지구물리 제 4권 제 1호, p. 1-10, (2001년 3월)

익산미륵사지 지반특성에 대한 지구물리학적 연구

류제라 · 서만철
공주대학교 문화재비파괴진단연구실

요 약

많은 유형문화재들이 과학적인 보존, 보수 없이 손상되어지고 있다. 이에 국내 유형문화재의 보수·보존 방안 대책과 복원에 대한 설계 자료로의 이용을 목적으로 익산미륵사지 서탑을 대상으로 지구물리학적 탐사를 적용하였다. 전기비저항, 탄성파, GPR탐사 등의 지구물리학적 탐사를 6 개 측선에서 시행하여 서탑의 천부구조 영상화를 통해 지반특성과 구조적 안정성을 조사하였다. 전기비저항탐사에 의해 저비저항대 부분이 현재 탑이 남서쪽으로 기울어진 현상에 영향이 있는 것으로 해석된다. 탄성파 굴절법탐사와 GPR탐사에서 다짐층과 원지반층의 경계가 약 3.3 ~ 3.5 m로 나타남이 일치하고 있으며 다짐층은 탑을 중심으로 넓게 분포하는 것이 아니라 북쪽으로 치우쳐 탑의 면적보다 작게 조성된 것으로 판단되고 현재 탑이 남서쪽으로 약간의 기울임을 보이는데 여기에는 지반강화대책이 필요한 것으로 판단된다.

주요어: 원지반, 축조지반, 전기비저항탐사, 탄성파탐사, GPR탐사

Jera Ryu and Mancheol Suh, 2001, A Geophysical Study on Site Characteristics of the Western Pagoda of the Mireuksa Site, Iksan, Korea. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 4, n. 1, p. 1-10

ABSTRACT: A number of tangible cultural properties have been left to suffering damage without any scientific conservation or maintenance. We conducted nondestructive geophysical explorations around the Western pagoda of the Iksan Mireuksa Temple for the purpose of preparing the counterplan of its conservation and maintenance and of utilizing the geophysical information for the design of repair. Geophysical image of the shallow subsurface around the construct resulting from electric resistivity, seismic refraction, and GPR methods carried out along 6 lines in the site was used to investigate the relationship between the foundation characteristics and the structural safety. Tilting of the pagoda southwest towards seems to result from the low resistivity zones found in the southwestern part. The GPR and seismic surveys revealed a boundary at depth of 3.3 ~ 3.5 m dividing into two layers, compacted overlaid soil and the original ground. The boundary appears to dip southwest. The artificial layer as a foundation does not covers as much as the bottom area of the pagoda. This top soil dipping southwest seems to result in tilting of foundation southwestward towards. Our geophysical result suggests ground reinforcement in the western part of the survey area for the conservation of the construct.

Key words: original ground, artificial ground, electrical resistivity, seismic and GPR survey

(Jera Ryu and Mancheol Suh, Nondestructive Research Lab. Cultural Property, Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea, e-mail: jel1224@hanmir.com, mcsuh@Kongju.ac.kr)

1. 서 론

익산(益山) 미륵사(彌勒寺)는 백제 무왕(武王) 때 건립된 국찰(國刹)로 3 탑(三塔), 3 금당(三金堂), 강당(講堂), 그리고 3 면 승방(三面 僧房)이 배치되어 있는 우리나라에서 가장 독특한 가람배치(伽藍配置)인 3 원 병립식(三院 竝立式)으로 되어 있다(전창기, 1999).

창건 당시의 건축물로 유일하게 남아 있는 서원(西院) 석탑은 1962년에 국보(國寶) 제 11 호로

지정되었는데 탑의 1/3 정도가 무너져 현재 6층까지만 남아있다. 탑의 서쪽 절반 가량이 무너져 있던 것을 1915년 일본인들이 수리할 때 1층 부분은 석축을 쌓고 그 윗부분은 콘크리트를 채워서 피라밋 모양으로 보수하였다(전창기, 1999). 이 탑은 탑을 구성하고 있는 부재(部材)들이 목조건물처럼 각각 독립되어 결합되어 있기 때문에 목탑(木塔)에서 석탑(石塔)으로 이전하는 시기의 양식으로 석탑의 연구에 있어서 매우 중요한 유적으로 인정되고 있다. 서탑은 현재 6층으로 비교적 잘 보존된 동쪽면 중에서도 1층 부분만 완존하고 있으며 2층 이상 6층까지는 남서쪽 모퉁이가 모두 깨져 동북쪽 추녀 부분만이 겨우 남아 있다. 또한 깨진 부분과 틈서리가 수리 당시 콘크리트나 시멘트 몰탈로 채워져서 원형을 알아보기 힘든 부분이 많이 있으며. 현재 남서쪽으로 약간 기울어져 있는데 특히 6층은 그 정도가 매우 심하다(전창기, 1999).

본 연구에서는 미륵사지내 현존하는 서탑의 지반에 지구물리탐사를 적용하여 우리의 문화 유산인 미륵사지 서탑의 보존, 보수의 방향 및 설계자료로 활용될 수 있도록 하였다.

문화재의 특성이나 주변 환경에 따라 적용될 수 있는 지구물리 탐사방법은 다르겠지만 일반적으로 지반조사를 위한 탐사방법으로는 탄성파탐사(seismic survey), 전기비저항탐사(resisvity survey), GPR탐사(ground penetrate radar survey), 자력탐사(magnetic survey) 등이 있다. 이중 본 연구에서는 서탑 주위 동서남북 방향의 4개의 측선(Fig. 1)에서 탄성파탐사, 전기비저항탐사, GPR탐사를 시행하였다. 1978년에 발굴조사와 복원계획으로 익산 미륵사지내에서 여러

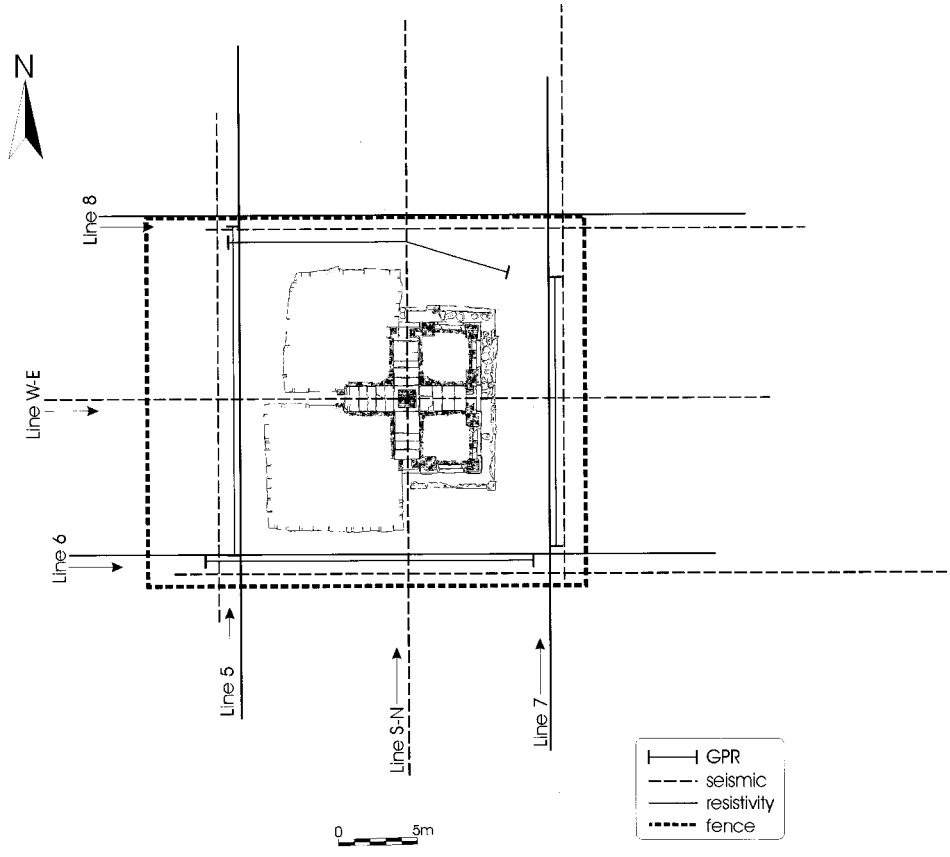

Fig. 1. Geophysical survey lines in Western pagoda of the Mireuksa site.

가지 조사가 행해졌는데 그 중에서도 지반조사로 시추조사와 표준관입시험이 수행되었다. 본 연구 지역인 서탑지와는 비교적 거리가 있지만 서탑의 남측면의 경우에는 지질분포가 위에서부터 사질 점토, 모래, 풍화암의 세 층으로 구성된 것과 두께가 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

2. 지반 환경 지구물리탐사

2.1. 자료획득 및 처리과정

2.1.1. 전기비저항탐사

본 탐사는 익산 미륵사지 서탑을 중앙에 두고 동서남북 네 방향에 각각 41 m 길이의 측선을 잡아 미국 AGI사의 Sting-R1 및 다채널 자동측정 시스템인 Swift System을 이용하여 슐럼버져 배열방식으로 탐사를 실시하였다. 조합 가능한 모든 측점에 대해 측정이 이루어졌으며 28 개의 전극을 사용하여 전극간격은 1 m로 고정하고 1 Spread 당 최대 169 개의 측점에서 겉보기 비저항치를 구한 후 Roll a long 탐사기법을 이용하여 진행하였다. PC로 전송 받은 데이터를 이용하여 지하 지질구조에 대한 2차원 전기비저항 모델(김정호, 1987)을 결정하기 위하여 Loke & Barker(1995)에 의해 개발된 Res2dinv Ver3.33 프로그램을 이용하였다.

2.1.2. 굴절법 탄성파탐사

굴절법 탄성파탐사는 서탑을 중앙에 두고 네 방향에서의 측선과 탑의 중앙을 교차하는 두 측선을 설정하여 실시하였다. 에너지원-수진기 배열방식은 끝점 발파 배열(off-end push spread) 방법을 이용하였으며, 수진기 간격은 1 m, 오프셑 간격은 2 m로 하였다. 발파는 매 측점마다 실시하였으며 여기서 얻은 자료를 굴절법 자료로 활용하였다(Dirk · Horst, 1998). 또한 탑의 중앙을 통과하는 W-E, S-N 측선에서는 양끝 지점 왕복 측정을 하여 지연시간법(Delay-time method)에 의해 불규칙한 굴절면을 그려내는 자료로 이용하였다(Burger, 1992).

사용된 에너지원은 14 Kg sledge hammer, 수진기는 고유주파수가 14 Hz인 OYO Geospace사의 지오폰을 사용하였으며, 탄성파 기록은 OYO Geospace사의 DAS-1 system(48 channel)을 이용하였다. 야외에서 기록된 탄성파 자료는 디지털 자료로 저장하여 각종 분석을 용이하게 하였다. 실험실에서 굴절법 자료처리를 위해 대형 크기로 플롯팅해서 각 channel별 초동시각을 수치화한 후 주시곡선을 작성하여 측점별로 작성된 주시곡선상에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 최적직선식을 찾아 각 직선의 기울기와 시간절편을 구하였다(Dirk O., Horst R. and Lothar D., 1998). 기울기의 역수를 취하여 각층의 탄성파 전파속도를 구하였으며 탄성파 속도와 시간절편 값을 이용하여 각 층의 두께를 구하였다(서만철 · 이원국, 1992).

2.1.3. GPR탐사

본 탐사에서는 스웨덴 MALA GeoScience의 RAMAC/GPR 탐사장비를 이용하였다. 중심주파수 100 MHz의 안테나를 선택하여 반사법에 의한 단속측정(step mode)으로 측선 5 부터 측선 8 까지 4 개 측선에서 실행되었다. 모든 측선에서의 탐사간격은 5 cm, 트레이스당 샘플수는 512, 샘플링 주파수는 1127.62 MHz, 그리고 스태킹은 8 로 하여 탐사를 실시하였다(Fisher · Steward, 1994). 측선 6 에서는 전자기파의 속도 분포를 얻기 위하여 측선의 6 ~ 18 m 구간에서 탐사 간격 2.5 cm 로 CMP측정을 수행하여 쌍곡선 형태로 보이는 반사파를 x^2-t^2 도면에 표시하여 기울기와 속도를 구하였다(Burger. 1992).

2.2. 자료해석

2.2.1. 전기비저항탐사

네 측선의 교차지점의 비저항분포는 서로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있는데(Fig. 2) 전체적으로 탑의 남서쪽에 저비저항대의 존재가 나타나고 측선 5 와 측선 8 에 의하면 북서쪽에도 저비저항대가 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 탑의 축조 지반 상부(3 m이상)에서의 고비저항대의 존재는 동탑 발굴조사 보고서에 의하면 탑지를 조성하기

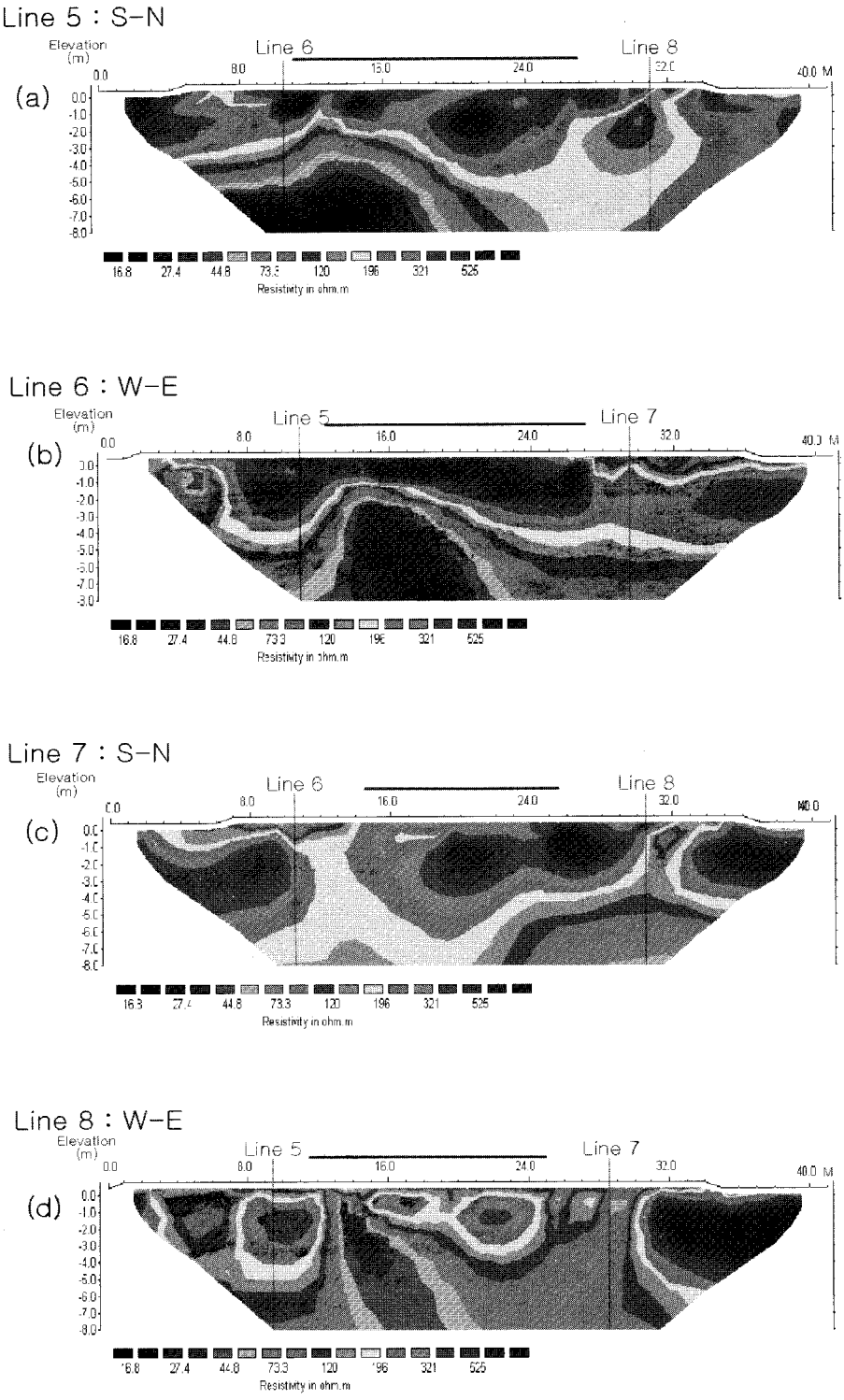

Fig. 2. 2-D Resistivity structure for (a) line5, (b) line6, (c) line7, and (d) line8 (Unit : Ohm-m).

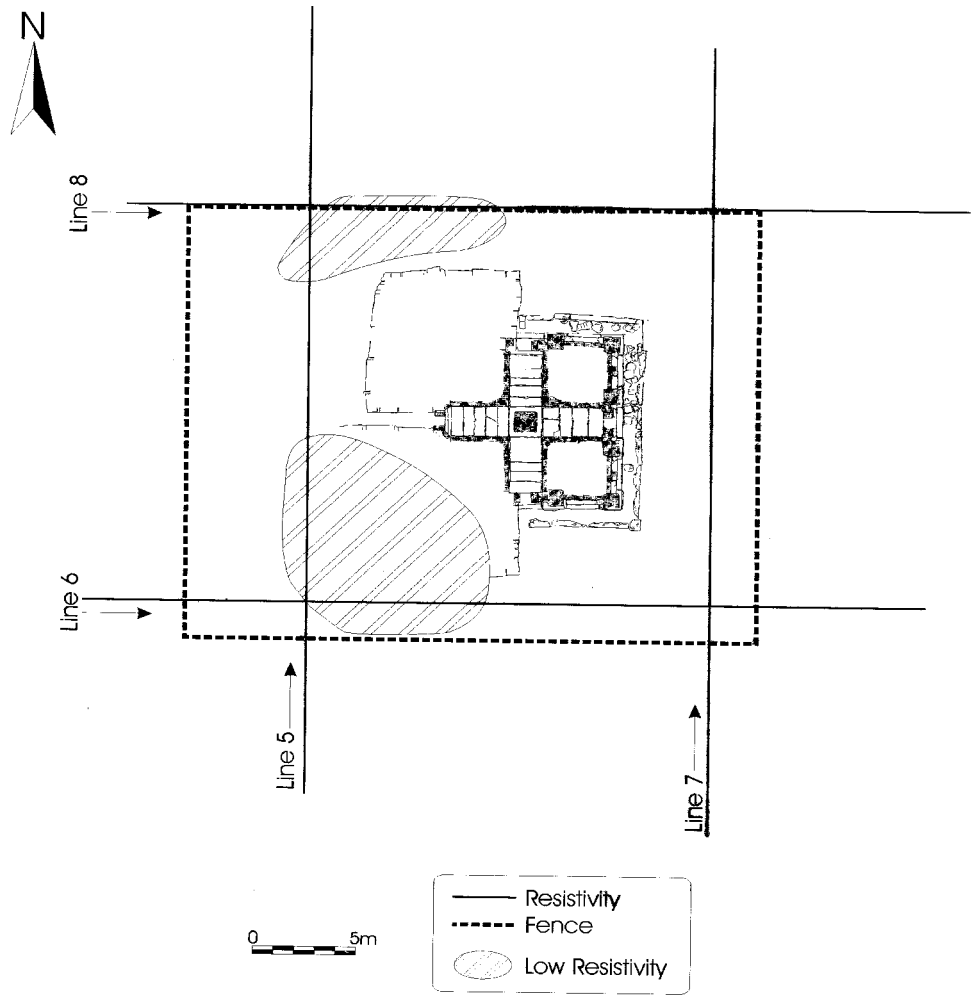

Fig. 3. Distribution of low resistivity zone.

전에 미륵사지 전체에 대한 성토 판축이 있었던 것으로 기록되어지는데 이것으로 볼 때 비교적 축조지반을 조밀하게 조성한 것으로 판단되며 탑의 북서, 남서 모서리 부분 하부(지하 3 m이하)에서 나타나는 저비저항대는 탑의 무너졌던 곳에 석축을 쌓은 부분으로서 석탑의 붕괴전부터 지반이 취약하여 그 결과로 석탑의 서측부가 붕괴된 것으로 판단된다.

2.2.2. 굴절법 탄성파탐사

굴절법탐사 결과 전반적인 지반은 260 ~ 379 m/sec의 탄성파속도를 갖는 상부의 연약지반층과 883 ~ 2508 m/sec의 탄성파속도를 갖는 하부의 비교적 견고한 지반층으로 이루어진다. 탑의 서측은 상기 두 층의 경계가 3 m 내외의 깊이에 존재하며 동측은 그보다 깊은 4.7 m 내외의 깊이에 존재하여 전반적으로 동쪽으로 경사지고 있어 동서방향 수평거리 19 m에 대하여 수직낙차 1.7 m가 발생하여 약 5° 정도 동쪽으로 경사짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 서에서 동으로 측정한 측선 6과 측선 8에서 잘 나타나고 있다(Fig. 4, Fig. 5).

서탑의 중앙을 통과하는 두 측선에 대해 지연시간법을 이용하여 서탑 부지의 지층 경계면을 알아보았다. 측선 W-E에서는 지연시간법(Buger, 1992)에 의해 구한 심도 약 3.3 m 부근에서 탑의 축조지반내에 조밀하게 다져진 층과 그렇지않은 원지반

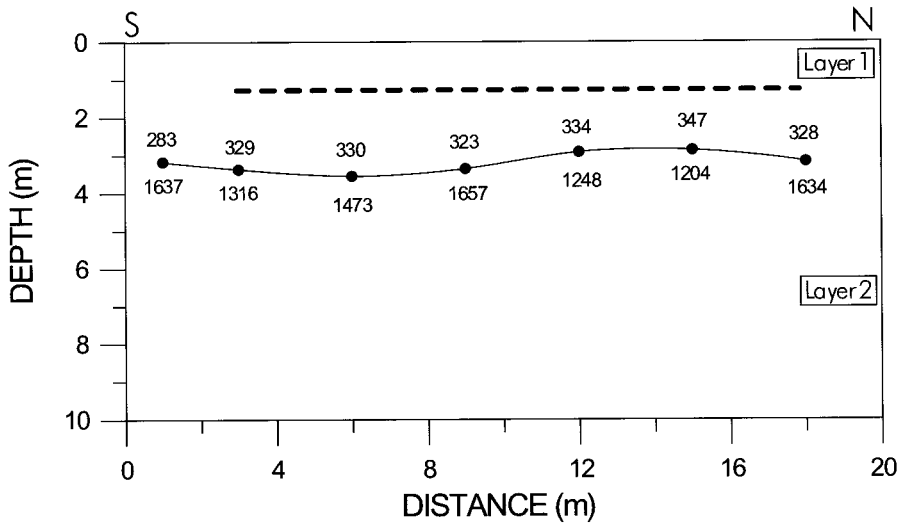

Fig. 4. Distribution of P wave velocity for the line 5, The dotted line represent the extent of Western pagoda along the line 5.

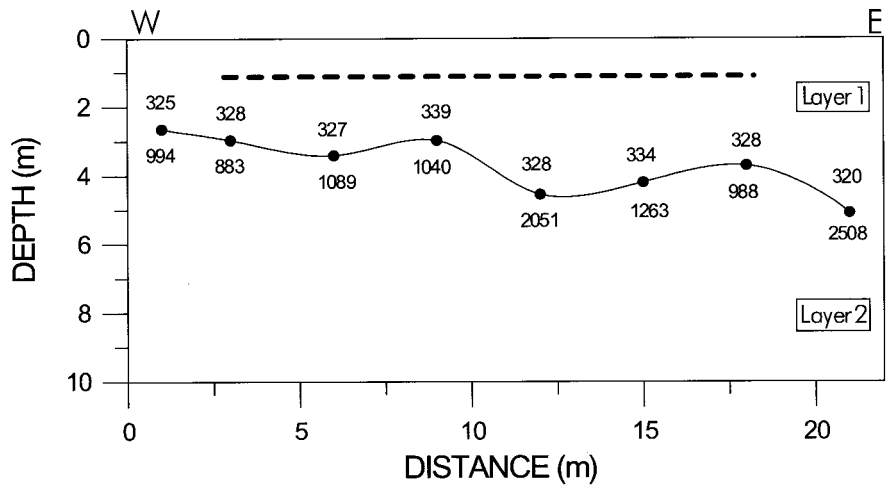

Fig. 5. Distribution of P wave velocity for the line 8, The dotted line represent the extent of Western pagoda along the line 8.

층으로 해석되는 지층의 경계가 뚜렷이 나타났고 (Fig. 6, Fig. 7) 측선 S-N 에서도 심도 약 3.3 m를 경계로 축조지반내 다짐층과 원지반층으로 보이는 지층 경계의 구별이 가능하였다. 또한 양측선에서 축조지반 구축을 위해 터파기한 경계부가 급경사로 확인되고 있으며 측선 S-N 에서는 거리 14 m부근과 33 m부근에 골짜기 형태의 경계부분이 나타나는데 이는 동탑 발굴 보고서(전창기, 1999)를 참고로 하였을 때 탑의 안전을 위해 배수로를 설치했던 것으로 생각된다(Fig. 8, Fig. 9).

2.2.3. GPR탐사

측선 7 에서는 전자기파가 탑의 중심부분이 그 주변보다 깊숙이 투과되는 현상을 보이고 측선 8 에서도 동쪽으로 갈수록 전자기파의 투과심도가 깊어짐을 볼 수 있다(Fig. 10, Fig. 11). 이는 탑쪽

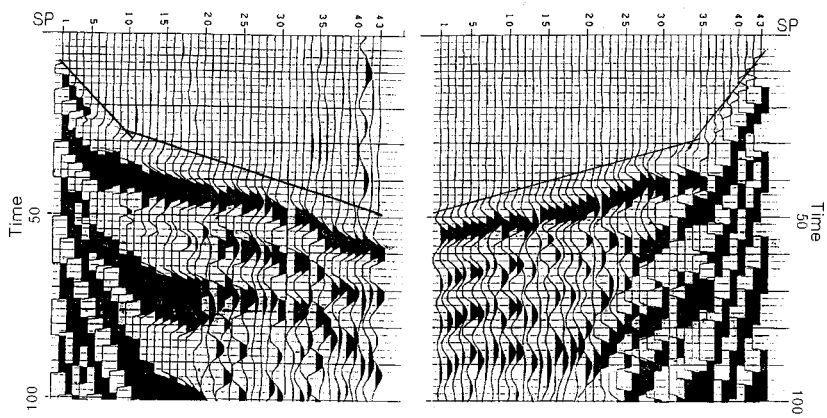

Fig. 6. Shot gathers acquired along the line W-E.

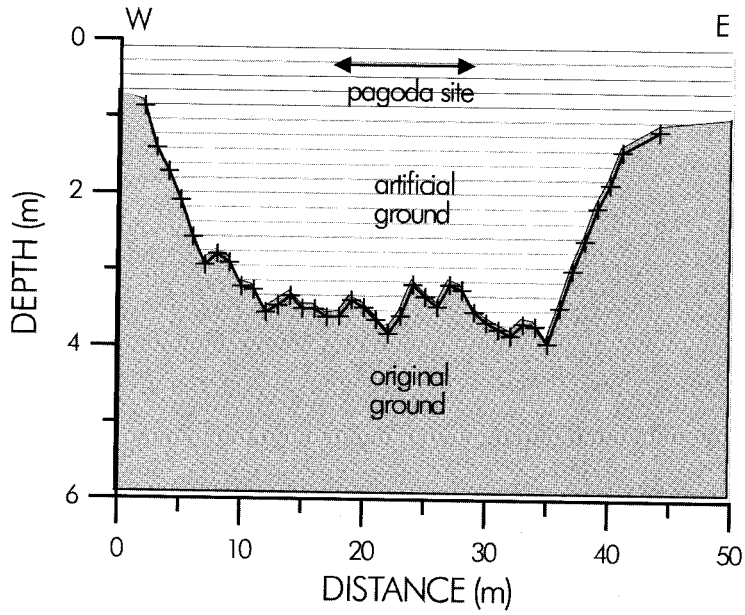

Fig. 7. Subsurface structure along the line W-E from delay-time method at line W-E.

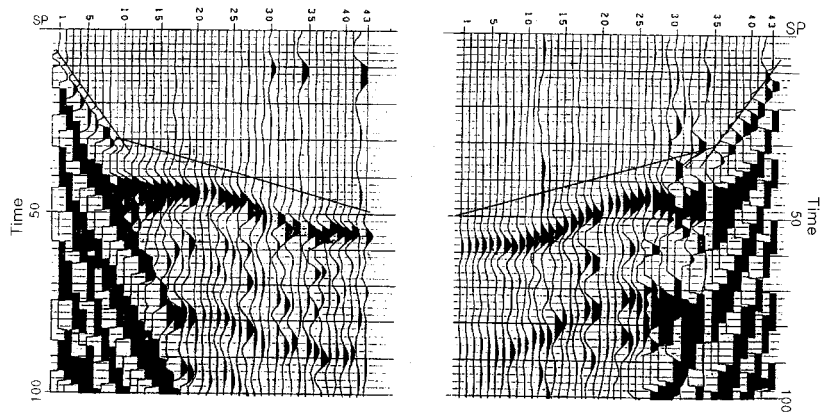

Fig. 8. Shot gather acquired along the line S-N.

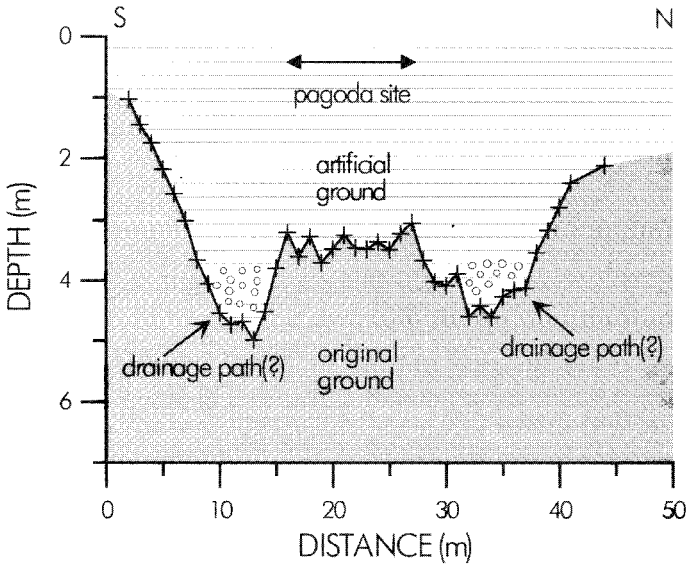

Fig. 9. Subsurface structure along the lineS-N from delay-time method at lineS-N.

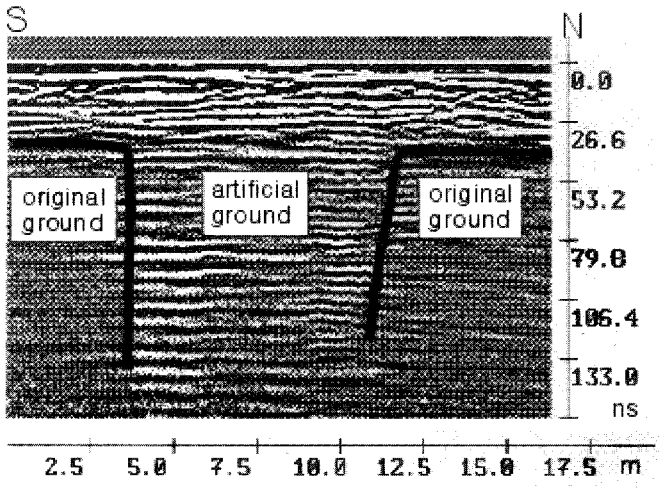

Fig. 10. 100 MHz GPR profile along line7.

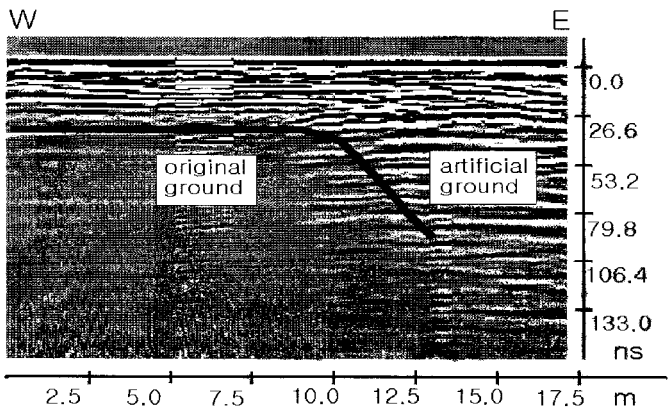

Fig. 11. 100 MHz GPR profile along line8.

으로 가까워질수록 전자기파의 투과 심도가 깊어져 축조지반 내에서도 중심부와 바깥쪽부분의 지반 특성이 다름을 나타낸다(Davis · Annan, 1989). 측선 7과 8에서 전자기파의 투과심도가 깊어지는 현상은 변화가 있는 매질이 깊이까지 존재함을 의미하며(문장수 · 김세환, 1997; Knoll · Knight, 1994) 이는 서탑 축조지반 하부에 인위적으로 형성한 다짐층이 있는 것으로 해석된다. 축조지반내 인위적으로 형성된 다짐층의 깊이는 CMP측정을 통한 전자기파의 투과속도를 약 102 m/μs로 볼 때 대략 3.5 m 깊이로 탄성파 굴절법탐사 결과 밝혀진 3.3 m 깊이와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 탐사자료의 상관해석

익산미륵사지 서탑의 지반특성과 구조적 안정성을 알아보기 위해 서탑을 중심으로 네 방향에서 각각 전기비저항탐사, 탄성파탐사, GPR탐사를 수행하였다. 서탑의 중앙부를 통과하는 측선 S-N, 측선 W-E 에서는 탄성파 굴절법 왕복측정을 실시하였다. 각각의 탐사와 동탑 발굴보고서를 참조하였을 때 서탑지에도 탑을 축조하기 전에 다짐층을 조성하였을 것으로 해석되며, 그 깊이는 각 탐사에서 나타나듯 대략 3.3 ~ 3.5 m 정도로 판단된다. 또한 다짐층은 탑을 중심으로 고르게 분포하는 것이 아니라 북쪽으로 치우쳐 탑의 면적보다 작게 조성된 것으로 판단되며, 이는 전기비저항탐사와 GPR탐사에서 잘 보여주고 있다.

4. 결과 및 토의

본 조사는 문화재라는 대상에 지구물리학적 탐사를 적용하여 우리 문화유산의 보존 · 보수의 방향 및 설계자료로 활용을 목적으로 하였다. 전기비저항탐사를 통해 탑지반부 남서쪽에서 저비저항대를 확인할 수 있었으며 이는 현재 탑이 남서쪽으로 약간 기운현상을 구조적으로 세밀하게 조사할 필요성을 갖게 해 주었다.

탄성파탐사 굴절법에 의한 속도의 분포나 지층 경계를 살펴보면, 탑지반부는 전반적으로 상부의 연약지반층과 그 하부의 비교적 견고한 층으로 나타났다. 탑의 동서 측선을 살펴보면 탑지를 포함한 인근 지반층의 원래 지층구조는 동쪽으로 약간 기울어져 있는 것으로 나타났다. 지연시간법을 이용한 탑부지의 지층 경계구분은 심도 약 3.3 m를 경계로 축조지반내 일반적으로 판축층이라 불리는 다짐층과 원지반층의 구별이 뚜렷하였다.

GPR단면도에 의하면 전자기파의 투과심도가 깊고 낮음으로 나누어져 잘 다져진 다짐층에서는 투과심도가 깊게 나타나고, 그 외의 원지반층에서는 그보다는 전자기파가 덜 투과되어 나타나 서탑지 역시 동탑지와 마찬가지로 탑을 짓기 위해 성토 판축된 것으로 판단된다. 실제 본 연구지역에서는 1978년에 발굴조사와 복원계획으로 여러 가지 조사가 행해졌었는데. 그 중에서도 지반조사로 시추조사와 표준관입시험이 수행되었다. 시추위치가 서탑과는 비교적 거리가 있지만 서탑의 남측면의 경우에는 지질분포가 위에서부터 사질점토, 모래, 풍화암의 세 층으로 구성된 것과 두께가 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 동탑의 경우 마사점토, 사질점토와 돌, 파재(破材)등을 이용하여 총 20 단의 깊이 3.3 m 정도의 판축층이 있었던 것으로 기록되어 있는데(전창기, 1999) 서탑의 경우에는 세 가지 탐사 결과로 볼 때 다짐층의 존재는 확인 할 수 있었으나 일정한 단을 형성하며 이루진 판축층의 특징은 정확히 확인할 수 없었다.

5. 결 론

익산미륵사지 서탑의 지반특성 조사를 위해 전기비저항탐사, 탄성파탐사, GPR탐사를 실시하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 전기비저항탐사에서 서탑의 축조지반상부는 대부분 고비저항대로 나타났다. 남서쪽 하부에는 저비저항대가 존재하는 것으로 나타나 현재 탑이 남서쪽으로 약간 기울어 있는 상태와 전기비저항탐사 결과는 잘 일치하는 것으로 판단된다.

2. 서탑지는 탄성파속도가 260 ~ 379 m/sec의 상부 연약지반층과 883 ~ 2508 m/sec의 하부 기반암층으로 나누어진다. 지연시간법에 의해 깊이

약 3.3 m를 경계로 다짐층과 원지반층으로 나누어지는데 이는 동탑 판축층의 두께 약 3.3 m와 비교적 일치하는 깊이로 나타났다.

3. GPR탐사 결과 측선 7 에서는 서탑지 중심부분에서 전자기파의 투과심도가 깊어지고 측선 8 에서는 탑쪽으로 가까워질수록 전자기파가 깊게 투과되어 탑지와 주변의 매질이 다름을 알 수 있다. 이는 서탑지에서 깊이 약 3.5 m를 경계로 탑의 다짐층과 원지반층의 경계면이 존재함을 시사한다.

4. 익산 미륵사지 서탑의 다짐층은 탑을 중심으로 고르게 분포된 것이 아니라 북서쪽으로 치우쳐 탑의 면적보다 작게 조성된 것으로 나타났다. 현재 서탑의 남서모서리 부분과 북서모서리 부분에는 지반강화대책이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

김정호, 1987, 이차원 전기비저항 탐사자료의 역산, 서울대학교 박사학위논문

문장수, 김세환, 남욱현, 1997, 지하레이더 탐사법을 이용한 지반조사 사례 연구, 지질공학회지, Vol. 7, No. 3, p. 161-172.

민경덕, 서정희, 권병두 1987, 응용지구물리학, 우성문화사

서만철, 이원국, 1992, 탄성파자료 속도분석에 관한 연구, 공주대학교 논문집, 30, p. 81-88.

서만철, 1999, 경북포항시 일월동 택지개발지구의 지반상태 파악을 위한 탄성파탐사, 대한지구물리학회, Vol. 2, No. 1, p. 45-56.

전창기, 1999, 알기쉬운 미륵사지, p. 119.

Buger, H.R., 1992, Exploration geophysics of the shallow subsurface, Prentice Hall, London.

Davis J. L. and Annan, A. P., 1989, Ground-Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, Vol. 37, p. 531-551.

Dirk O., Horst R. and Lothar D., 1998, Combination of common - midpoint - refraction seismics with the generalized reciprocal method J. Applied Geophysics Vol. 39 (4) p. 221-235.

Fisher, S. C., Stewart, R. R. and Jol, H. M., 1994, Processing ground penetrating radar data, Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 2, p. 661-675.

Knoll, M D. and knight, R., 1994, Relationships between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures, Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 1, p. 45-61.

Loke, M.H. and Barker, 1993, R.D., Res2Dinv Ver3.33 software

2001년 1월 5일 원고접수
2001년 3월 26일 원고채택