

연구논문

PXI를 이용한 다목적 물리탐사 측정 시스템

조성준^{1*} · 김정호¹ · 성낙훈¹ · 정지민¹

¹한국지질자원연구원 지반탐사연구실

Multi-purpose Geophysical Measurements System Using PXI

Seong-Jun Cho^{1*}, Jung-Ho Kim¹, Nak-Hun Sung¹ and Ji-Min Jeong¹

¹Engineering Geophysics Group, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

요 약 : 현장 물리탐사 수행 시 상용화된 장비로는 탐사 대상 매질의 물성, 대상체의 크기, 모양 등의 탐사목적 및 현장여건에 의해 탐사가 불가능 하거나 탐사 목적에 맞는 분해능을 얻지 못하는 경우를 종종 만나게 된다. 이러한 다양한 현장 조건 및 탐사 목적에 효과적으로 적용할 수 있는 다목적 물리탐사 측정 시스템을 개발하였다. 이 다목적 측정 시스템은 PXI를 기반으로 하며 A/D 변환기 또는 GPIB 인터페이스를 이용한 측정 장치를 통해 신호를 측정하게 되며 확장성이 커 다양한 문제에 적용이 가능하다. 구성된 측정 시스템을 이용하여 시추공 레이다 탐사 시스템과 시추공 초음파 탐사 시스템, 전자기적 잡음 측정 시스템을 구축하였다. 시추공 레이다 탐사 시스템은 네트워크 분석기를 GPIB를 통해 제어하고 현장 조건에 따라 임의로 안테나의 길이 조절이 가능한 스텝 주파수 레이다 탐사 시스템이며, 시추공 초음파 탐사 시스템은 압전 송수신기 센서, 고출력 송신기와 A/D 변환기로 구성되어 시추공 내에서 초음파를 이용하여 촉매된 지하공동의 범위를 측정하기 위해 구성된 시스템이며, 전자기적 잡음 측정 시스템은 3개의 자기장 센서와 2개의 전기장 센서 그리고 A/D 변환기로 구성되며 임의로 측정시간과 샘플링 주파수의 조절이 가능하고 임의의 시간에 예약 측정이 가능한 시스템이다. 시추공 레이다 탐사 시스템은 상용 시스템으로 불가능했던 지하공동의 넓이와 지장물을 찾는 탐사에서 효과적인 결과를 보여주었으며, 시추공 초음파 탐사 시스템도 지하공동의 넓이를 측정하는 실험에서 가능성을 확인할 수 있었다. 한편 전자기적 잡음 측정 시스템을 이용하여 도심지 내 전자기적 잡음특성을 파악할 수 있었으며, 이를 변형하여 전기비저항 탐사 시 사용되는 다양한 케이블에 대한 케이블 내의 전자기적 유도 현상 및 그에 따른 신호 왜곡을 규명하는 실험에 적용하여 시스템의 확장성을 확인하였다.

주요어 : PXI, 시추공 레이다 탐사 시스템, 시추공 초음파 탐사 시스템, 전자기적 잡음 측정 시스템

Abstract : In geophysical field surveys, commercial equipments often fail to resolve the subsurface target or even sometimes fail to be applied because they do not fit to the various field situations or the physical properties of the medium or target. We developed a geophysical measurement system, which can be easily adapted for the various field situations and targets. The system based on PXI with A/D converter and some stand alone equipment such as Network Analyzer was applied to borehole radar survey, borehole sonic measurement and electromagnetic noise measurement. The system for borehole radar survey consists of PXI, Network Analyzer, dipole antennas, GPIB interface is used for PXI to control Network Analyzer. The system for borehole sonic measurement consists of PXI, 24 Bit A/D converter, high voltage pulse generator, transmitting and receiving piezoelectric sensors. The electromagnetic noise measurement system consists of PXI, 24 Bit A/D converter, 2 horizontal component electric field sensors and 2 horizontal and 1 vertical component magnetic field sensors. The borehole radar system has been successfully applied to detect the width of the artificial tunnel through which the borehole pass and to image buried steel pipe, while the commercial borehole radar equipment failed. The borehole sonic system was tested to detect the width of artificial tunnel and showed a reasonable result. The characteristic of electromagnetic noise was grasped at an urban area with the data from the electromagnetic noise measurement system. The system is also applied to characterize the signal distortion by induction between the electric cables in resistivity survey. The system can be applied various geophysical problems with a simple modification of the system and sensors.

Keywords : PXI, Borehole radar system, Borehole sonic system, Electromagnetic noise measurement system

2005년 6월 20일 접수; 2005년 8월 23일 채택

*Corresponding author

E-mail: mac@kigam.re.kr

Address: Geotechnical Engineering Division,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

서 론

국내 토목 공사 현장에 물리탐사가 적극적으로 도입되어 다양한 탐사 현장을 접하게 되면서 현장 물리탐사 수행 시 상용 탐사 장비로는 탐사 대상 매질의 물성, 대상체의 크기, 모양 등의 탐사목적 및 현장여건에 의해 탐사가 불가능하거나 탐사 목적에 맞는 분해능을 얻지 못하는 경우를 종종 만나게 된다. 이는 상용 탐사 장비가 비교적 안정적이고 빠르게 자료를 획득하는 장점이 있으나 특별한 탐사 환경에 맞추어 탐사장비를 변형하거나 자료획득 조건을 변경하는 것이 제한되어 있거나 불가능한 경우가 대다수이기 때문이다. 그간 국내 탐사 환경에 맞는 물리탐사 장비들이 개발(이호영, 1996; 정현기 등, 1999a, 1999b; 김현도, 김진후, 2005; 김영준 등, 2005)되어 사용되고 있으나 전기비저항 탐사나 해양 탄성파 탐사 등과 같이 단일 목적에 적용하기 위한 장비가 대부분으로 이 탐사기들을 다른 물성 측정을 위한 탐사에 적용하기에는 어려움이 따르게 된다.

이 연구에서는 현장의 다양한 탐사 환경에 맞추어 쉽게 변용이 가능하고 다양한 물성 측정이 가능한 다목적 물리탐사 측정 시스템을 PXI (PCI eXtensions for Instrumentation)를 기반으로 개발하였다. 전체 시스템은 PXI를 제어부로 하여 시추 공 레이다 탐사 시스템, 시추공 초음파 탐사 시스템과 전자기적 잡음 측정 시스템으로 구성된다. 스텝 주파수를 이용하는 시추공 레이다 탐사 시스템은 측정시간이 많이 걸리는 단점이 있으나 임의로 안테나의 길이를 조절할 수 있어 주 주파수 조정이 용이한 장점이 있다. 이를 기준의 상용화된 장비로 탐지하지 못한 시추공에 차액 된 지하 공동의 너비 측정과 분산 특성이 강한 매질내의 지중 파이프의 탐지에 적용하였다. 위와 동일한 지하 공동의 너비 측정에 압전 센서의 선택에 따라 탐지거리를 변화 시킬 수 있는 시추공 초음파 탐사 시스템을 적용하여 그 적용 가능성을 살펴보고자 하였다. 또한 임의로 측정시간과 샘플링 주파수의 조절이 가능한 전자기적 잡음 측정 시스템을 이용한 실험을 도심지에서 수행하여 자기장과 전기장의 성분별 잡음의 주파수 특성을 규명하고 전자기적 잡음 측정 시스템을 변형하여 전기비저항 탐사 시 사용되는 다양한 케이블에 대한 케이블 내의 전자기적 유도 현상 및 그에 따른 신호 왜곡을 규명하는 실험에 적용하여 시스템의 확장성을 확인하고자 하였다.

다목적 물리탐사 측정 시스템의 하드웨어 구성

다목적 물리탐사 측정 시스템은 제어부와 시추공 레이다 시스템, 시추공 초음파 탐사 시스템, 전자기 잡음 측정 시스템으로 이루어진다(Fig. 1). 제어부는 PXI로 구성되어 있는데 PXI는 Compact PCI에 원도우 운영 시스템을 통합하고 타이밍 및 트리거링을 제공하는 산업용 컴퓨터로 PCI 슬롯을 개량한 PXI 슬롯에 A/D 변환기나 오실로스코프, 함수 발생기 등 다양

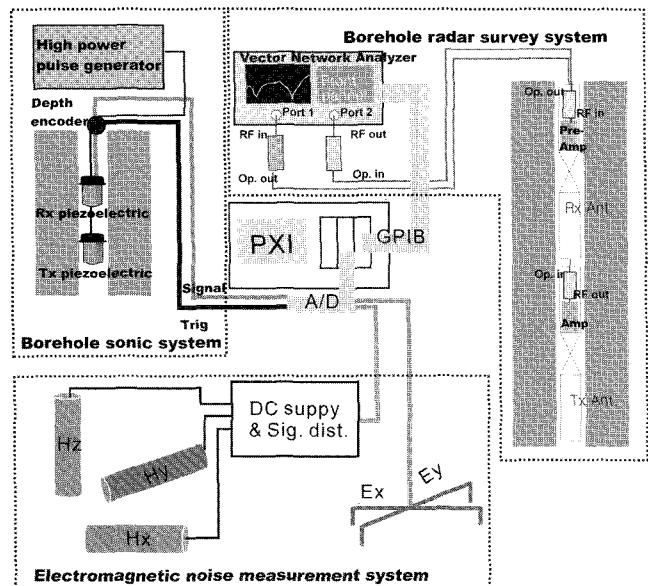


Fig. 1. Schematic diagram of multipurpose geophysical measurement system, which is based on PXI (PCI eXtended Instrument). The system can compose a borehole radar system, a borehole sonic system, and a electromagnetic noise measurement system.

한 모듈의 장착이 가능하여 확장성이 매우 크며, GPIB 인터페이스를 내장하고 있어 네트워크 분석기나 오실로스코프 등을 제어하기가 용이하다(National instrument, 2004). 본 연구에 사용한 제품은 LCD 패널이 탑재되어 있으며 DC 전원으로 구동되어 야외에서 측정 시 효율성을 높일 수 있다.

시추공 레이다 탐사 시스템은 조성준 등(2002)에 의한 스텝 주파수(stepped frequencies) 레이다 탐사 시스템을 시추공에 적용한 것으로 백터 네트워크 분석기, 광/전기 및 전기/광 변환기, 증폭기, 디이풀 안테나로 구성되어 있다. 백터 네트워크 분석기를 통해 나온 리니어 스윕 송신신호는 전기/광 변환기를 통해 광 송신신호로 바뀐다. 이 광 송신신호는 광케이블을 통해 송신안테나 앞단의 광/전기 변환기를 통해 전기 송신신호로 바뀌게 된다. 이 전기 송신신호는 증폭기를 통해 증폭되어 디이풀 안테나를 통해 땅속으로 복사된다. 땅속을 거쳐 온 전자기 신호는 수신안테나에서 검출되며, 전치증폭기를 통해 증폭된 후 전기/광 변환기, 광케이블을 거쳐 네트워크 분석기의 수신 포트 앞단의 광/전기 변환기에 다다르게 된다. 이 변환기를 통해 광신호는 전기신호로 바뀌게 되어 네트워크 분석기를 통해 신호를 측정하고 도시하게 된다. 시추공 레이다 탐사 시스템과 지표 투과 레이다(GPR)의 차이점은 지표 투과 레이다는 안테나가 지표면에 위치하게 되어 안테나나 주변 장치 등의 크기에 있어서 공간적인 제약을 받지 않지만 시추공 레이다 탐사는 시추공 구경에 따라 안테나와 주변장치의 크기가 제한 받게 된다. 또한 대부분의 시추공이 지하수가 차 있고 심도가 깊어질수록 수압이 커지기 때문에 방수가 가장 큰 문제가 된다. 이 시스템에서는 NX (지름 75.4 mm) 시추공에서 탐

사가 가능하도록 하기 위해 지름 50 mm의 FRP 파이프를 외장 하우징으로 사용하고 임의로 길이의 조절이 가능한 디아폴 안테나를 송·수신 안테나로 사용하여 탐사목적 및 현장 조건에 따라 안테나의 길이를 조절하여 중심 주파수를 변환할 수 있도록 하였다. 또한 방수 문제를 해결하기 위해 방수 광 커넥터와 아답터를 사용하였으며 심도 100 m까지 방수에 문제가 없도록 하였다.

시추공 초음파 탐사 시스템의 하드웨어는 압전 센서로 만들어진 송·수신 센서, 송·수신케이블을 감을 수 있는 릴(reel), 송신부에 고압 펄스를 발생 시키는 펄스 발생기, 심도를 따라 일정한 측정 간격(5 cm)마다 트리거 펄스를 제공하고 시추공 내의 송·수신 센서의 위치를 나타내주는 encoder, 측정되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 주는 NI 4472 24 bit A/D 변환기로 구성되어 있다. A/D 변환기를 제외한 하드웨어의 구성은 Lee *et al.* (2003)에 의한 시스템과 동일하다. 사용된 A/D 변환기는 각기 채널마다 ADC 칩을 가지고 있어 동시에 8채널을 측정하더라도 샘플링 주파수의 감소가 발생하지 않으며 오버 샘플링을 기법을 병합한 저주파 통과 필터가 내장되어 알리아싱에 대한 고려를 하지 않아도 된다. 측정 범위는 ± 10 V이며, 24 bit의 분해능을 가지고 있어 별도의 이득을 필요로 하지 않으며 차동 형태로 입력신호를 받으므로 그라운드 루프에 대한 별도의 고려가 필요 없다(Table 1).

전자기적 잡음 측정 시스템은 시추공 초음파 탐사 시스템과 동일한 사양의 24 bit A/D 변환기, 전기장 및 자기장 센서로 구성되어 있다. 자기장 센서는 EMI사의 BF-6 시리즈와 장주기용으로 BF-10을 사용했으며 BF-6 시리즈의 센서 반응 곡선은 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 자기장 센서 특성을 보면 BF-6에서 세기가 일정하고 위상이 선형인 구간이 적정한 측정 주파수 범위이나 BF-6 센서는 calibration 파일을 이용해 측정 주파수 범위를 확장하여 5 Hz ~ 100 kHz 까지 측정을 수행할 수 있다. 자기장은 세 개의 자기장 센서를 이용하여 H_x , H_y , H_z 세 성분을 측정하였으며, 전기장은 단주기 측정 시에는 스톤 전극을 사용했으며 장주기 측정 시에는 비분극 전극을 사용하

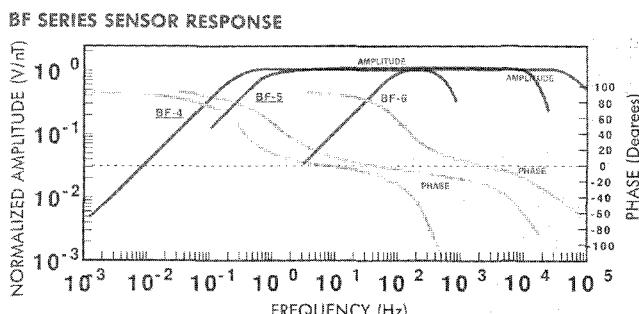


Fig. 2. Response curves of the magnetic sensors for the EM noise measurement system. BF-6 series, which cover the frequency ranges from 5 Hz to 100 kHz, are used for the short period noise measurements.

Table 1. Specification of A/D converter.

Number of chan.	8, simultaneously sampled
Resolution	24 bit, nominal
Sample rate	102.4 kS/s down to 1.0 kS/s
Input signal range	± 10 V
Anti alias filter	400 kHz lowpass oversampling
Input configuration	Unbalanced differential
Analog trigger	source ch[0..7] programmable
Digital trigger	TTL/CMOS

여 E_x , E_y 를 측정하였다.

다목적 물리탐사 측정 시스템 구동 소프트웨어

다목적 물리탐사 측정 시스템의 구동 소프트웨어는 각각의 탐사 시스템에 따라 개별적으로 작성하였다.

측정 소프트웨어는 그래픽 기반의 프로그램밍 언어 LabVIEW™ (National instrument, 2004)를 이용하여 만들었다. LabVIEW™는 그래픽 Icon을 이용하여 프로그램을 작성하는 프로그래밍 언어로 다른 텍스트 기반의 언어들과 비교하여 가장 큰 차이점은 인터페이스뿐만 아니라 원시 코드 또한 그래픽 환경으로 이루어져 있으며 컴퓨터를 이용하여 자동제어와 계측 시스템을 구축하기에 최적화된 언어이다(곽두영, 2002).

시추공 레이다 시스템의 구동 소프트웨어는 벡터 네트워크 분석기를 제어하여 자료를 획득하는 부분과 얻어진 자료를 PXI로 가져와 자료변환, 도시, 저장하는 부분으로 나뉘어 진다. 벡터 네트워크 분석기의 제어는 GPIB 인터페이스를 통해 GPIB 명령에 의해 이루어진다. 문자열로 이루어지는 자료 획득 GPIB 명령을 PXI를 통해 보내면 이를 받은 네트워크 분석기가 트리거링을 하고 데이터를 얻기 시작한다. 측정되는 데이터는 다양한 형식으로 얻어질 수 있는데 본 레이다 시스템에서는 각 주파수 별로 실수성분과 허수성분을 취하였다. 이 복소수 데이터는 이후 수치적인 작업을 통해 파워 스펙트럼, 스미스 차트, 전압 정재파비(VSWR)로 바로 변환할 수 있다. 복소수 데이터를 GPIB 인터페이스를 통해 PXI로 가져오면 간단한 수치 계산을 통해 파워스펙트럼으로 변환하고 또한 일반적인 레이다 탐사 도시 형태인 시간 영역의 자료로 도시하기 위해 역 푸리에 변환을 거치게 된다. Fig. 3의 오른쪽은 역 푸리에 변환된 시간영역 자료를 보여주며 왼쪽의 2차원 평면도는 얻어진 전체 트레이스를 동시에 도시한 것으로 자료를 얻으면서 전체 자료의 질을 확인할 수 있어 품질제어가 가능하다. 이렇게 얻어진 자료는 아스키(ascii) 파일로 저장되며 상용 레이다 자료처리 프로그램인 RADPRO® (www.geo-pros.com)에서 파일 변환 과정과 자료처리 과정을 거쳐 최종 해석 단면도를 얻게 된다.

Fig. 4에 시추공 초음파 탐사 시스템의 측정 소프트웨어가

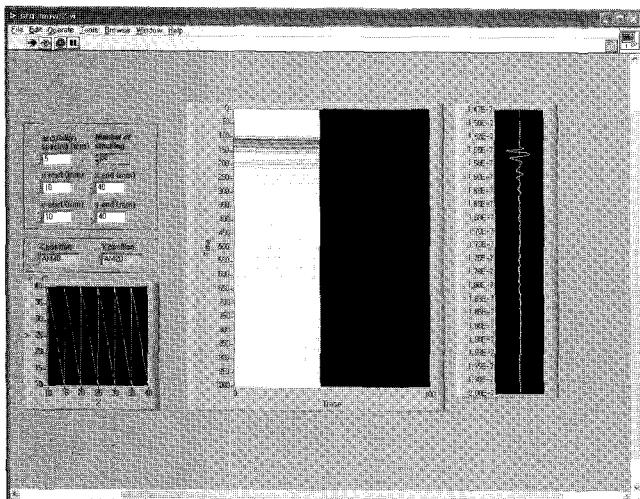


Fig. 3. The data acquisition software for the borehole radar system.

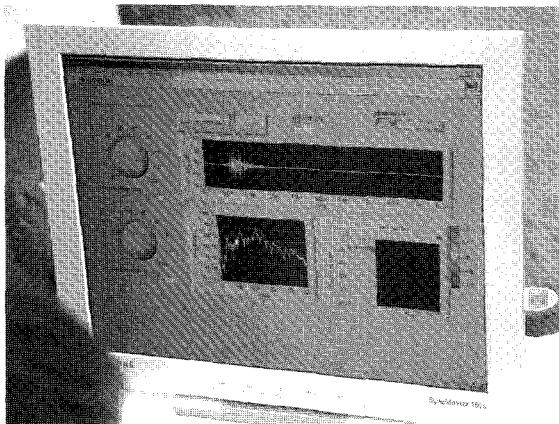


Fig. 4. The data acquisition software for the borehole sonic measurement system.

도시되어 있다. 실제 현장에서의 측정 장면으로 자료 측정 시 2개의 입력인자(sampling rate, sampling length)가 있으며, 개별 트레이스와 실시간 FFT를 통한 파형분석 결과 그리고 전체 트레이스를 동시에 도시한 2차원 평면도로 구성되어 있다. 샘플링 주파수는 최소 10 kHz에서 최대 100 kHz까지 10 kHz 단위로 조절 할 수 있게 되어 있다. 샘플링 길이는 측정이 수행될 총 시간을 나타내며 1 msec에서 1000 msec 까지 10개의 샘플링 길이를 선택할 수 있도록 하였다. 한편 자료는 아스키 형식으로 저장되며 RADPRO[®]를 이용하여 자료처리를 수행하였다.

전자기적 잡음 측정 시스템의 소프트웨어는 크게 자료획득 소프트웨어와 자료처리 소프트웨어로 나뉘어 진다. Fig. 5는 자료획득 소프트웨어를 보여준다. 자료획득 소프트웨어는 프로그램 상에서 샘플링 주파수, 측정 시간 등을 제어하여 A/D 변환기를 통한 안정적인 자료 취득을 가능케 하고 측정 자료를 이진형식(binary format)으로 저장하고 측정과 동시에 실시

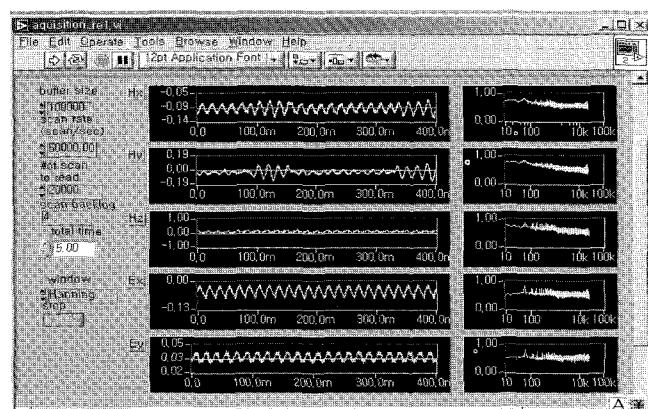


Fig. 5. The data acquisition module of the EM noise measurement system.

간 FFT를 통해 정적(stationary)인 잡음과 동적인 잡음을 실시간으로 구분할 수 있어 탐지 목적에 따라 재 측정의 여부를 쉽게 판단할 수 있다. 시간 예약 측정기능 내장하고 있어 원하는 시간의 자료를 획득하기가 용이하다. 한편, 자료처리 소프트웨어는 세그먼트 단위로 저장되어 있는 측정 자료를 이어 붙이고 각각의 자기장 센서 calibration 파일을 이용하여 측정값을 보정하며 logarithmic frequency window averaging을 통해 주파수 영역에서 크기와 위상값을 내준다.

현장 적용실험

시추공 레이다 탐사 시스템의 적용성을 확인하기 위해 두 가지 현장실험을 수행하였다. 첫 번째 현장실험은 경기도 부천시에 소재한 신축 아파트 부지로 아파트 하부에 폐광산의 간도가 존재하는 곳이다. 이 지하 간도에 의한 아파트의 안정성을 평가하기 위해 물리탐사, 지질조사, 지반 공학적인 조사 등이 복합적으로 이루어졌다(Kim et al., 2004). 아파트 주변에 8개공의 시추공을 굽착하는 도중 한 시추공이 간도를 관통하게 되었다. 그런데 관통된 간도의 높이가 4 m 가까이 되어 채굴적에 의한 공동의 가능성이 제기 되었으며 이를 판단하기 위해 정확한 공동의 규모 파악이 요구되었다. 또한 공동 규모의 파악은 지반안정성 해석을 위한 정확한 인자를 제공하기 위해서 필수적이다.

먼저 당 연구팀이 보유하고 있는 RAMAC 100 MHz 상용 시추공 레이다 탐사기를 이용하여 탐사를 수행하였다. Fig. 6(a)는 탐사 결과이다. 100 MHz 안테나는 주 주파수의 파장이 약 2 m에 해당하고 근접거리의 반사파는 직접파의 과정에 중첩되어 정확한 반사면을 찾기 힘들다. 만약에 상당한 거리에 반사면이 있을 경우에는 식별 가능할 수 있으나 그림에서 보면 심도 70 m 하부의 공동 구간에서의 자료에서 적절한 반사이벤트를 보기가 힘들다. 한편 공동 구간 위인 70 m 상부 구간에서는 직접파조차 보이지 않을 정도로 전자기파의 감쇠가

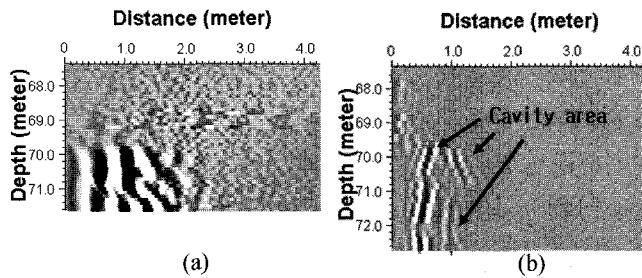


Fig. 6. The radargrams for an artificial tunnel detection using (a) commercial borehole radar system (RAMAC) with 100 MHz antenna and (b) borehole radar system in this study.

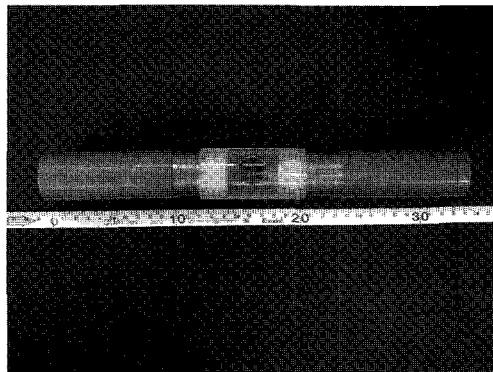


Fig. 7. The dipole transmitter antenna with 33 cm of dipole length which can be changed flexibly.

심한데 이는 이 지역이 과거 연, 아연 광산으로 평균 전기비저항이 10 ohm-m 미만이기 때문이다. Fig. 6(b)는 당 연구팀에 의해 개발된 시추공 레이다 탐사 시스템에 의한 결과이다. 69.6 m 하부의 반사 이벤트들이 공동의 벽면에서 반사 되어온 것으로 여겨지는데 디아폴 안테나의 경우 360도 어느 방향에서도 반사 이벤트가 발생할 수 있으므로 정확한 방향은 알 수 없으나 반사 이벤트의 범위가 시추공으로부터 약 1.2 m 이내에 존재하므로 이 지점에서의 공동의 폭은 2 m를 넘지 않음을 알 수 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 본 시스템에서 사용한 디아폴 안테나의 길이는 33 cm로 RAMAC 100 MHz 안

테나의 디아폴 안테나의 길이 120 cm에 비해 약 4배가량 짧아 고주파수의 신호를 발생시키게 되며 이에 따른 분해능 향상에 의해 명확한 반사 이벤트를 볼 수 있게 된 것이다.

이를 확인하기 위해 각 자료의 파워 스펙트럼을 구해 보았다(Fig. 8). 파워 스펙트럼은 공동 내에서의 탐사 자료인 심도 70 m 하부의 전 구간 트레이스에 대해 구했는데 그림에서 보듯이 RAMAC 시스템의 경우 50 MHz 미만에서 주 주파수가 형성됨을 알 수 있으며 본 시스템은 100 MHz에서 200 MHz에 이르는 구간까지 신호의 주파수 대역이 형성됨을 볼 수 있어 고주파수 신호에 의해 지하 공동 규모를 측정할 수 있었음을 알 수 있다. RAMAC 제조사는 250 MHz 안테나도 제공하므로 250 MHz 안테나를 사용하면 좀 더 좋은 분해능을 얻을 수 있을 것으로 여겨지나 안테나 구입 비용이 적지 않으며 그나마 두 종류의 안테나 밖에 구비되어 있지 않아 다른 주파수의 선택은 불가능하다.

시추공 레이다 탐사 시스템의 두 번째 현장 실험은 도로 하부의 가스 파이프의 위치를 탐지하는 것이다. 1 m 지름의 가스 파이프가 도로 하부 약 4 m 이하에 위치하는 것으로 알려졌는데 이 지역은 새로운 상수도 관을 건설하기 위한 곳으로 정확한 가스 파이프의 위치 정보가 필요한 곳이다.

먼저 GPR을 이용하여 도로면에서 레이다 탐사를 수행하였으나 가스 파이프의 깊은 심도와 레이다파의 분산에 의해 적절한 반사 이벤트를 얻지 못하였다. 이후 가스 파이프의 예상 위치에서 약 2 m 옆에 시추공을 뚫어 시추공 레이다 탐사를 수행하여 파이프를 찾고자 하였다. 먼저 RAMAC 100 MHz 안테나를 이용하여 탐사를 수행하였다. Fig. 9(a)는 DC 필터링, 이득 되돌림, 대역통과 필터링, NMO 보정과 구조보정을 거친 후의 결과이다. 그림에서 보면 사각형으로 표시된 부분이 마치 희석점인 것처럼 보이나 매질에서의 분산이 매우 심한 현장 조건에서 직접파의 에너지가 모아진 것이다. 더구나 이곳은 대략적인 파이프 위치를 알고 있는 곳으로 거리를 고려하면 전혀 맞지 않는 결과이다. Fig. 9(b)는 본 시스템에 의한 결과로 이때 사용한 안테나는 53 cm 길이의 디아폴 안테나이다. 그림에서 보면 파이프의 중심 심도는 4.6 m, 거리는 2.3 m 정

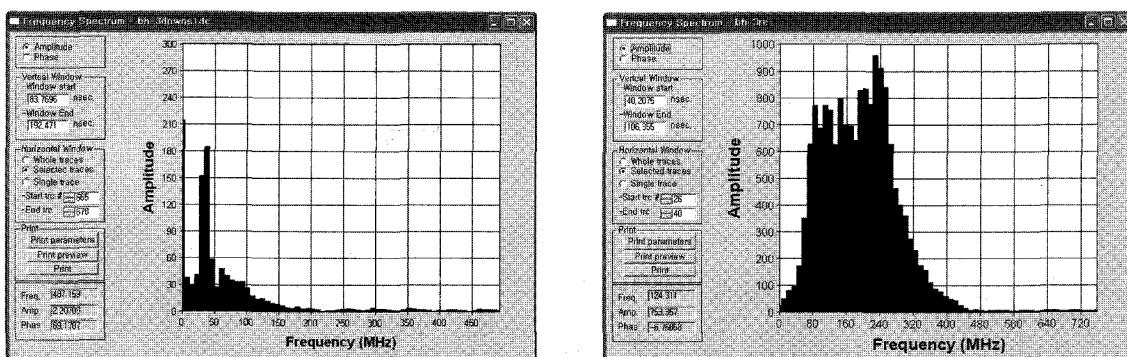


Fig. 8. The power spectra of data of RAMAC (left) and the system in this study (right).

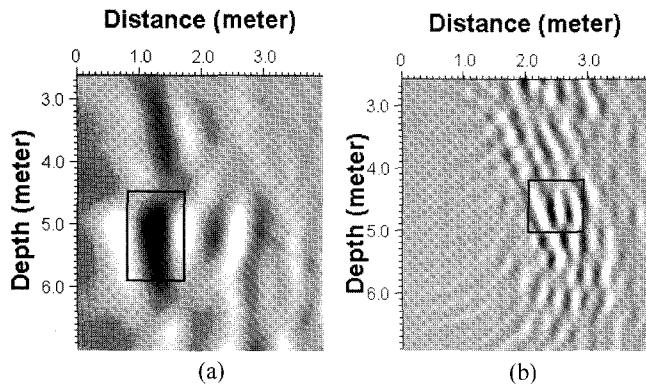


Fig. 9. The results of the borehole radar surveys using (a) RAMAC system and (b) the system in this study to detect buried steel pipe below the road. The data are processed with DC filter, gain recovery, bandpass filtering, NMO correction and migration. The rectangle part of (a) corresponds to focusing of highly-dispersed direct wave by the migration process, and that of (b) shows the reflected wave from the buried gas pipe.

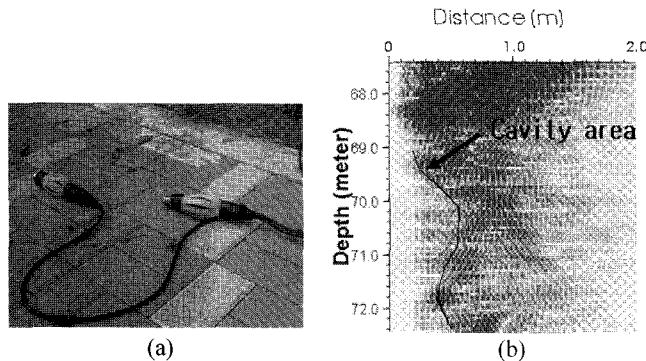


Fig. 10. The detection of the width of artificial tunnel using borehole sonic measurement system. (a) piezoelectric transducers (b) the result.

도로 여겨진다. 구조보정 이전의 자료도 같이 분석해 본 결과 RAMAC에 의한 자료는 분산이 매우 심해 반사 신호를 구별하기 매우 힘들었다. 이런 지역에 고주파수의 안테나를 사용할 경우 신호의 심각한 감쇠가 예상되나 RAMAC에 의해 안테나 길이가 반 정도인 본 시스템의 신호는 고주파수임에도 불구하고 심각한 감쇠현상을 보이지 않았다. 이는 임펄스 레이다 시스템에 비해 스텝 주파수 방식인 본 시스템의 S/N비가 높기 때문으로 여겨진다.

위의 시추공 레이다 탐사 실험을 수행한 동일한 사이트에서 시추공 초음파 탐사 시스템의 현장 적용 실험을 수행하였다. Fig. 10(a)는 사용된 압전 센서를 보여주는데 왼쪽이 송신, 오른쪽이 수신 압전 센서이며 송수신 거리는 1 m이다. 트레이스 간격은 5 cm로, 송신 압전 센서를 1개에서 3개로 변화시켜 가며 측정하였다. 그림의 (b)는 3개의 송신 압전 센서를 사용하여 측정한 결과를 보여준다. 레이다 탐사 결과에 비해 명확함이 떨어지는데 이는 사용한 압전 센서가 수직 방향으로

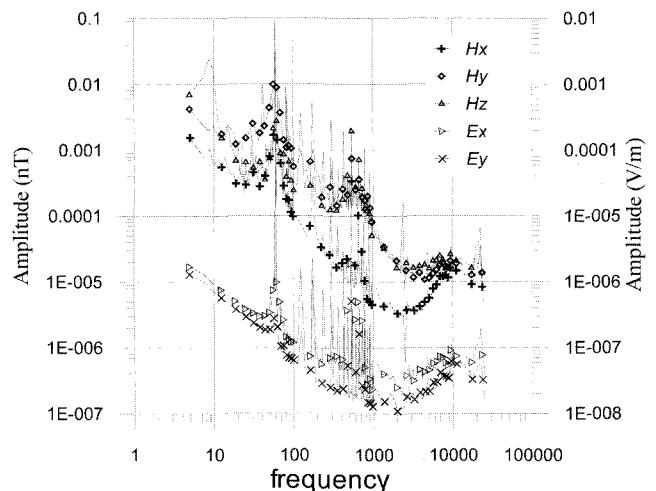


Fig. 11. Frequency spectrums of the magnetic and electric fields measured near KIGAM. Note the effects of harmonics of 60 Hz are dominant.

가장 큰 에너지를 발생시키는데 기인한다. 공동구간으로 추정되는 부분은 레이다 탐사의 결과와 유사하다.

전자기적 잡음 측정 시스템의 현장 적용 실험을 위해 한국지질자원연구원 주변의 약 2 km²의 지역에서 20 여 군데 측정지점을 선정하여 전자기적 잡음을 측정하였으며 이를 통해 전자기적인 잡음의 공간적 분포를 알고자 하였다. Fig. 11은 20 여 군데의 측정 지점 중의 하나인 한국지질자원연구원 내에서의 잡음 측정 결과로 자료 처리를 거친 후 각각의 센서에서 측정된 결과의 진폭을 주파수 축에 대해 도시한 것이다. 이 때 전기장 측정을 위한 쌍극자 길이는 20 m이며, 샘플링 주파수는 100 kHz, 측정시간 5초, 한 segment의 길이는 400 ms으로 설정하였다. 사용한 자기장 센서는 EMI 사의 BF-6 계열로 이 센서의 사용 가능 주파수대역은 5 Hz ~ 100 kHz이다. 자기장의 측정방향은 북 - 남 방향을 H_x , 동 - 서 방향을 H_y 로, 그리고 전기장의 측정 방향 역시 북 - 남 방향을 E_x , 동 - 서 방향을 E_y 으로 설정하였다. 10 Hz에서 1 kHz까지는 예상했던 대로 60 Hz잡음의 영향이 가장 커졌으며 다른 대역의 신호에 비해 약 1000배 이상 큰 것으로 나타났다. 또한 거의 1 kHz까지 60 Hz의 조화파(harmonics)에 의한 영향이 나타났으며 그 크기가 다른 주파수의 10배 이상 됨을 알 수 있었다. 따라서 이 대역의 주파수를 이용한 CSAMT (Controlled Source Audio-frequency MagnetoTellurics)나 AMT 탐사의 경우에는 60 Hz와 그 조화파에 대한 대비가 필수적이다. 비록 전자기적 잡음이 심한 지역에서 얻은 자료임에도 불구하고 1 kHz ~ 10 kHz의 dead band의 영향 또한 관찰할 수 있다. 또한 각 성분 별로 그 크기는 다르나 주파수에 대한 전체적 특성이 유사함을 확인할 수 있다.

이 외에도 본 시스템을 개량하여 전기비저항 탐사에 있어서 케이블내의 전자기유도에 의한 상호간섭 잡음을 측정한 연구

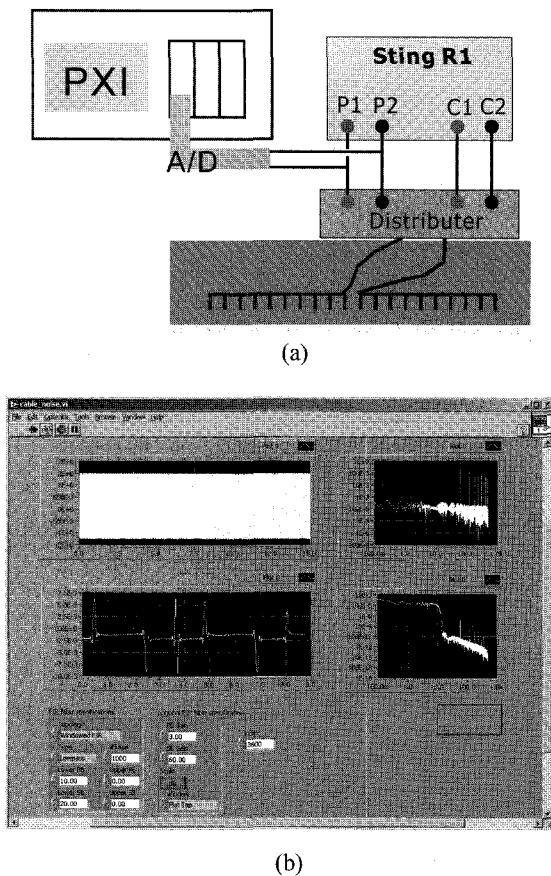


Fig. 12. The cable noise measurement system. (a) Configuration of the system and (b) the aquisition software.

결과 발표되었다(정지민 등, 2004; Cho *et al.*, 2004). 케이블 내에서의 전자 유도에 의한 잡음을 측정하기 위해서는 과형의 측정이 필수적이나 기존의 상용 전기비저항 탐사기들로는 과형 측정이 불가능하여 전자기적 잡음 측정 시스템을 변형하여 이를 측정하였다(Fig. 12(a)). 상용 전기비저항 탐사기인 Sting R1을 이용하여 전기비저항 탐사를 수행하며 동시에 전위 측정 단자로부터 신호를 받아 이를 기록한다. A/D 변환기의 트리거링은 Sting R1의 스위치 신호를 이용했으며 사용한 A/D 변환기의 최소 샘플링이 1 kHz라서 측정 이후 FIR (finite impulse response)필터를 이용해 저주파통과필터를 거친 신호를 얻는다 (Fig. 12(b)).

10심 다중 인터폰선을 이용했을 때 전선내의 전자기 유도에 의한 신호 왜곡 결과가 Fig. 13에 나와 있다. 그림에서 보면 전류전극의 스위칭 시 다중 인터폰 내 케이블에 전자기 유도가 발생해 스위칭 이후의 측정 시간까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 전기비저항 탐사기는 일반적으로 전극의 분극 현상을 없애기 위해 송신 중 전류전극의 극성을 바꾸게 된다. 짧은 시간에 전류량의 급속한 변화는 자기장의 급속한 변화를 야기시켜 전류 케이블 양단에 전류의 변화에 반대하는 방향으로 기전력(electro motive force)을 발생 시키게 된다. 더욱이 다중



Fig. 13. The signal distortion due to electromagnetic induction inside the multi-interphone cable in the resistivity survey.

인터폰선은 케이블이 장력을 이기기 위해 꼬여서 제작되어 마치 코일과 같은 역할을 하게 되므로 기전력의 발생이 매우 크다. 이 기전력은 측정 전위 케이블에 전자기 유도 현상을 발생시켜 전류 전위를 발생 시키게 되며 이 전류전위에 의해 신호 왜곡 결과가 나타나는 것이다.

결 론

현장 몰리탐사 수행 시 상용화된 장비로는 탐사 대상 매질의 물성이나 대상체의 크기, 모양 등의 현장여건 및 탐사목적에 의해 탐사가 불가능하거나 탐사 목적에 맞는 분해능을 얻지 못하는 경우를 종종 만나게 된다. 이런 경우 상용 장비에 비해 측정의 편리성은 다소 떨어지지만 측정 대상에 적합한 탐사 시스템의 제작이 가능하다면 많은 문제를 해결할 수 있을 것이다. 본 논문에서 착안한 것도 제작과 확장이 용이하여 다양한 현장여건 및 탐사 목적에 적극적으로 대처가 가능한 탐사 시스템 개발이었으며, 이를 위해 다목적 몰리탐사 측정 시스템을 PXI를 기반으로 개발하였다. 전체 시스템은 PXI를 제어부로 하여 스텝 주파수 시추공 레이다 탐사 시스템, 시추공 초음파 탐사 시스템과 전자기적 잡음 측정 시스템으로 구성된다.

다이폴 안테나의 길이를 임의로 조절할 수 있는 시추공 레이다 탐사 시스템을 이용하여, 상대적으로 저주파수 안테나를 사용하여 분해능이 떨어지는 상용 시추공 레이다 탐사기로는 불가능했던 시추공에 착백된 지하 공동의 너비 측정에 성공하였으며, 매질내에서 전자기파의 분산이 심해 상용 장비로 탐지가 불가능 했던 지역에서의 지중 파이프 탐지에 성공하였다. 또한 위와 동일한 지하 공동의 너비 측정에 시추공 초음파 탐사 시스템을 적용하여 그 가능성을 확인하였다. 전자기적 잡음 측정 시스템을 이용하여 한국 지질자원연구원 주변의 20여 곳에서 실험을 수행하여 잡음의 주파수별 특성을 확인하였다. 또한 전기비저항 탐사 시 사용되는 다양한 케이블에 대한 케이블 내의 전자기적 유도 현상 및 그에 따른 신호 왜곡을 규명하기 위해 전자기적 잡음 측정 시스템을 변형, 적용하여 만족스러운 결과를 획득하였다.

본 연구에서 개발된 시스템은 MT 탐사나 전자탐사 시스템

으로 쉽게 확장이 가능하며 음향방출 측정 장치와 같은 계측 장치에 적용 또한 용이하여 그 적용성이 크다 할 수 있다. 한편 당 연구팀은 시추공 초음파 탐사 시스템의 압전 센서의 변형과 스텝 모터에 의한 회전을 통해 360도 회전하며 수평 주사가 가능한 시스템으로 업그레이드 하고 있어 향후에는 본 시스템을 적용하여 더욱 정확하게 지하공동 규모를 탐지할 수 있으리라 기대하고 있다

참고문헌

- 곽두영, 2002, LabVIEW™ 컴퓨터 기반의 제어와 계측 Solution, Ohm사.
- 김영준, 여은민, 김찬수, 신성렬, 2005, 다중채널 고분해능 해양 탄성파탐사 시스템 개발 및 현장 적용, 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 공동학술대회 논문집, 293-298.
- 김현도, 김진후, 2005, PC 기반 8채널 해양 탄성파 탐사 시스템 을 이용한 고해상 천해저 탐사, 한국물리탐사학회·대한지구 물리학회 공동학술대회 논문집, 187-194.
- 정지민, 조성준, 김정호, 송영수, 2004, 전선의 전자기유도 현상에 의한 신호 왜곡, 물리탐사, 7, 251-255.
- 정현기, 임무택, 박영수, 조철현, 조광호, 1999a, 지중 철근심도 탐지용 3성분 시추공 자기탐사 시스템 개발 및 응용, 대한자원 환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회 춘계 공동학술발표회 논문집, 109-111.
- 정현기, 임무택, 정호준, 1999b, 간편 심부 전기탐사 시스템 개발, 대한자원환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회 춘계 공동학술발표회 논문집, 321-325.
- 조성준, 김정호, 이성곤, 손정술, 정승환, 2002, 네트워크 분석기를 이용한 레이다탐사 시스템의 구현, 물리탐사, 5, 272-279.
- 이호영, 1996, PC를 이용한 6채널 천부해저 탄성파 탐사자료의 취득 및 처리, 한국자원공학회지, 33, 128-132.
- Cho, S.-J., Kim, J.-H., Jeong, J.-M., Sung, N.-H., and Sato, M., 2004, Effect of measurement cables to field data in the DC resistivity survey, *Proceeding of 110th SEGJ Conference 2004*, 184-187.
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., Cho, S.-J., and Son, J.-S., 2004, Application of crosshole resistivity anisotropy tomography to the safety analysis of a high stored building over an abandoned old mine, *66th EAGE conference, Expanded Abstracts*, F023.
- Lee, T. S., Sung, N. H., and Hwang, H. S., 2003, Development of a crosshole sonic logging system for the integrity testing of cast in-situ concrete file, *Proceeding of the 6 th SEGJ International Symposium*, Tokyo, 334-337.
- National Instrument, 2004, The measurement and automation catalog.