

광전계 센서 (optical electric field sensor)를 이용한 GPR

조성준¹⁾, Ryohey Tanaka²⁾, Motoyuki Sato²⁾, 김정호¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지반안전연구부, mac@kigam.re.kr

²⁾Center for Northeast Asian Studies, Tohoku Univ.

GPR using optical electric field sensor

Seong-Jun Cho¹⁾, Ryohey Tanaka²⁾, Motoyuki Sato²⁾, Jung-Ho Kim¹⁾

¹⁾Geotechnical Engineering Division, KIGAM

²⁾Center for Northeast Asian Studies, Tohoku Univ.

요약 : 지뢰탐지에 효과적으로 적용하기 위해 광전계 센서를 이용한 GPR 시스템을 개발하였다. 측정되는 전기장의 왜곡을 최소화 하는 광전계 센서는 크기와 무게가 매우 적어 측정 장치로 운용하기가 용이하므로 지뢰탐지와 같이 세밀한 주의가 요구되는 곳에 적합하다. 송수신 장치 역할을 하는 벡터 네트워크 분석기와 광신호 발생기와 광검파기를 탑재한 광변조기, double ridge horn 송신 안테나와 광전계 센서로 구성된 stepped frequency radar 시스템이 개발되었으며, 이 시스템의 매우 긴 측정시간의 단점을 극복하기 위해 동일한 수준의 S/N 비를 가지는, 임펄스 발생기와 오실로스코프로 구성된 impulse radar 시스템이 또한 개발되었다. 비교 결과 자료 수준은 거의 동일하나 측정시간은 스텝 측정의 경우 8 배 이상 빨라진 것을 알 수 있었으며, 동일한 자료를 연속 측정으로 획득한 결과 100 배 이상 빨라 질 수 있음을 확인하였다. 또한 이 임펄스 레이더 시스템을 PMN2 지뢰모형에 대해 현장과 비슷한 환경에서의 실험실 실험에 적용하여 지뢰모형의 영상을 획득하였다.

주요어 : 광전계 센서, stepped frequency radar, impulse radar

Abstract : In order to apply to land mine detection effectively, GPR using an optical electric field sensor as a receiver has been developed. The optical electric field sensor is very small and uses optical fiber instead of metallic coaxial cable. With the combination of these advantages and the bistatic radar system, it can be possible for an operator to measure quite flexible and safely. The sensor has been tested in stepped frequency radar system with frequency which consists of a vector network analyzer, a fixed double ridged horn antenna as transmitter. For considering effectiveness in real field, we applied impulse radar system, which consist of a digital oscilloscope and a impulse generator to produce the impulse. Detection of a PMN2 mine model was carried out by the impulse radar system at a sand pit. The PMN2 were detected clearly with sufficiently high resolution, the target contrast was almost the same while the scanning time decreased down to 1/100.

Keywords : optical electric field sensor, stepped frequency radar, impulse radar

1. 서론

천부 지질구조, 지장물 탐지, 지하수 탐사등에 효과적으로 사용되어온 GPR 탐사는 최근 지뢰탐지 분야에 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Daniels, 2004). 지뢰탐지는 상당히 위험하며 특히 지표에 가벼운 접촉 만으로도 폭발을 야기 시킬 수 있어 매우 조심스러운 작업이다. 일반적인 GPR 시스템의 안테나의 크기와 무게는 때때로 이러한 지뢰탐지에 직접 적용할 때 문제를 야기시킬 소지가 있어 좀 더 가볍고 편리한 지뢰탐지 시스템이 요구되고 있다.

최근 새로운 개념의 전기장 측정센서로 각광 받고 있는 광전계 센서는 전기장에 의해 변조되는 광신호를 탐지하는 센서로 전기장 측정 전극을 제외하고는 금속 성분이 전혀 없으며 수동 소자라 내부 전자회로가 필요 없으며 또한 광케이블을 사용하기 때문에 측정 전기장의 왜곡을 원천적으로 피할 수 있다(Kuwabara et al., 1992).

본 연구에서는 광전계 센서를 이용한 GPR 시스템을 구축하였다. 측정되는 전기장의 왜곡을 최소화 하는 광전계 센서는 크기와 무게가 매우 적어 측정 장비에 운용하기가 용이하므로 지뢰탐지와 같이 세밀한 주의가 요구되는 곳에 적합하다 할 수 있다. 그러나 광전계 센서는 GPR용으로 개발 된 것이 아니어서 GPR탐사에 적합한 주파수 범의와 S/N비를 가지기 위해서 연구와 개량이 이루어졌으며(Tanaka and Sato, 2004), 이를 바탕으로 본 연구가 시작되었다.

본 논문에서는 먼저 송수신 장치 역할을 하는 벡터 네트워크 분석기와 광신호 발생기와 광검파기를 탑재한 광변조기, double ridge horn 송신 안테나와 광전계 센서로 구성된 stepped frequency radar 시스템이 기술되며, 이 시스템의 매우 긴 측정시간의 단점을 극복하기 위해 개발된 동일한 수준의 S/N비를 가지는 impulse radar 시스템에 대해 기술한다. Stepped frequency radar 와 임펄스 레이더 시스템의 자료를 비교하고, 임펄스 레이더 시스템을 PMN2 지뢰모형에 대해 현장과 비슷한 환경에서의 실험실 실험에 적용한 실험 결과를 기술한다.

2. 광전계 센서

광전계 센서는 전기장에 의해 변조되는 광신호를 측정하여 전기장을 측정하는 수동소자로 부가적인 전자회로 없이 전기장을 측정할 수 있어 전기장의 왜곡을 피할 수 있는 센서이다(Kuwabara et al, 1992). Fig. 2는 광전계 센서의 구조를 설명하는 그림으로 그림 왼쪽의 광케이블은 레이저 다이오드(LD)에 연결되어 있으며 이 레이저 다이오드는 단일한 파장과 세기를 가지는 광신호를 광케이블을 통해 보내게 된다. 그 광신호는 LiNbO₃를 매질로 하는 광 도파관을 따라 가다가 두 개의 도파관으로 나뉘어지며, 하나는 전기장 전극 사이를 통과하는 도파관을, 다른 하나는 아무것도 없는 도파관을 통과하여 다시 만나게 된다. 이때 전기장 전극 사이를 통과하는 광신호는 외부 전기장에 의해 영향 받아 굴절계수가 변한 도파관을 통과하게 되며 이는 위상 변화를 일으키게 된다. 이후 다시 합쳐지게 되면 신호는 세기와 위상이 변하고 optical detector를 통해 복조되어 전기장을 측정하게 된다.

이 센서는 크기가 $1 \times 1 \times 10 \text{ cm}$ 정도 밖에 되지 않고 매우 가벼워 제어하기가 쉬우며, 전기장 전극 부분을 제외하고는 금속부분이 없어 측정 전기장의 왜곡이 적으며 특히 동축 케이블을

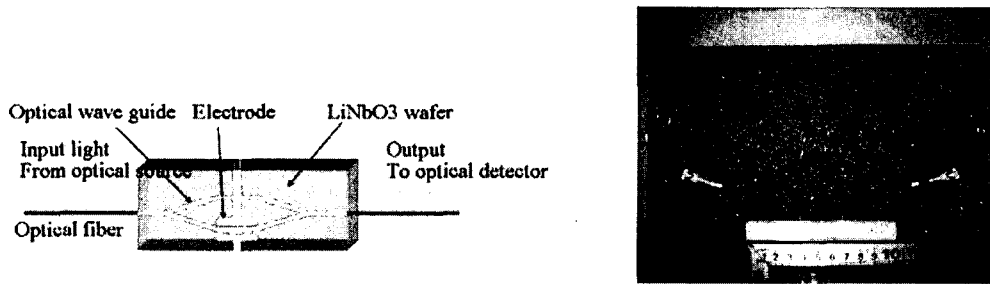


Fig. 1. The optical electric field sensor (left: the structure of OEFS, right: the scenery of OEFS)

사용하지 않아 전자기장에 대한 왜곡 뿐만 아니라 신호의 감쇠도 피할 수 있다. 사용한 제품은 Fig. 1 오른쪽의 NEC-TOKIN 제품으로 작동 주파수는 30 MHz부터 5 GHz이며 sensitivity는 60~ 140 $dB\mu V/m$ 이다

3. Stepped frequency radar 와 impulse radar

개발된 광전계 센서를 이용한 GPR 시스템은 두 종류로 분류된다. 하나는 stepped frequency 레이더 시스템이고 다른 하나는 임펄스 레이더 시스템이다(Fig. 2).

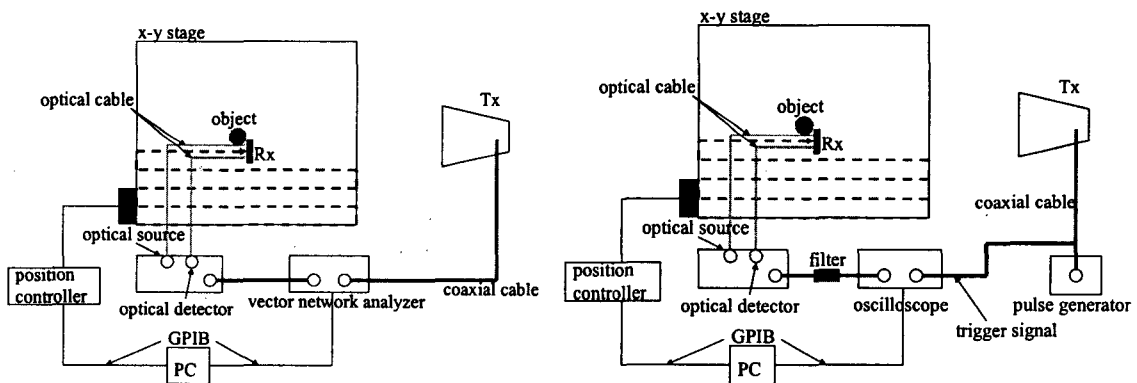


Fig. 2. The measurement system diagrams of the stepped frequency radar(left) and impulse radar(right) systems.

Stepped frequency radar 시스템은 네트워크 분석기를 통해 10 MHz에서 5 GHz까지의 신호를 스위핑하여 보내주면 고정된 송신 안테나인 double-rigged horn 안테나를 통해 복사되며 전기장의 변화는 광전계 센서를 통해 감지 되어 광신호로 변환된다. 광전계 센서는 광송신기와 광검파기로 구성된 광변조기에 두조의 광케이블로 연결되어 있다. 광케이블을 통해 광검파기로 간 신호는 다시 전기 신호로 변환되어 벡터 네트워크 분석기로 가게 된다. 광전계 센서의 측정 위치를 제어하는 위치 제어기와 벡터 네트워크 분석기의 제어는 GPIB 케이블을 통해 PC에서 하게 된다. 벡터 네트워크 분석기를 이용한 stepped frequency radar 시스템은 연구개발 초기 광전계 센서의 낮은 sensitivity를 극복하기 위해 S/N비가 높은 측정 시스템 구축의 필요에 의한 것으로 특히 센서의 특성 실험 등을 위해서도 벡터 네트워크 분석기의 사용은 필수적이었다. 그런데 높은 수준의 S/N비를 유지하기 위해서는 벡터 네트워크 분석기의 IF BW를 낮추어야 하고 이렇게 되면 측정시간이 매우 길어지게 된다. 예를 들어 $1m \times 1m$ 의 넓이를 1cm의 간격으로 격자망 측정을 할 경우 측정시간만 16시간 이상

걸리게 된다. 이는 실제 현장에 적용할 경우에는 심각한 결함이 되게 된다. 이를 해결하기 위해 임펄스 레이더 시스템을 또한 개발하였으며(Fig. 2의 오른쪽) 이 시스템의 송신부는 임펄스 발생기로 구성되었으며 수신부는 오실로스코프로 구성된다. 입력 임펄스의 펄스 폭은 250 psec 로 주파수가 4 GHz에 해당한다. 이 입력 임펄스는 1 MHz의 빠르기로 반복 재생되며 마이크로 웨이브 divider를 통해 송신 안테나와 오실로스코프의 트리거 신호로 나뉘어 진다. 사용된 오실로스코프는 agilent 사의 Infiniium 54885A로 실시간 최대 샘플링 속도는 20G sample/sec이며 6 GHz의 신호까지 샘플링이 가능하다. 한편 광변조기로부터 4 MHz 정도의 잡음이 발생하므로 이를 제거하기 위해 아날로그 로패스 필터를 사용하였다. 이 경우 위에 언급한 동일한 측정에 대해 2시간 이내의 시간밖에 걸리지 않으며 이를 연속측정 모드로 측정할 경우에는 10분이내로 측정할 수 있다. 임펄스 레이더 시스템의 장점은 빠른 측정시간에 있다. 그러나 자료질이 stepped frequency 시스템에 비해 많이 떨어진다면 적용할 수 없게 된다. 이를 확인하기 위해 동일한 조건하에서 실험을 통해 각기의 신호를 비교해 보았다(Fig 3).

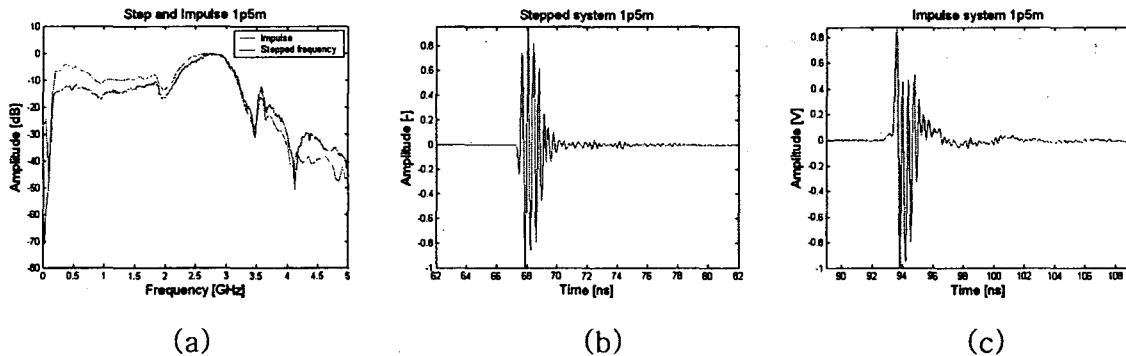


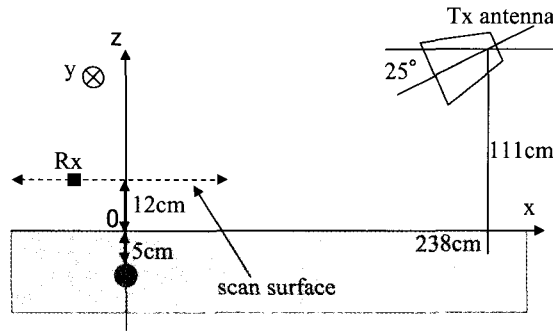
Fig. 3. Measured transmission between the double ridged horn antenna and the optical electric field sensor at a distance of 1.5 m. (a) frequency domain signals by the stepped frequency radar system and the impulse radar system, (b) time domain signal by the stepped frequency radar system and (c) time domain signal by the impulse radar system

Fig. 3의 (a)는 stepped frequency 레이더 시스템과 임펄스 레이더 시스템 신호의 주파수 영역에서의 비교이며 (b)와(c)는 시간영역에서의 비교이다. (a)의 2 GHz 이하의 신호에서는 임펄스 레이더 시스템의 신호가 좀 더 강하고 3.5 GHz 이상에서는 stepped frequency 레이더의 신호가 좀 더 강한 것을 알 수 있으나 두 신호가 매우 유사함을 알 수 있다. 시간영역의 자료들을 비교해 보면 stepped frequency 레이더 시스템의 신호가 분해능이 좀 더 높은 것으로 보여 지나 큰 차이가 없음을 알 수 있고, 측정시간은 동일한 환경에서 8배 이상 임펄스 레이더 시스템이 빠른 것을 확인하였다.

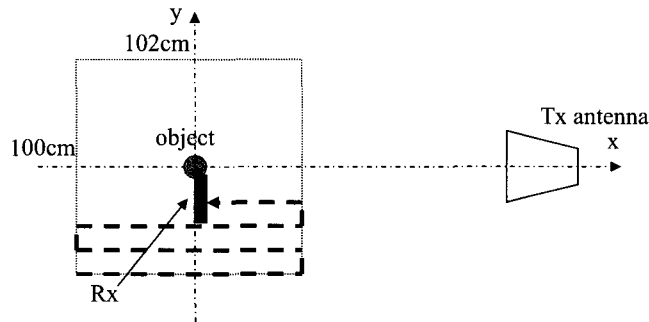
4. 임펄스 레이더 시스템을 이용한 지뢰탐지

구성된 임펄스 레이더 탐사 시스템을 이용하여 현장 실험을 수행하였다. 스텝 측정과 연속 측정을 수행하였으며 여기서는 스텝 측정 결과만 도시하겠다. 여기서 스텝 측정은 위치제어기가 정해진 간격만큼 이동해 정지한 후 측정하는 방법으로 위치의 정확도와 측정의 안정성을 기할 수 있으며, 연속 측정은 위치 제어기는 정지하지 않고 계속 움직이면서

정해진 위치에서 자료를 측정하는 것으로 측정시간을 현저히 단축시킬 수 있다.



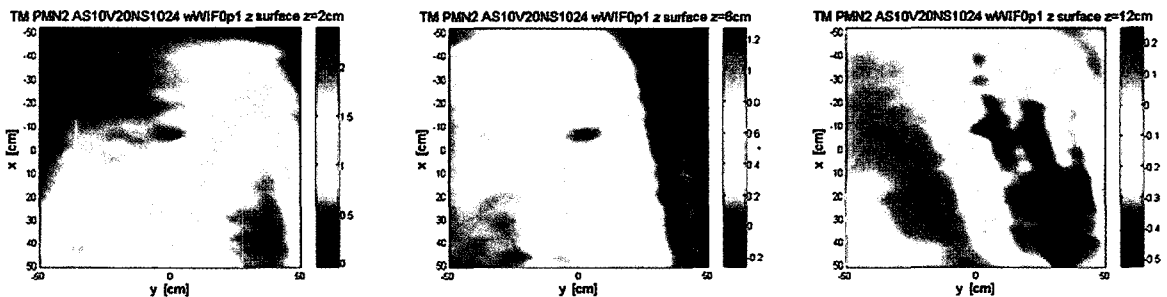
(a) The side view.



(b) The top view.

Fig. 4. The measurement configuration. (a) the side view and (b) the top view

Fig. 4는 실험 모식도를 보여준다. 좌표의 중점 5 cm 하부의 모래에 PMN2 지뢰모형이 묻혀 있으며, 광전계 센서는 측정간격을 1 cm 로 의 넓이를 이동하며 격자망으로 측정한다. 이때 센서의 높이는 12cm 이다. 한편 송신기는 double ridged horn 안테나를 썼으며 이때 급전 위치는 $x = 238$ cm, $y = 0$ cm, $z = 111$ cm이다. 지뢰모형이 묻힌 모래의 상대 유전율은 TDR로 측정하였으며 그 값은 4.82 이다.



(a) $z = -2$ cm.

(b) $z = -6$ cm.

(c) $z = -12$ cm.

Fig. 5. Reconstructed images of the PMN2 buried in sand by TM mode for different depths.

Fig. 5는 TM 모드에 대한 스텝 측정 결과로 회절 중합 후의 3D 영상 중 심도 -2 cm, -6 cm, -12 cm의 결과이다. 측정 결과는 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환되어 Wiener

inverse filtering 을 거친 후 IFT를 통해 시간영역의 자료로 변환된 뒤 회절 중합(diffraction stacking)을 거치게 된다. Fig. 6 의 - 6cm 의 결과에서 지뢰로부터의 반사 영상을 얻을 수 있었으며 지뢰 모형의 심도를 고려하면 이는 정확한 결과이다. 또한 동일한 모형에 대해 연속측정 한 결과 자료 수준은 약간 떨어졌지만 속도는 18배 이상, stepped frequency radar 시스템에 비해서는 100배 이상 빨라짐을 확인했다.

5. 결론

최근 새로운 개념의 전기장 측정센서로 각광 받고 있는 광전계 센서를 이용한 GPR 시스템을 구축하였다. 측정되는 전기장의 왜곡을 최소화 하는 광전계 센서는 크기와 무게가 매우 적어 측정 장비에 운용하기가 용이하므로 지뢰탐지와 같이 세밀한 주의가 요구되는 곳에 적합하다 할 수 있다. 그러나 광전계 센서는 GPR용으로 개발 된 것이 아니어서 GPR탐사에 적합한 주파수 범의와 S/N비를 가지기 위해서 많은 연구와 개량이 필요하였으며 이를 통해 광전계 센서를 GPR 실제 현장에 적용하기 위한 측정 시스템을 개발하였다.

먼저 벡터 네트워크 분석기에 기반한 stepped frequency radar 시스템을 개발 하였으며 이 시스템의 매우 긴 측정시간의 단점을 극복하기 위해 동일한 수준의 S/N비를 가지는 impulse radar 시스템을 개발 하였다. 비교 결과 자료 수준은 거의 동일하나 측정시간은 스텝 측정의 경우 8배 이상 빨라진 것을 알 수 있었으며, 동일한 자료를 연속 측정으로 획득한 결과 100 배 이상 빨라 질 수 있음을 확인하였다. 또한 이 임펄스 레이다 시스템을 PMN2 지뢰모형에 대해 현장과 비슷한 환경에서의 실험실 실험에 적용하여 지뢰모형의 영상을 획득하였다.

이 시스템은 고정된 송신기를 이용한 독특한 형태의 bistatic radar시스템으로 운용되고 있어 얻어지는 자료가 불규칙한 off set을 가져 기본적인 레이다 자료처리를 적용하기 힘들며 그 밖의 다양한 자료 처리 기법 역시 적용하기가 쉽지 않다. 이를 위해 현재 3D NMO 방법을 연구 중이며 이를 통해 다양한 구조보정 방법을 적용할 계획이다.

참고문헌

- Daniels, D., J., 2004, *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*. The Institute of Electrical Engineers.
- Kuwabara, N., Tajima, K., Kobayashi, R., and Amemiya, F., 1992, Development and analysis of electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator, *IEEE Trans. Electromagnetic Comp.*, vol.34, no.4
- Tanaka, R., and Sato, M., 2005, Visualization of buried land mines by a GPR system using a broadband passive optical electric field, *Proceedings of the 7th SEGJ international symposium - Imaging technology-*, Sendai, Japan, pp. 118- 123.