

## 석조문화재 기초지반 파악을 위한 모형지반에서의 탐사기법 적용

김만일<sup>1</sup> · 이창주<sup>2</sup> · 김종태<sup>2</sup> · 김지수<sup>3</sup> · 김사덕<sup>4</sup> · 정교철<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부, <sup>2</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>3</sup>충북대학교 지구환경과학과, <sup>4</sup>국립문화재연구소 보존과학연구실

### Application of Geophysical Survey to the Geological Engineering Model for the Effective Detection in Foundation of Stone Relics

Man-Il Kim<sup>1</sup>, Chang-Joo Lee<sup>2</sup>, Jong-Tae Kim<sup>2</sup>, Ji-Soo Kim<sup>3</sup>, Sa-Dug Kim<sup>4</sup>,  
and Gyo-Cheol Jeong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Geological Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource

<sup>2</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

<sup>3</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>4</sup>Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage

지표 근접 지질조사 및 매설물 조사에 응용되는 GPR탐사를 통해 석조문화재 기초지반을 효과적으로 탐지하기 위해 토양층과 자갈층이 교호하는 지질공학적인 모형지반(천부 지층구조)을 3 m의 깊이로 재건하여 GPR탐사 및 탄성과 굴절법 탐사를 축선별로 수행하였다. GPR탐사에 사용되는 주파수를 다양하게 적용하여 주파수별 분해능에 따른 모형지반의 경계구분을 확인하였다. 그 결과 100 MHz의 주파수 대역에서 분해능은 낮지만 가장 효과적으로 지층경계를 구분할 수 있었으며, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz의 고주파수 대역을 사용한 결과에서는 전자파의 감쇠로 인해 하부경계를 구분할 수 없었으나 천부의 분해능은 향상되었다. 이로부터 심부에 대한 100 MHz의 자료와 천부에 대한 고주파수 단면도를 조합하여 최종단면도를 얻었다. 탄성과 굴절법 탐사에서는 모형지반의 정확한 경계 및 지층 간 경계면은 파악할 수 없었으나, 모형지반이 위치하고 있는 구간에서의 등속도선이 주변 지역에 비해 상대적으로 깊은 심도까지 분포하는 것으로 볼 때 원지반과 모형 경계의 속도 대비를 파악할 수 있는 것으로 나타났다.

**주요어** : 지질공학모형, GPR 탐사, 탄성과 굴절법 탐사

To effectively delineate the foundation of stone relics by GPR and seismic refraction methods, a geological engineering model was constructed with alternating layer of soil and gravel to a depth of 3 m. This study was aimed at mapping the boundaries of model ground structure and interfaces of alternating layer using the various frequency antenna in GPR survey and seismic velocities. Compared to the resolution from the high frequency antenna, the image resolution from the survey using 100 Hz antenna is the lower, but with the deeper image coverage. On the contrast, the deeper structure was not mapped in the higher frequency data due to higher absorption effect, but the shallow layered zone was distinctively resolved. Therefore subsurface images were effectively provided by integrating the data with 100 MHz and 450 MHz antennas for the deep and shallow structures, respectively. Regarding the seismic refraction data, the boundaries of the model and interface of the alternating layers were not successfully mapped due to the limit of the survey length. However, the equivalent contours of low velocity extended deep as considerable velocity contrasts with surrounding ground.

**Key words** : geological engineering model, GPR survey, seismic refraction survey

\*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

## 서 론

19세기 말 이론적인 전자기파도 빛과 유사하게 금속체나 유전체에 대해 반사한다는 사실이 밝혀진 이후, 전자기파의 이러한 성질을 응용하기 위한 연구가 부분적으로 수행되었으나, 레이더(radio detecting and ranging) 기술의 본격적인 응용은 2차 대전 당시 군사적인 목적으로 수행되기 시작하여 오늘에 이르고 있다.

이러한 레이더를 지상이 아닌 지하에 적용시켜 지하의 대상을 탐지하는 것을 지하 투과 레이더 탐사(ground penetration radar; GPR)라 한다. GPR 탐사는 지하 천부 구조를 고분해능으로 탐사하는 방법이며, 수십 cm에서 수 m 정도의 분해능을 갖는 지하 영상을 신속하게 획득할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 도로 하부의 매설관로 탐사, 포장도로 하부 공동 탐사, 터널의 배면 공동 탐사 등과 같이 구조물의 유지·관리를 위한 비파괴 실험으로 많이 이용되고 있다(손호웅 등, 1999).

1980년대 중반 이후 공학 분야와 고고학 분야를 중심으로 그 적용이 급격하게 증가되고 있지만 공학 분야를 비롯한 각 응용분야에 대한 자료처리 및 해석기법은 정밀측정 기술과 컴퓨터의 급속한 발달에 비해 아직도 기대에 미치지 못하고 있는 실정이다(Davis and Annan, 1989; McMechan *et al.*, 1998; Nakashima *et al.*, 2001; Main and Hammon, 2003; Rashed *et al.*, 2003). 국내에서 김소구오현덕(2003)의 연구에 의하면 GPR 탐사법을 적용해 천층부의 석조문화재 기초지반 및 유적발굴이 가능하며, 이를 위해서 GPR 탐사의 time slice 분석법을 적용해 조사지역의 이상대 반응으로부터 심도별 지하구조 및 문화유적의 분포양상 변화를 파악하였다. 또한, 자력탐사법을 이용하여 국내 매장 문화재의 발굴 가능성 연구도 수행되었다(김승섭 등, 2002). 이와 같이 물리탐사법을 적용해 매장 문화재의 분포를 파악하는 것은 유적지 주변에 전자기 이상치들이 문화재 산물인 유물과 그것을 덮고 있거나 주변의 지반 매질과의 전자기적 특성의 차이로 인해 파악이 가능하다(Breiner and Coe, 1972).

이상과 같이 물리탐사기법을 적용해 지반의 심부까지 지반매질의 특성과 매장 문화재의 부존 상태를 파악할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 지반의 안정성도 함께 파악하기 위한 연구도 수행되었다.

본 연구에서는 석조문화재 기초지반 및 문화재가 분포하거나 분포 추정지역에 대해 문화재 부존 여부의 파악과 더불어 원지반과의 지질구조적 특성을 GPR 및 탄성파 반사법 탐사법을 적용해 평가하기 위한 실험연구

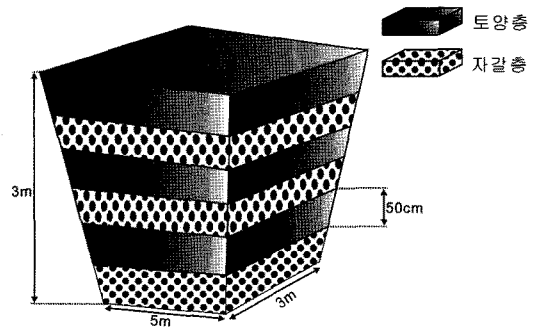


Fig. 1. Geological engineering model with soil and gravel layers for delineating geophysical survey.

를 수행하였다. 특히, GPR의 측정주파수 범위를 고려하여 모형지반의 층 구조와 원지반과의 경계 파악에 있어 주파수별 분해능을 비교하고, 주파수별 분해능을 분석하여 원지반과 모형지반의 단면도를 비교·제시하였다.

## 지질공학모형 시험

### 모형지반

석조문화재 기초지반 및 지하에 매몰되어 있는 문화재는 탄성파 속도와 유전율상수와 같이 주위 지층을 이루고 있는 매질과 대비되는 물성을 가지고 있다. 이러한 물리적 특성을 고려한 지구물리탐사를 통하여 지질매질의 이상대에 대한 효과적인 탐지가 가능할 것으로 기대된다. 이를 고려하여 본 연구에서는 천부 지하에 지층간 물성차가 뚜렷한 지질공학적 모형지반을 제작하였다. 이 모형지반은 자갈층과 토양층이 교호하는 형태로 각 층의 높이는 50 cm로 총 6개 층 3m의 높이를 갖는 가로 5m, 세로 3m의 모형지반을 제작하였다(Fig. 1).

### 지구물리탐사

지구물리탐사 기법을 적용해 천부 석조문화재 기초지반 및 지하에 매몰된 유적물에 대한 효과적인 탐지를 위해 천부 지하에 지질공학적인 모형(소규모의 천부 지층구조)을 축조하고 다양한 주파수 대역의 주파수를 사용하는 GPR 탐사와 탄성파 반사법 탐사를 적용하여 천부의 지질공학적 모형지반의 경계를 확인하고자 하였다.

GPR 탐사법에는 투과법, 반사법, CMP법이 있으며, 각각의 측정 배열은 Fig. 2와 같다. 투과법은 건물의 기둥이나 교각 내부의 균열조사 등에 널리 이용하는 방법으로 시추공을 뚫어 지하단면을 영상화하는 지오토모그

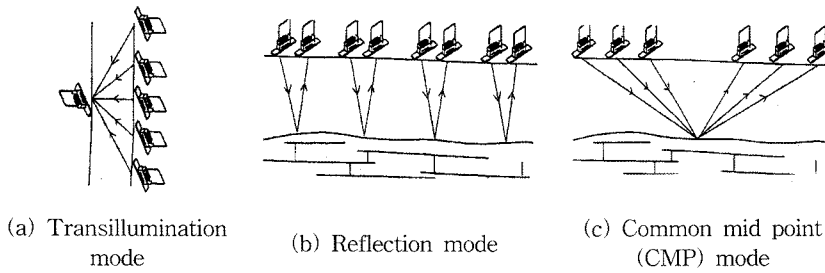


Fig. 2. GPR measurement mode.

래피와 같은 원리이다. CMP법은 송신기와 수신기를 일정한 간격으로 벌려가면서 탐사하는 방법으로 지반 내에서 전자기파의 전파속도를 측정할 수 있기 때문에 대상물까지의 깊이를 파악할 수 있다(Annan and Cosway, 1992; 장호식 등, 2003; 김지수 등, 2003). 본 연구에서는 지반조사에서 일반적인 반사법을 사용하였다. 이 반사법은 송신기와 수신기를 일정한 간격으로 고정시킨 후, 일정한 간격으로 이동시키면서 조사는 방법이다.

GPR 탐사의 대상인 천부 모형지반은 지층간 물성차가 뚜렷한 토양층과 자갈층을 대상으로 GPR 탐사 측선을 지층모델의 경계면까지 포함하기 위해 모형지반의 크

기보다 큰 10m와 7m로 총 9개의 측선을 설계하였다. 탐사 측선의 방향은 모형지반의 장축과 단축방향으로 결정하였으며, 각 측선의 길이는 모형지반의 외곽 경계까지 포함하기 위해 10m와 7m로 설계되었다(Fig. 3).

GPR 탐사장비는 Sensors & Software사의 Pulse EKKO GPR 시스템을 사용하였다. 탐사에 사용한 주파수는 100 MHz, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz로 각 주파수 대역의 분해능 차이를 비교하고, 모형지반의 경계를 효과적으로 탐지할 수 있는 주파수대역을 찾고자 하였다. 또한, 탄성과 굴절법탐사에 사용된 장비는 스웨덴 ABEM사의 Mark 6이며, 24 채널의 수신기를 사용하였다. 탄성파의 발생원은 해머(sledge hammer)를 사용하였다. 탄성파 굴절법탐사의 탐사측선은 H-H'와 I-I'측선에서만 수행하였다. 탐사 항목 및 수량은 Table 1과 같다.

### 결과 및 토의

#### 탄성과 굴절법 탐사

Fig. 4는 H-H'와 I-I' 측선에 대한 탄성과 굴절법 탐사 결과를 깊이별로 나타낸 것이다. 탄성과 굴절법 탐사 결과에서 모형지반 내의 토양층과 자갈층간의 경계는 탄성파의 속도 대비가 작아 파악하기가 어려웠다. 하지만, 모형지반이 위치하고 있는 구간에서의 등속도선이 주변 지점에 비해 상대적으로 깊은 침도까지 분포하는 것으로 볼 때, 개략적인 모형지반의 분포 범위(검은색 회살표)를 파악할 수

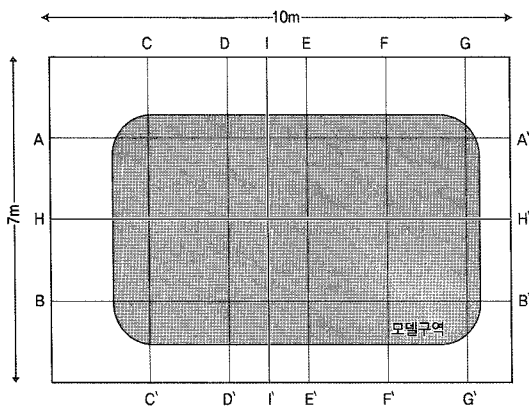


Fig. 3. Survey array for the geological engineering model.

Table 1. Survey array for the geological engineering model.

Method	No. array	Survey array position
Refraction method	2	H-H', I-I'
GPR method	100 MHz frequency	A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F', G-G'
	225 MHz frequency	A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F', G-G'
	450 MHz frequency	A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F', G-G', H-H', I-I'
	900 MHz frequency	A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F', G-G'

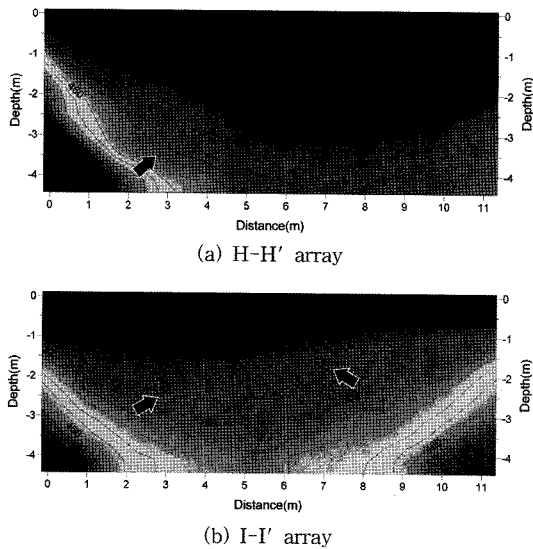


Fig. 4. Results of seismic refraction survey for the geological engineering model.

있는 것으로 판단한다. 또한, 모형지반의 지표 다짐상태가 불량하여 지표와 수진기의 접지가 양호하지 않아 대체적으로 탐사 결과의 신뢰도가 감소한 것으로 나타났다.

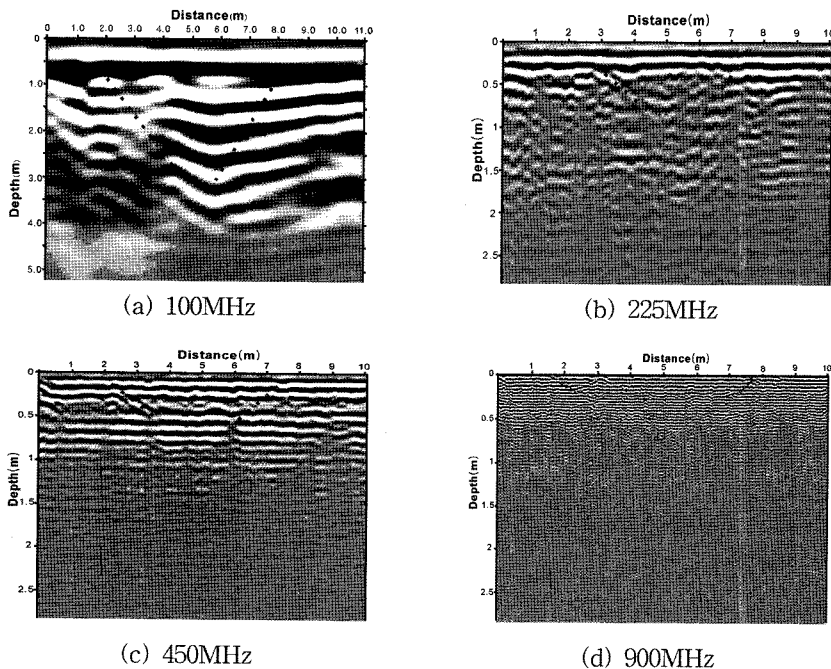


Fig. 5. Results of A-A' array for each frequency range on the GPR survey (dot line is a boundary of the geological engineering model).

### GPR 탐사

GPR 자료의 전산처리는 전자기파가 지하로 진행함에 따라 감쇠되는 현상을 보정하고, 명확한 지층 경계구분을 위해 잡음제거에 중점을 두었다. 또한, 반사면의 연장성을 향상시키기 위해 각 시간마다 진폭평균을 감안하여 분석하였다. 측정 주파수는 100 MHz, 225 MHz, 450 MHz, 900 MHz에 대해 Table 1에서 주어진 탐사측선을 따라 GPR 탐사를 수행하였다. GPR 탐사의 결과에서 전반적으로 측정 주파수가 낮을수록 모형지반의 가탐심도가 깊었으나, 높은 주파수 범위에서는 매우 얇게 나타났다. 여기서는 GPR 탐사측선 중 A-A'(모형지반과 원지반 경계부)와 E-E' 측선(모형지반 중앙부)의 측정 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다.

100 MHz 주파수 대역을 사용한 GPR 탐사에서는 상대적으로 낮은 주파수로 인해 낮은 분해능을 보이고 있다. 50 cm의 두께를 가지는 모형지반 내의 모든 지층경계는 충분히 확인할 수 있다. 또한, 모형지반의 외곽과 주위 지층간의 경계도 확인할 수 있었다. 225 MHz의 주파수 대역을 사용한 GPR 탐사에서는 약 1m까지 모형내의 지층경계와 모형외곽 경계를 확인할 수 있으며, 100 MHz보다 높은 분해능을 보이고 있다. 450 MHz의

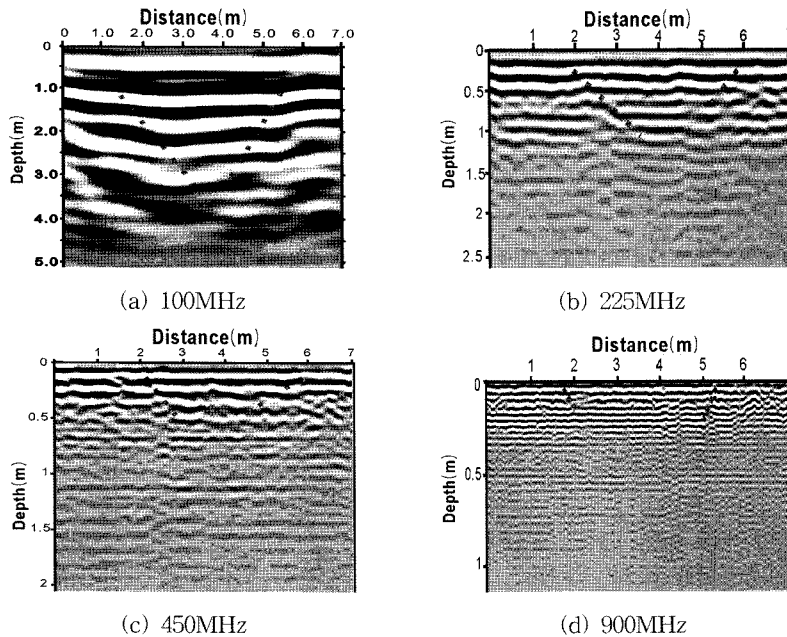


Fig. 6. Results of E-E' array for each frequency range on the GPR survey (dot line is a boundary of the geological engineering model).

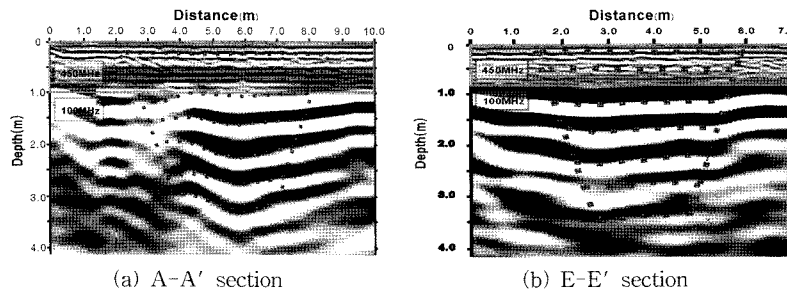


Fig. 7. Overlapped section of the model ground based on the frequency range of 100 MHz and 450 MHz under GPR survey (dot line is a boundary of the geological engineering model).

주파수 대역을 사용한 GPR 탐사에서는 50 cm의 침투 심도를 보이며 이전의 탐사결과보다 높은 분해능을 보이고 있다. 900 MHz의 결과에서는 약 20 cm의 침투 심도를 보이고 있으며, 가장 높은 분해능을 보이고 있어 천부에 대한 자세한 정보를 제공하고 있다.

### 지질공학모형지반 해석 단면도

GPR의 각 주파수마다 나타나는 분해능의 차이와 주파수 대역에 의한 침투심도의 차이를 보완한 모형지반의 단면을 제작하기 위해 측선 A-A'와 E-E'에 대하여 지층 천부를 가장 효과적으로 확인할 수 있는 450 MHz의 탐사결과와 모형의 최하부 경계까지 확인할 수 있지만 분해능이 낮은 100 MHz의 주파수 대역을 중첩시켜

단면으로 제작하였다(Fig. 7). 그 결과 모형지반의 전체에 대하여 그 크기 및 형태와 지표면 부근인 지층 천부에 대한 정밀한 결과를 동시에 확인할 수 있다. Fig. 7(a)의 A-A' 측선은 모형지반의 외곽부로서 모형지반과 원지반의 경계부에서 전자기파의 왜곡에 의해 해상도가 감쇄됨을 확인하였다. 이에 반해 Fig. 7(b)인 E-E' 측선 탐사결과에서는 선명한 해상도를 갖는 모형지반의 경계를 확인할 수 있다.

### 결론

지구물리탐사법을 이용하여 석조문화재 기초지반 및 지하에 매몰되어 있는 유적의 효과적인 탐지 가능성을

파악하기 위하여 토양층과 자갈층이 교호하는 지질공학적 모형지반을 대상으로 GPR 탐사와 탄성파 반사법 탐사를 적용하여 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 탄성파 굴절법 탐사 결과, 모형지반 내 각 층의 경계는 탄성파의 속도 대비가 작아 파악이 어려웠지만, 모형지반이 위치하고 있는 구간에서의 등속도선이 주변 지점에 비해 상대적으로 깊은 심도까지 분포하는 것으로 볼 때, 개략적인 모형지반의 분포 범위 파악이 가능할 것으로 판단된다.

2. 100 MHz의 주파수를 사용한 탐사에서는 가장 낮은 분해능을 보이고 있으나, 모형지반의 층 경계가 가장 정확하게 파악되었으며, 원지반과의 경계면도 확인할 수 있었다.

3. 200 MHz의 주파수를 사용한 탐사에서는 보다 높은 분해능을 보였으나, 전자기파가 지하로 침투함에 따라 큰 감쇠를 보였다. 그러나 상부쪽 경계면은 효과적으로 확인할 수 있으며, 100 MHz의 결과와 유사하게 모형지반과 주위 원지반과의 경계면도 확인할 수 있었다.

4. 450 MHz와 900 MHz의 주파수를 사용한 탐사에서는 낮은 주파수를 사용한 탐사보다 높은 분해능을 보였으나, 고주파수의 특징인 지하로 진행함에 따른 진폭감쇠가 큰 것을 확인하였다. 낮은 심도에서 확인되는 지층 경계면은 효과적으로 확인되나 전자기파의 감쇠로 인해 심부까지 진행하지 못하였다.

5. 모형지반에 대한 GPR의 영상구조는 심부에 대한 100 MHz 단면과 천부에 대한 450 MHz 단면을 조합한 최종단면도에서 파악이 가능하다.

## 감사의 글

이 연구는 국립문화재연구소의 2008년 보존과학연구 개발 사업의 일환으로 연구되었다.

## 참고 문헌

- 김소구, 오현덕, 2003, 유적발굴에 있어서 GPR탐사의 응용에 관한 연구, 지질공학, 13(4), 475-490.
- 김승섭, 도성재, 박용희, 이상목, 이홍중, 2002, 자력탐사를 이용한 매장 문화재의 발굴 가능성 연구, 충남 보령과 논산지역의 예, 한국지질공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회 공동학술대회, 415-417.
- 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003, 물리탐사

의 활용, 원리 및 사례 중심으로, 시그마프레스.  
손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, 1999, 지반 환경 물리탐사, 시그마프레스.

장호식, 서동주, 이현재, 이종출, 2003, GPR를 이용한 매장문화재의 위치 해석, 한국지형공간정보학회, 개방형지리정보시스템학회, 한국 GIS학회, 대한원격탐사학회 공동학술대회, 83-87.

Annan, A. P. and Cosway, S. W., 1992, Ground penetrating radar survey design, Proceeding of the symposium on the application of geophysicist to engineering and environmental problems, 329-352.

Breiner, S. and Coe, D. M., 1972, Magnetic exploration of the Olmec Civilization, American Scientist, 60, 566-575.

Davis, J. L. and Annan, A. P., 1989, Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, 531-551.

Main, D. W. and Hammon, W.S., 2003, The application of ground penetrating radar as a mapping technique at vertebrate fossil excavations in the Cretaceous of Texas, Cretaceous Research, 24(3), 335-345.

McMechan, G. A., Loucks, R. G., Zeng, X., and Mescher, P., 1998, Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas, Journal of Applied Geophysics, 39, 1-10.

Nakashima, Y., Zhou, H., and Sato, M., 2001, Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections, Journal of Applied Geophysics, 47, 241-249.

Rashed, M., Kawamura, D., Nemoto, H., Miyata, T., and Nakagawa, K., 2003, Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan, Journal of Applied Geophysics, 53, 63-75.

2008년 11월 22일 원고접수, 2008년 12월 16일 게재승인

## 김만일

한국지질자원연구원 지구환경연구본부  
350-305 대전광역시 유성구 가정동 과학로 92  
Tel: 042-868-3117  
Fax: 042-868-3415  
E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

## 이창주

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-822-5467  
E-mail: wjdwo1818@nate.com

**김종태**

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-822-5467  
E-mail: jongtae98@empal.com

**김지수**

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-3201  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr

**김사덕**

국립문화재연구소 보존과학연구실  
305-380 대전광역시 유성구 문지동 472번지  
Tel: 042-860-9251  
Fax: 042-861-4928  
E-mail: kimsadug@nricp.go.kr

**정교철**

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-822-5467  
E-mail: jeong@andong.ac.kr