

Ground Penetrating Radar를 사용한 지하설비 탐사에 관한 연구

손 수국, 전 경수
수원대학교, 한국가스공사

Exploration of Buried Facilities by GPR

Sugooq Shon, K. S. Jeon
University of Suwon, KOGAS

Abstract - This paper discusses the system design of a synthetic aperture radar system based on a pulse-echo radar. The design consists of an ultra-wide bandwidth antenna, an amplitude modulation, timing stabilities, and high speed A/D conversions with an equivalent-time sampling. Experiment results show that GPR(Ground Penetrating Radar) can be used to explore buried electric facilities.

1. 서 론

GPR (Ground Penetrating Radar)은 지하로 초고주파 전파를 송신하고 지하의 물체에서 반사되어 돌아오는 신호를 분석하여 지하의 물체를 파악하는 레이더이다. 지하탐사 기술은 1950년대부터 발달되어 지하자원 및 지층 구조의 탐사에 활용되고 있다. 최근 들어서 RF 기술의 발달, 특히 초고주파 신호처리 기술의 발달로, 그 활용범위가 점차 넓어지고 있는데 건축구조물의 안전진단 및 각종 매설배관의 탐사도 가능하게 되었다. 본 연구에서는 한국가스공사연구원 및 국내의 여러 도시가스회사들과 공동으로 개발한 GPR 장비를 통한 지하 전력설비 및 매설물의 탐사에 관한 연구결과를 발표한다. 탐사기법, 레이더에서의 신호처리 기법, 수 pico sec 에 해당하는 A/D 샘플링 기술, 안테나 기술 등에 관한 연구 및 실험 결과에 대한 토론이 이루어진다.

GPR은 지하 구조물 탐색 과 지하자원 탐사 등 다양한 분야에서 활용되는 계측장비이다. GPR의 작동원리는 고주파 전자파 펄스를 송신안테나를 통하여 지하 토양지층으로 전송시킨 후, 각종 지하 매설물로부터 반사되어 오는 전자파 신호를 수신안테나를 통하여 측정된 후 신호처리를 수행하여 지하 매설물의 정보를 평가하는 것이다.

레이더 시스템에서는 AM, FM, PM의 신호 변조 방식이 사용되고 있다. 신호 변조 방식은 시스템의 사용 목적에 따라 달리 선정된다. 지하 구조물 탐사를 위하여 실시간 임펄스형 레이더 시스템이 가장 많이 사용되고 있는데, Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) radar 와 Stepped-Frequency radar 변조 시스템도 최근 새롭게 연구 개발되고 있다. 본 논문에서는 가장 널리 활용되고 있는 AM을 기반으로 한 GPR에서의 신호 변복조기술 개발에 관한 제반 사항들을 논의한다.

지하 수 미터까지의 탐사 능력이 있게 하기 위해서는 1 - 2,000 MHz 전자파가 사용 될 수 있는데, 500 MHz 송신 안테나 시스템이 신호 송신을 위하여 선정되었다. 송신안테나를 통하여 약 2 [nsec]의 초고속 임펄스 신호를 공급하여야 하는데, 매우 짧은 선로 (직렬 인덕턴스와 병렬 커패시턴스의 분포상수에 의해 등가적으로 표현됨)에서의 급 발전 시 출력단자에 임펄스가 발생되는 Line Pulser 생성 회로의 구현 및 특성을 설명한다.

자유공간을 통한 다이폴 안테나의 임펄스 전달특성 및 수신특성을 토의한다. 수신 다이폴안테나에서는 임펄스 전달특성에 공진 성분이 많아 신호처리의 어려움이 많다. 수신안테나를 통하여 측정된 신호는 송신안테나에서 단일 임펄스를 송신하였음에도 불구하고 많은 에코 및 노이즈를 포함하고 있다. 송신안테나에서 백 볼트 이상의 송신전압을 사용하였고, 자유공간을 통한 수신안테나에서 유도된 전압은 수 mV 정도였다.

개발중인 GPR 시스템은 약 500MHz의 밴드 폭에서 운영될 경우 지하 수 [m] 정도 탐사할 수 있는 능력을 갖게 된다. 중심 주파수 500 [MHz]를 갖는 안테나로 지하 수 [m] 정도 깊이에 매설된 직경 수십 [cm] 이상의 물체를 탐사할 수 있게 된다. 송신안테나에서의 송신 임펄스가 기본적으로 2 [nsec] 정도인데, 수신안테나에서는 초고속으로 신호를 수집하여야 한다. 수신신호에 공진 주파수가 많이 포함되어 있고, 초고속으로 변화하기 때문에 수신신호의 샘플링 속도는 매우 빨라야 한다. 상층 기술기가 큰 RF 파형에서 신호의 샘플링은 노이즈에 민감하여 나중에 복원된 신호를 왜곡시키게 된다. 이러한 이유 때문에 시간적 안정도를 이룩할 수 있도록 샘플링을 해야 한다.

신호의 샘플링에서 시간적 안정도를 향상시키고, 제품 제작비용을 경제적으로 만들기 위하여 저주파에서 샘플링하여 초고속 신호를 재생할 수 있는 Equivalent-Time Sampling 이라는 기술 개발에 대하여 논의한다. 또한 본 논문에서 개발된 Equivalent-Time Sampling 기술은 LAN 케이블과 같은 통신케이블의 특성 평가를 할 수 있는 케이블 테스터기의 개발에도 응용될 수 있다.

2. 임펄스형 GPR 시스템 설계

임펄스형 GPR은 송수신 안테나, 제어장치, 및 통신부로 구성된다. 그림 1은 GPR 시스템의 Block diagram을 나타내고 있다. 송수신 안테나는 핵심이 되는 부분으로서 제어장치에서 발생한 고주파 전자파 펄스를 송신시키고, 또한 대상 물체에서 반사되어 돌아온 수신 신호를 받아들이는 장치이다. 송신 주파수의 선정은 탐사 깊이 및 탐사체의 크기에 따라 다르게 선정된다.

제어장치는 시스템 전체를 제어하고 수신기로부터 측정된 신호를 기록, 저장하여 자료를 처리하는 역할을 한다 [1]. 제어장치에서는 수신 신호가 기록되는 최초의 시간, 아날로그 신호인 수신신호의 디지털 샘플링 간격, 신호가 기록되는 전체 시간범위, stacking 횟수 등 탐사에 필요한 여러 변수들을 결정하며, 결정된 변수에 적합한 송수신 펄스를 발생시켜 증폭시킨 후 송신 안테나를 통해서 방사하며, 수신안테나를 통해 수신된 신호를 증폭시켜서 기록한다. 또한, 샘플링 간격 및 trace 당 샘플링 간격 및 개수를 결정한다.

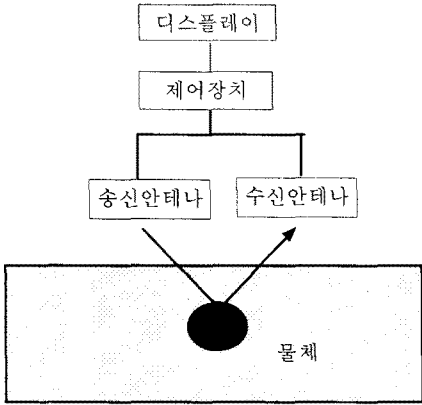


그림 1 GPR 시스템의 블록다이아그램

전자파 전달 경로를 통한 신호의 전력손실에 의하여 GPR의 지하매질 대상물체에 대한 측정능력 (detectability)이 영향을 받는다. 지하 토양지층들에서의 전력손실과 매질체에서의 산란 손실 후 전자파 신호는 감소되는데, 전달된 수신 신호의 크기를 GPR의 측정 범위 이상으로 결정하는 것이 중요 설계변수가 된다.

송수신 안테나에서는 일반적으로 고주파 (수 GHz)의 혼 안테나 또는 평면상의 어레이타입 안테나가 잘 사용된다. 그러나 본 GPR 시스템 분야에서는 dipole 형의 안테나가 광범위하게 이용된다. 다이폴 안테나는 낮은 지향성, 안테나 공명, 불안정한 특성 임피던스, 기구적인 대형화 등의 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 보통 자유공간내의 레이더로부터 전자파는 Fraunhofer 영역에 의한 전자장 해석이 되나, 지하 수[m] 아래까지에 있는 수 십 [cm]되는 대상물체를 전자파로 측정하게 되는 GPR에서는, 대상물체가 Fraunhofer와 Fresnel zone의 사이에 있어 전자장의 해석이 꽤 복잡한 특징이 있다. 대상물체가 송신안테나로부터 $2D^2/\lambda$ (D는 대상물체 크기) 거리 이상부터는 Fraunhofer 영역으로 생각될 수 있는데, 직경 30[cm] 정도 되는 실린더형 금속배관을 측정할 경우는 지하 18 [cm]가 Fraunhofer 영역의 시작점이 된다 [3]. 송신안테나와 수신안테나는 50[cm]의 간격을 두고 Bistatic scattering 측정 mode로 되어있다. 송수신 안테나의 중앙이며 지하 50[cm]에 실린더형의 금속배관이 묻혀 있다고 가정할 경우, 금속배관에서의 전자파 반사에 의한 단위 길이 당 RCS (Radar Cross Section)는 최대가 되며 1[m] 정도로 계산된다. 중앙에서 벗어남에 따라서 RCS는 크게 줄어든다. 이러한 특징 때문에 GPR로 배관 위를 가로질러 측정할 때 수신신호의 크기가 포물선 형태와 같이 변화되어 나타날 것임을 예측하게 한다. 본 연구에서 사용되는 다이폴 안테나는 광대역에서 운전되어야 하기 때문에 저항성 종단장치를 사용하므로 효율이 타 안테나에 비해 크기가 낮다. 하지만 저항성 종단장치의 사용에 의하여 경제적으로 공명의 감소를 얻도록 했다. 안테나에 공급된 전력에 비해하여서 송출전력이 결정되는데, 광대역 안테나 요구사항으로 안테나 자체 손실이 발생한다.

다이폴 안테나의 지향성 문제를 보완하기 위하여 반사기를 채택했다. 반사기에 의한 전자파 지향성의 확대는 안테나와 대상물체로부터의 전자파 반사의 정도를 관계시키는 Spreading 손실을 감소시키게 한다. 이때 Spreading 손실은 대상물체의 형태 및 크기에 영향을 받게 되는데, 같은 유전체 라도 평판 구조에서 그 손실이 작게 나타나고, 라인 또는 점 형태 일 경우는 더 많은 Spreading 손실 특성을 나타내게 된다. 안테나 자체손

실, 대상물체에서의 산란(scattering)손실 등이 발생한다. 두께 약 20[cm] 도양지층 전송과 수신에서 발생하는 전체 전력손실을 종합하면 60 dB 정도로 계산된다 [1].

대상물체를 발견할 수 있는 능력(detectability)은 수신기의 노이즈 특성에 의하여 영향을 받는데, 수신 신호가 노이즈 신호보다 더 커야 한다. GPR의 detectability는

$$\text{Detectability} = 20 \log \left(\text{peak transmitted voltage} / \text{peak received voltage} \right)$$

에 의하여 정의된다. 앞에서 예상된 전력손실을 고려하면, 송신기 최대 출력전압이 140[V] 인 경우 수신기에서의 최대 수신 신호크기는 140 [mV]로 예상된다. 현재 개발중인 GPR을 시멘트 층을 통하여 전자파 송수신 시험을 하였을 때 수신기 전압이 15[mV] 정도로 측정되었다. 자연환경에서의 노이즈는 약 0.5 [mV]로 관측되어서, 충분히 매설물을 관측할 수 있는 수준이 되었다. 이때 오실로스코프의 프로브를 통한 손실을 고려하면 수신기 신호는 더욱 클 것으로 예상된다. 이밖에도 대상물체의 형상, 재질 (주철관, 피복된 주철관, 배관속에 포함된 유전체 재질)등이 GPR의 Detectability에 큰 영향을 준다.

다음 측정깊이의 해상도에 대하여 논한다. 측정깊이는 전자파의 경과시간과 지하매질에서의 전자파 전파속도를 고려하여 계산된다. 단단계 지하층 또는 많은 수의 매질물들로 지하구조가 형성되면, 수신신호는 많은 수의 반사 신호들에 의한 convolution으로 합성된다. 합성된 신호에서 각각 반사체에서의 깊이 정보를 알 수 있게 deconvolution하는 작업이 필요하다. 수신부에서는 합성된 신호들을 구별해낼 수 있을 만큼 충분한 밴드폭이 지원되어야 한다[4].

수평면상의 공간 해상도는, 같은 깊이의 수평면상에서 여러 개의 대상물체를 구별해 낼 수 있는 능력이다. 지층에서 전자파의 감속특성이 클수록 수평면 해상도는 증가한다. 또한 안테나 밴드 폭이 증가할수록 (안테나의 크기가 작아 질수록) 수평면 해상도가 증가한다. 카트의 오른쪽 바퀴에 인코더가 부착되어 있다. 카트가 1.8cm를 진행할 때마다 1 개의 전기적 펄스 신호가 인코더에서 발생하며 내부의 마이크로 프로세서에 전달된다. 펄스가 발생하면 안테나의 제어부에서는 1개의 트레이스(Trace)에 대한 측정 작업을 실시한다.

끝으로 측정 깊이의 수평면상의 해상도에서 중요한 것은 신호처리 기술이다. 단단계 반사신호의 분리 기법과 다수의 대상물체에서의 반사신호를 분리 (deconvolution)해내는 신호처리기술이 중요한데 이 기술에 대한 논의는 본 논문에서는 생략한다.

3. 송수신 임펄스 신호처리

본 개발 중 GPR 에서는 입력 전원으로 임펄스형 전압이 사용되고 있는데 입력신호의 왜형을 방지하기 위해 안테나의 Impulse response는 극히 짧은 필요가 있다. 통상 GPR의 송신부에서는 초광대역 폭의 펄스가 사용된다. 핵심적인 GPR 제작기술로서 반드시 초광대역 폭의 펄스 재현 기술이 있어야 한다. 이 펄스는 약 수백 ps 정도의 입상시간을 가지는 2 ns 의 폭으로 이루어진 140 볼트 크기의 패턴을 갖는다. 일반적인 발진, 증폭, 변조, 복조 등의 기술을 이용하는 현존하는 반도체 부품으로는 구현이 불가능하여서, 본 연구에서는 line pulser 생성에 활용되는 특수 반도체를 활용하였다. 아발란치 트랜지스터라고 하는 전자부품이다. 고전압 절연테스트 규격으로 볼 때, 아발란치 트랜지스터의 수백 KV/ μ s 는 일반규격보다 매우 큰 수치를 갖고있다. 매우 짧은 송전선로와 고속스위치로서 사용된 아발란치 절연과피로

드에서 작동되는 트랜지스터에 의해서 임펄스가 생성된다.

그림2는 아발란치 트랜지스터를 사용한 임펄스 발생회로의 일 부분이다. 제어신호의 입력시 전압은 R3-C1 회로를 경유하여 Q1의 콜렉터에 인가된다. 이때 C1이 충분히 높은 전압으로 충전되면 Q1의 내부선로가 절연 파괴되어 단락 된다. C1의 충전에너지가 Q1으로 방전하면서 매우 빠른 임펄스가 송신안테나에 전달되며, 그 전압이 급격히 감소되고 동시에 Q1의 절연 파괴 현상도 즉시 복구된다. 제어신호의 입력 시마다 이 현상은 반복되는데, 약 200,000회/초 정도가 가능하다.

실협에서 수신된 반사신호에서는 복잡한 불필요한 주파수대역, noise, echo, 공명파 등 목적이외의 신호가 동시에 감지되고 있다. 따라서 적절한 대역필터를 사용하여 이들을 제거하고 수신신호 처리에서 필요한 레벨까지 노이즈 없이 증폭해야만 원하는 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 광대역 고주파 증폭기인 NE5205를 사용하여 필요에 따라 최고 20 dB 까지 증폭하였다.

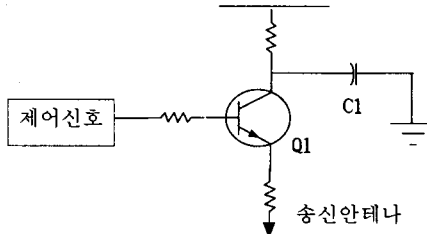


그림 2 아발란치 트랜지스터를 이용한 임펄스 발생회로의 예

4. 신호변조 및 Timing stability

수신신호의 변조, timing stability, 및 Equivalent-Time sampling에 의한 초고속 신호의 샘플링 기법에 대하여 설명한다. 수신안테나로 입력된 신호는 고주파 증폭기를 통하여 증폭이 된후 Quad-diode sampling gate에 의하여 샘플링된다. 이때 Equivalent-Time sampling 수행을 위한 제어신호에 의하여 Quad-diode sampling gate에서의 샘플링이 제어된다. 샘플링된 신호는 커패시터에서 Holding 된다. A/D 변환을 거친 후 Equivalent-Time sampling에 의해 수신된 신호는 제어 펄스신호의 repetition time마다 수신된 신호와 함께 마이크로프로세서시스템의 버퍼에 수집 저장된 후, 프로세서의 신호처리에 의하여 초고속 신호를 합성해 낸다. 본 개발 제품에서는 약 수십 [ps]의 샘플링 지속시간을 사용했다.

Equivalent Time Sampling 기술은 lower repetition rate에서 샘플링하여 higher frequency signal을 생성해 낼 수 있는 샘플링 기법으로서, Tektronix등에 의해 개발되었고 많은 분야에서 응용되고 있다. 현재 사용중인 Logic analyzer의 샘플링 정도가 100 - 200 [MHz]이고 수 [nsec] 인 timing resolution을 sub-nanosec까지 확대할 수 있는 신기술이다. 이 기술은 차세대 초고속 반도체 회로에서 필요한 sub-nanosecond에서 1 또는 2 [nano-second]까지의 timing measurement를 가능하게 하며, 기존 Logic analyzer의 아키텍처를 그대로 사용할 수 있기 때문에 경제적이다.

본 개발중인 GPR도 Equivalent-Time sampling을 사용한다. GPR 시스템에서 토양이라는 매질은 저주파필터로 작용하여 고주파성분을 감소시킨다. 수신된 실시간 신호패턴이 왜형되고, 송신된 펄스 파형에 비례하여 펄스폭이 넓어지게 된다. 이는 수신정보의 밴드폭이 감소를 의미한다. 이러한 특성 때문에 GPR 시스템을 구현할때는 고 해상도 탐사를 달성하기 위한 초 광대역 송신신호를 사용하여야 하며, 또한 수신신호 처리에서는

상당한 신호의 밴드폭을 갖는 고 신뢰도의 하드웨어를 사용하여야 한다. 실제 수신된 Time-domain waveform은 Pulse duration이 확장됨에 따라 신호가 변형되고 또한 신호의 Bandwidth가 감소되어 있다. Short pulse duration은 High Bandwidth에 의한 고해상도가 가능하나 시스템이 복잡하고 가격이 상승하며, 반대로 Long pulse duration은 Low Bandwidth에 의한 저해상도 시스템이 된다. 가격적 고려와 초 광대역 수신신호 처리의 필요성에서 ET 샘플링 기법을 채택하게 되었다.

송신 안테나에서는 초광대역의 짧은펄스가 수십 μ s의 간격으로 전자파를 송신하게 된다. 수신안테나에서의 신호는 증폭기, Sample / Hold, 및 A/D converter의 회로에 전달된다. Sample/hold 회로는 초고속 신호처리를 지원하도록 제어된다. 수십 μ s마다 반복되는 수신펄스들에 대하여도 순차적 시간지연을 갖고 샘플링을 한다.

각 수신 신호에 대한 샘플링 시간(T_s)은 펄스반복주기(T), 샘플링 지연간격(t'), 과 샘플링 수를 고려하여 아래와 같이 주어진다.

$$T_s = T + nt' \text{ for } n = 1 \text{ to } N$$

나이퀴스트 샘플링이론에 따라 샘플링 지연간격은 밴드폭과 다음의 관계

$$t' \leq \frac{1}{2B} \text{ (B는 밴드폭)}$$

를 충족시켜야 한다.

ET샘플링 기법에서는 샘플링 지연간격(t')을 갖는 펄스들의 정확한 생성이 timing stability에 결정적으로 영향을 준다. 샘플링 지연간격은 반사되어 돌아오는 파형을 얼마만큼의 시간 간격으로 수집할 것인가를 의미하는데, 일반적으로 사용하는 안테나의 중심 주파수에 따라 그 값이 다르다. 이를 위해서는 매우 짧은 시간에 대한 측정기술을 필요로 하고 또한 고속의 디지털 스토리지 오실로스코프에 이용되는 최신킨술을 필요로 하고 있다. 본 논문에서는 t' 에 대하여 수십 ps를 사용하였다. 밴드폭 B가 500MHz 임을 고려할 때 수십 ps는 ET 샘플링에 의한 측정이 충분한 밴드폭을 지원하게 된다.

본 논문에서는 상기 기술된 이론적 근거에 의하여 수십 [ps]급의 High-speed digital sampling technique이 구현됐다. 샘플링 시간지연(t')을 갖는 순차적 펄스들은 2중의 슬로프 회로(급경사 슬로프, 저경사 슬로프)의 신호들의 교차점 비교로부터 시간적 변화량에 의하여 생성되었다. 급경사 슬로프 신호주기는 펄스 반복주기(T)와 같은 시간 주기를 갖으며, 저경사 슬로프 신호 주기에는 전체 샘플링 갯수가 포함되는 시간주기를 갖는다. 수십 μ s (= T) 마다 펄스 반복이 이루어지고, 수십 ps (= t') 마다 한 개의 샘플링이 이루어지며, 안전도 유지를 위해서 샘플링 지연간격의 10% 이내로 할 경우, Timing stability는 수십 μ s + 수십 ps \pm 10% of 수십ps 가 된다. Timing instability가 RF 파형의 신호변화율에 따라 신호 샘플링 및 왜형에 영향을 주게된다. RF 파형이 급변시, 샘플링 회로의 jitter는 나중 reconstructed 파형에 많은 노이즈를 포함하게 되며, 반대로 RF 신호의 파형이 완만히 변할 때는 샘플링 회로의 jitter는 눈에 크게 구별가지 않는다. 안정된 샘플링을 유지하기 위해서 신뢰성 있는 회로구성이 필요하며, 펄스 제너레이터의 타이밍 변화(variations)분이 자동적으로 보상될 수 있는 기능이 있어야 한다.

5. 탐사실험 결과 및 분석

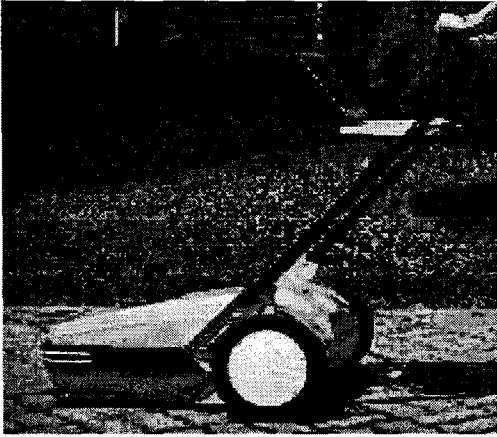


그림 3 GPR 개발제품의 외관

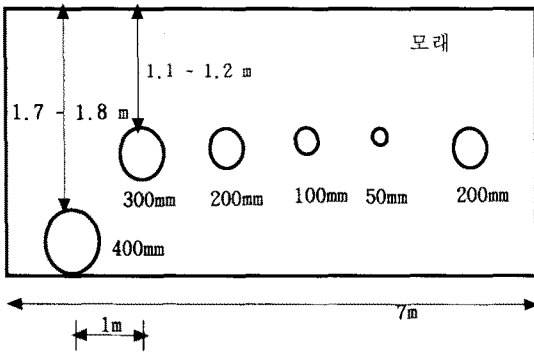


그림 4 모의시험장의 배관 매설 단면도

개발제품의 외양을 그림3에 나타내고 있다. 노트북 PC를 통하여 측정장비를 제어하고 또한 측정데이터를 관찰할 수 있다. 상기 개발 제품을 활용하여 몇 가지 실험을 수행하였다. 그림 4에는 실험을 위하여 모래 속에 주철배관을 여러 크기별로 매설해 놓은 모의시험세트의 단면도이다. 각 배관의 크기는 직경을 나타내고 있다.

그림 5에는 실험결과와 탐사영상을 나타내었다. 탐사 결과 배관의 위치 및 깊이가 정확히 탐사되어 나타났다. 배관의 크기별로 반사신호의 크기 또한 구별되어 측정되었다. 배관의 깊이를 예측하기 위하여 모래의 상대 유전 상수(4)를 고려하였는데 10 cm 정도의 오차 범위에서 배관의 깊이가 계산되었다.

일산의 한 도심지의 지하에 매설된 배관에 대한 탐사를 수행하였다. 배관은 지하 1.2 m 정도의 깊이에 매설된 것으로 도면에 표시되어 있는데 상부는 아스팔트로 포장된 상황이다. 본 실험은 (주)서울도시가스의 협조로 200A PLP 배관에 대하여 실측을 하였고 그 결과를 그림 6에 나타내고 있다. 도면에 표시된 지역에서 배관을 탐사하여 정확히 찾을 수 있었고, 지층의 상대 유전율을 6으로 하여 깊이도 10% 오차범위 내에서 정확히 판별 가능했다.

개발된 제품의 성능이 외국제품에 전혀 뒤떨어지지 않으며, 오히려 우수한 면도 검토되었다. 본 레이더기술이 지중 매설 전기통신설비의 탐사에 활용 될 수 있다는 가능성을 확인했는데, 지중 전력 및 광통신 케이블의 탐사가 가능했다. 지금은 지중의 접지저항 시스템에 대한 탐사를 계획하고 있다.

[참 고 문 헌]

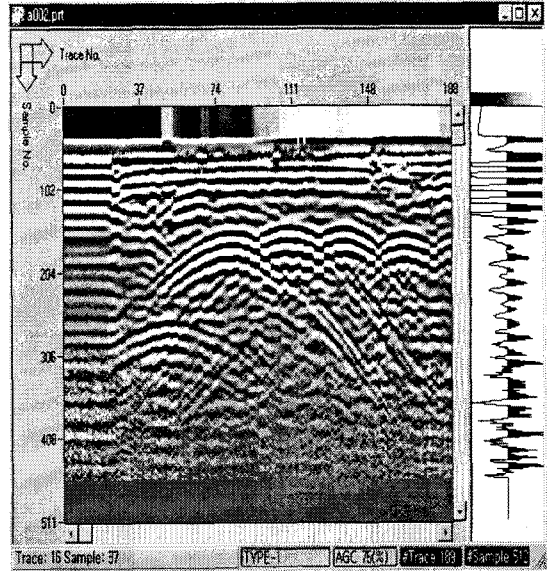


그림 5 모의 실험세트에 대한 탐사영상

- [1] D. J. Daniels, "Surface Penetrating Radar", The Institution of Electrical Engineers, 1996
- [2] John Warhus, Jeffrey Mast, Scott Nelson, "Imaging Radar for Bridge Deck Inspection", 1992
- [3] Constantine A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, 1989
- [4] COOK, J., "Radar Transparencies of mine and tunnel roc
- [5] Geophysics, 40. pp865 - 885, 1975

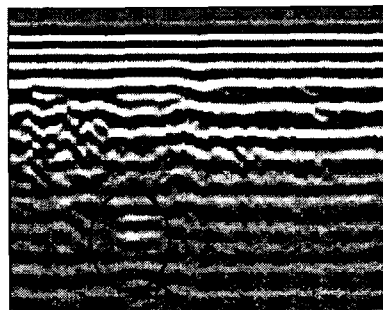


그림 6 실제 지중 배관 탐사영상 결과
200mm 배관

[감사 글]

본 GPR의 개발 및 실험은 한국가스공사, (주)대구도시가스, (주)부산도시가스, (주)삼천리, (주)서울도시가스, (주)콘트롤기술정보의 컨소시엄으로 수행되었으며, 본 논문의 발표에 협조해주셔서 감사를 표합니다.