이었다(표 1). 두 지점 모두 센서를 중심으로 북서쪽으로 회전하는 경향을 보였다. 2006년 1월부터 7월까지 마곡사 지역의 강수량은 총 735.3mm였다. 이를 기준으로 각각의 거동 량과의 관계를 도시화 한 결과 강수량이 증가함에 따라 전반적으로 이동변위량이 증가하였음을 알 수 있다(그림 2).

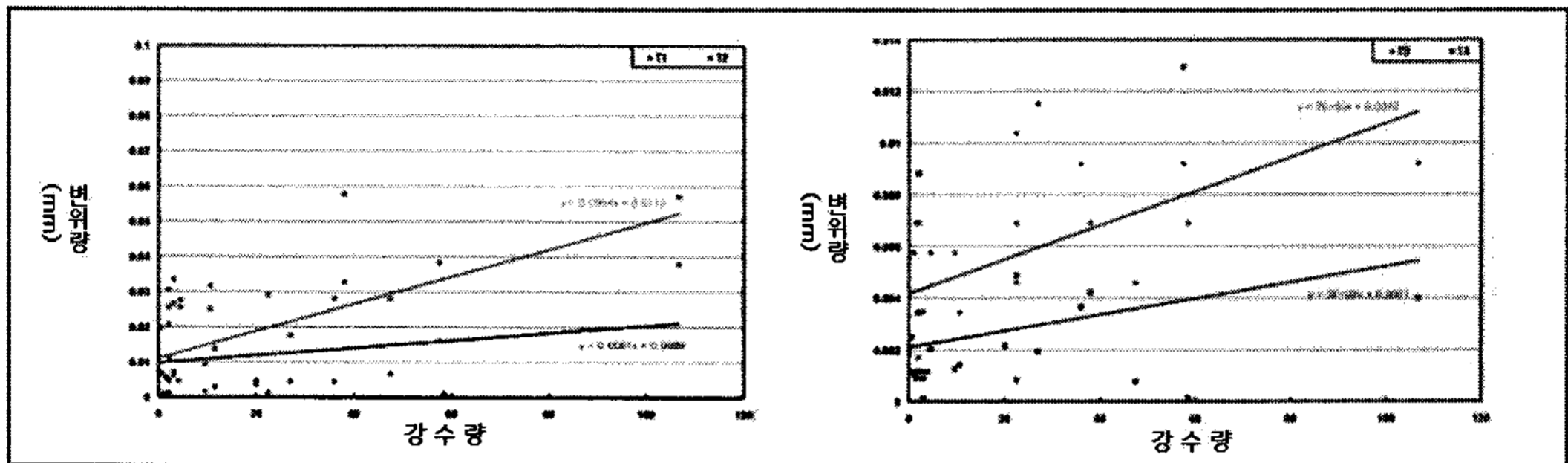


그림 2. 마곡사 오층석탑의 강수량에 대한 이동변위량과의 관계.

#### 4. 고찰 및 결론

이 연구는 마곡사 오층석탑의 구조적 불안정의 정확한 원인을 파악하기 위하여 석탑의 탄성과 탐사, GPR탐사, 전기비저항탐사 및 거동 계측을 실시한 것이다. 탄성과 탐사 결과, 파속 104~2875m/s의 범위를 보이는 풍화토에서 보통암의 지반으로 나타났으며 남북측선에서 석탑하부의 지반이 북고남저의 형태를 보였다. 지하레이더 탐사 결과 심도 2.5m 이내에서는 지반의 특별한 이상대는 파악되지 않았다. 또한 전기비저항탐사에서 겉보기 비저항 분포는 약 7Ωm에서 4,500Ωm로 나타났으며, 심도 약 2.5m 부터 뚜렷하게 석탑의 북서쪽이 상대적으로 저비저항대를 보였다.

거동계측 결과, 석탑은 현재 북서쪽으로 회전하는 경향을 보였으며, 강수량이 증가함에 따라 전반적으로 이동 변위량이 증가함을 알 수 있었다. 따라서 이 석탑은 변위에 대한 장기관측 및 3D 스캐닝을 이용한 전체적인 구조해석이 필요하다. 또한 북서쪽 연약지반의 강도와 지지력 산출을 위한 지반탐사를 병행하여 그 결과에 따른 보강 기법을 강구해야 한다. 한편 지속적인 기상계측을 통해 집중강우에 대한 대책을 수립하고 석탑의 원형 보존을 위한 원위치 확인이 필요한 것으로 판단된다.