

# GPR 기법을 이용한 관로 배면 지반 상태 평가에 관한 연구

## GPR Inspection for Surrounding Soil of Underground Pipes

김원대\*, 황환국\*\*, 박재우\*\*\*, 채명진\*\*\*\*

Wondaek Kim, Hwangook Hwang, Jae-woo Park, Myungjin Chae,

### 요 약

도시 광역화와 인구의 집중에 따라서, 도시 거주민의 삶의 질 향상을 위해서는 많은 기반이 필요하다. 이 중에서 깨끗한 위생 환경을 위해서 용수의 공급 및 하수의 처리는 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 이를 위하여 많은 조사와 보수가 이루어지고 있지만, 관로의 내면을 조사하는 다양한 기법은 활발하게 이루어지고 있는 반면, 도로의 침하나, 관로 내부로의 침입수 또는 침출수 등을 유발할 수 있는 관로 배면의 상태를 조사하는 기법은 아직 미비한 상태라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 관로의 배면에 대한 정보를 취득하기 위하여 매질을 통과하여 정보를 취득할 수 있는 지중탐사레이더(GPR)를 이용하여 관로의 배면 상태를 탐사하기 위한 기본 반사 특성을 조사하고, 이를 기준으로 실제 대상물의 반사 특성을 조사 분석하여 관로 배면 지반의 특성을 조사, 평가하고자 한다.

키워드: 관로, 스캐닝, 지중탐사레이더, 유지관리, GPR (Ground Penetrating Radar)

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

도시 거주자의 생활 환경을 쾌적하게 유지하기 위해서는 많은 시설물들이 필요하다. 이러한 시설물 중에서, 생활용수를 공급하는 것 못지않게 중요한 것은 사용한 하수 처리를 위한 각종 관로를 최적의 상태로 유지 관리하는 것이라 할 수 있다. 이것은 도시의 기능 유지와 공중위생, 환경 보호 등을 위하여 매우 중요한 것이라고 할 수 있다.(이종형 외, 2006)

관로 시설물의 내부 상태는 현재 다양한 영상화 기법을 이용하여 유지 관리에 필요한 각종 정보를 활용하여 평가가 가능하다.(한국건설기술연구원,2006) 그러나, 공기 또는 물에 의한 동공은 도로의 침하, 관로의 파괴를 유발하며, 오염물질의 유입 및 유출로 인한 각종 오염사고를 일으키는 원인으로 관로 배면의 상태를 평가하는 것은 매우 어려운 것이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 관로의 배면에 대한 정보

를 취득하기 위하여 매질을 통과하여 정보를 취득할 수 있는 지중탐사레이더(Ground Penetrating Radar: 이하 GPR)를 이용하여 관로의 배면 상태를 탐사하기 위한 특성을 분석하고자 한다.

GPR을 이용한 지하매설물탐사시 스캔되는 대상은 상, 하수도관, 가스관, 통신구, 전력구 등 다양할 뿐만 아니라 그 재료 또한 철판과 콘크리트관 등으로 나뉘며 형상과 크기 또한 일정치 않다.(박영삼, 2002)

이러한 지하매설물을 GPR탐사를 통해 재질을 판단하는 것은 어려운 작업인데 이는 GPR탐사 자료가 단순히 반사된 신호진폭의 크기를 나타내며 이러한 반사에너지의 크기에 관계되는 것은 매질의 유전율이 주위 지반이 갖는 유전율과의 차이에서 기인하기 때문이다.(Reynold, 1997)

본 연구는 매질의 모형에서 실시한 실험탐사결과를 분석하여 전자파의 전파특성(전파속도, 투과심도, 반사강도, 감쇠 등)을 확인하여 향후 배면 탐사시 현장 적용하기 위한 반응 특성을 분석하는데 목적을 둔다.

또한 많은 GPR탐사의 실패원인이 탐사목적물의 심도, 크기, 에너지의 감쇠 등, 전자파가 매질내를 투과할 때의 전파특성을 고려하지 않고 탐사를 수행하기 때문이라고 생각되므로, 현장에서 GPR탐사의 적용오류를 최소화하고, 자료획득과 분석의 어려움을 극복하여 성공적인 탐사목적물 달성하기 위해서는 전자파가 매질내를 투과할 때의 전파특성을 명확히 파악하였다.

\* 조교수, 인하공전, kimwd@inhac.ac.kr

\*\* 선임연구원, 한국건설기술연구원, hkhwang@kict.re.kr

\*\*\* 연구원, 한국건설기술연구원, jwpark@kict.re.kr

\*\*\*\* 선임연구원, 한국건설기술연구원, chae@kict.re.kr

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 관로 배면의 지반 상태를 평가하기 위한 연구를 실시하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 GPR 기법을 적용하여 관로 배면을 조사하기 위한 방안을 제시하는 하하고자 하며, 지반의 상태를 나타내는 GPR의 신호에 대한 반사특성을 파악하여야만 실제 적용한 결과에 대한 분석이 가능하며, 정확한 분석이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 GPR의 관로 배면 신호 분석을 위하여, 실내에서 관로 배면에 대한 지면의 여러 가지 상태를 재현하여 GPR의 신호 특성을 파악하기 위한 실험장치를 개발하고, 각종 GPR의 신호 반사 특성을 파악하여 기준 자료를 수집한다.

이렇게 수집된 기초 자료를 이용하여 실제 현장과 동일한 조건의 관로 모형에서 GPR 탐사를 실시하여 이를 증명하고자 한다.

## 2. 지중탐사레이더 특성

### 2.1 GPR 탐사 원리

GPR탐사 기법은 전자파 반사 특성을 이용한 탐사기술이다. 즉, GPR탐사는 탄성파탐사와 유사성이 있으며, GPR탐사의 이론적인 배경은 탄성파 탐사법을 이용한다.

주파수 MHz~GHz대역의 전자파를 특정 매질 속으로 방사시키면, 주매질(Host Material)과 다른 전자기적 성질을 가진 물체(반사체)의 표면에서 전자파가 반사하여 되돌아오게 된다. 이러한 반사파를 수신하여 반사에너지의 크기와 반사파의 전파시간을 기록하면, 반사가 발생한 곳의 위치 및 심도 등 매질 내부의 정보를 얻을 수 있다. 이것이 가장 기초적인 GPR탐사의 원리이다. 반사면의 심도는 전자파가 매질 내를 전파하는 속도를 이용하여 계산해 낸다.(Daniel, 1990)

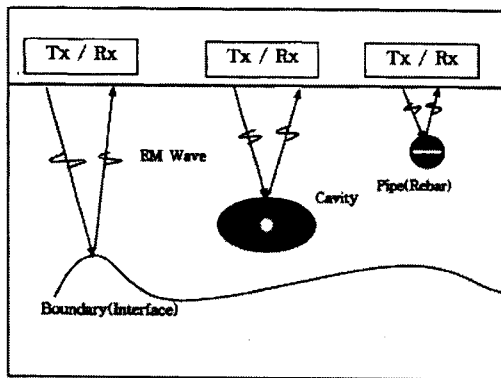


그림 1 GPR에 의한 전파 탐사 원리

### 2.2 Stack amount

Stack amount 매개변수는 높아질 경우 축적이 커지면서 스캔속도가 느려지고 스캔의 정밀도가 높아진다.

이 매개변수의 증가는 약한 신호의 탐지를 가능하게 하고, 스캐닝의 실제 깊이를 연장시키며 이미지의 질을 향상시킨다. 하지만 이때 레코드 처리 중 권장 안테나 횡단 속도는 느려진다.

탐사지속시간은 반사파가 기록되는 제한시간이므로 탐사 대상매질내의 전자파속도와 관련하여 탐사심도를 결정한다. 탐사심도는 목적 심도의 30% 가량을 더해서 결정하는 것이 탐사에 소요되는 시간과 처리해야 할 취득 자료의 양을 감안할 때 적절하다고 할 수 있다.

$$\text{탐사지속시간} = 1.3 \times \frac{2 \times \text{목적심도}}{\text{전자파속도}}$$

### 2.3 Trace amount

탐사 자료를 취득하는 각 지점에서의 기록을 트레이스라 하며 탐사시 송신기와 수신기로 이루어진 송·수신부의 이동간격과 같다. 측정간격을 길게 하면 탐사시간이 단축되고 취득 자료의 양도 적어지므로 효율적이지만 공간알리아싱(Spatial aliasing)을 일으키게 되어 매질내부의 구조를 왜곡하여 기록하거나 측정간격에 비해 상대적으로 크기가 작은 반사체는 기록되지 않는다. 반대로 측정간격이 너무 짧으면 획득한 자료의 양이 증가하여 탐사시간과 처리에 소요되는 시간이 급증하므로 탐사목적과 환경을 고려하여 결정해야 한다.(신민호 등, 1999)

Trace amount는 스캔되어지는 라인의 개수로서 최대 10000까지 설정가능하다

이 파라미터 값은 스캐닝의 단계로 프로파일의 길이를 나누고 값을 다시 결과의 반까지 되도록 반복한다. 계산된 값이 700이하면 1000으로 설정한다.

1000m 연장의 프로파일을 0.1m의 스캐닝 단계로 저장을 하려면 프로파일의 선의 개수는  $1000 / 0.1 = 10000$ 이다. 그리고 프로파일의 선의 개수의 파라미터 값은 1000의 최대 반 정도가 더 많은 15000이 된다.

예를들어 계산된 선의 개수 값이 300이면 1000으로 설정해야한다.

프로파일 스캐닝 중이라면 예약된 선의 개수 파라미터의 값이 완료됨에 따라 레코딩이 자동종료 되며 스캐닝을 재개하면 다른 파일에 저장된다. 처리중에, 몇몇의 파일이 하나의 프로파일로 조합될수 있다.

### 2.4 유전률

전자파를 반사시키는 반사체는 매질속에 존재하는 전자기적 이상체(지중매설관, 콘크리트속 철근, 지층의 경계면 등)이며, 이상체의 표면에서 반사하는 전자파가 수신안테나로 도달하는 시간과 매질내의 전자파 속도를 이용하면 이상체까지 심도를 알 수 있다.(설순지,1995)

GPR탐사에서 획득되는 자료는 나노초( $10^{-9}$  sec)의 시간단위로 기록된다. 따라서 시간단위로 기록된 탐사자료는 거리단위로 환산해야 하는데, 이 때 필요한 것이 매질 내 전자파의 속도이다.

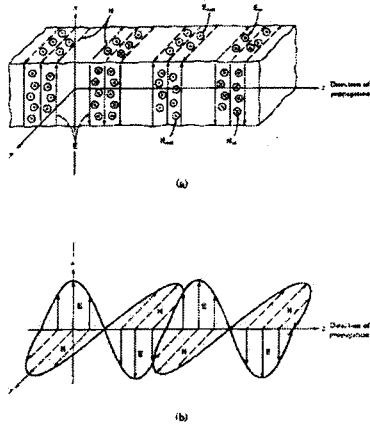


그림 2 전자파의 거동 형상

그림 2 (a)는 Sine곡선으로 변하는 평면파의 전기장(E)과 자기장(H)의 3-D 거동 형상을 나타낸 것이며 (b)는 전기장과 자기장의 전파방향을 나타낸 것이다.

반사면(체)까지의 심도를 계산하는 방법은 다음과 같다. 반사체에서 반사하여 되돌아오는 반사파의 도달시간은 실제 반사체까지 전자파가 왕복한 시간이므로 반사체까지의 심도는 다음 식에 의해 계산된다.

$$d(\text{깊이}) = \frac{t}{2} \times V$$

V는 매질내 전자파 속도이다. 전자파의 속도는 매질을 투과할 때 매질의 전자기적 특성에 따라 달라지게 된다.

GPR탐사에 관련되는 매질 고유의 전자기적 특성은 전기전도도( $\sigma$ ), 유전율( $\epsilon$ ), 투자율( $\mu$ )이며, 실제 GPR탐사에서는 물질 고유의 유전율( $\epsilon$ )과 투자율( $\mu$ ) 대신 이들 유전율 및 투자율과 진공중의 유전율 및 투자율과의 비(比)인 무차원의 상대유전율과 상대투자율을 취급한다.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m (진공의 투자율)}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m (진공의 유전율)}$$

이상적인 유전체에서 전자파 속도(V)는 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

강자성체를 제외한 일반적인 매질의 상대투자율( $\mu_r$ )은 거의 1에 가깝지만, 상대유전율( $\epsilon_r$ )은 1~80까지 매우 다양하기 때문에 <식 2.11>에서 매질의 유전율이 속도에 가장 영향을 끼친다. 따라서 전파속도 V는 최종적으로 다음과

같이 쓸 수 있다.(Lytle & Lager, 1976)

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

따라서 탐사매질이 내부에 자성물질의 분포가 적고 분산의 성질이 크지 않으면, 매질내를 전파하는 전자파 속도는 매질의 유전율의 변화와 관련이 있음을 알 수 있다. 따라서 매질의 상대유전율은 반사체의 위치를 알아내고자 하는 GPR탐사의 목적을 달성하기 위한 가장 중요한 물성이라 할 수 있다. 표 1은 몇 가지 매질의 상대유전율이다.

표 1 매질의 상대유전율과 전자파 속도

광물의 종류	유전 상수 값	
	자연 습도	물 포화 상태
물	81	
얼음	3	
공기	1	
콘크리트	6-12	-
다구경 모래	4-9	16-25
모래	6-16	16-25
모래섞인 점토	9-25	16-30
점토	16-30	20-36
역암(모래)	4-9	10-20
역암(점토)	6-16	10-25
석회암	4-7	
점토 석회	20-30	
점토 편암	7-10	

### 3. 개발장비의 현장실험

#### 3.1 사용 GPR장비

본 탐사에 사용된 비파괴 장비는 러시아의 LOGIS사의 OKO\_2Georadar로써 고주파 안테나인 AB1700안테나를 사용하였다. 사용한 지하 레이더 장비는 조작이 간편하고 광케이블을 사용하여 탐사의 성과를 한층 더 높인 장비이다. 장비의 제원 및 안테나는 표 2와 그림 3과 같다.

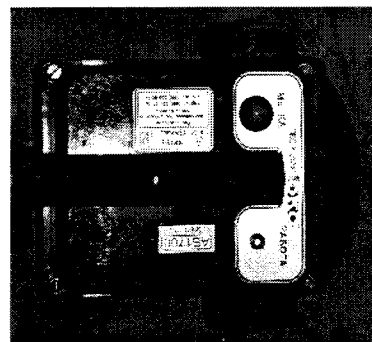


그림 3 실험에 사용된 GPR 장비

표 2 지중레이다의 안테나 구성 및 제원

종류	주파수	심도	해상력	무게	전원
AB-1700	1700 MHz	0.3-1.0m	0.03m	3.75/(1.1)kg	5.0W

### 3.2 적용성 실험

관로 배면의 상태를 파악하기 위한 GPR의 반응성 테스트를 위하여 현장의 조건을 재현한 테스트 필드를 제작하였다.

이 테스트 필드는 4개의 격자로 구성되어 있어 여러 조건의 토질 샘플을 담아서 테스트 할 수 있도록 설계되었으며, 토양 습윤 조건을 다양하게 재현하기 위하여 수조의 형태로 제작하였다. 그 세부적인 사양은 다음 그림 4와 5에 나타나 있다.

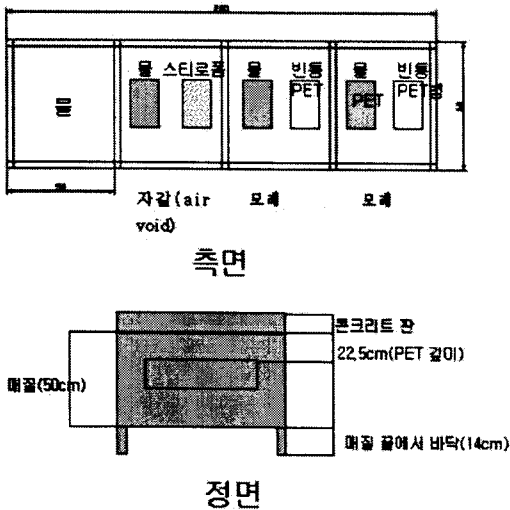


그림 4 실내 실험용 테스트 필드

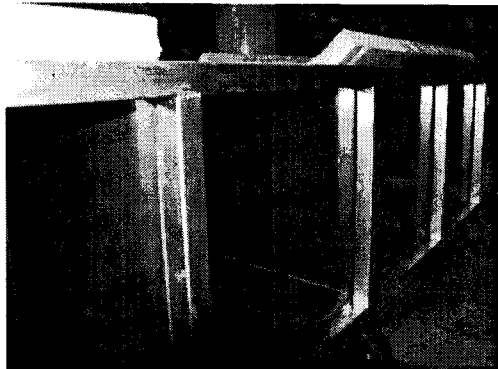


그림 5 GPR 적용성 실험을 위한 모형

각 토양의 종류와 상태에 따른 반사 특성을 분석하고 고유의 반사 반응을 분석하기 위하여 GPR의 각 매개변수를 다음과 같이 조절하여 탐사를 시행하였다.

각각의 매질에 대하여 다음의 표 3과 같은 매개변수를

변화시켜가며 GPR 테스트를 실행하였다. 실험과에 대한 사진은 그림 6에 나타나 있다.

표 3 회차별 매개변수 설정값

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Trace	1만	1만	1만	1천	5천	1만	1만	1만	1만3천
Stack	4	4	4	4	4	4	16	32	4
Epsilon	10	25	45	45	45	81	45	45	81



그림 6 탐사 전경

앞에서 기술한 각종 토양내 공극 조건은 물이 있는 공극과 공기가 있는 공극으로 나눌 수가 있다. 또한 관로의 배면이 가벼운 이물질에 의하여 공극에 가까운 상태로 되어 있는 상태일 수도 있다. 이러한 조건을 재현하기 위하여 그림7에서와 같은 플라스틱 통, 종이 상자, 스티로폼 등의 인공적인 공극을 형성하여 실험을 실시하였다.

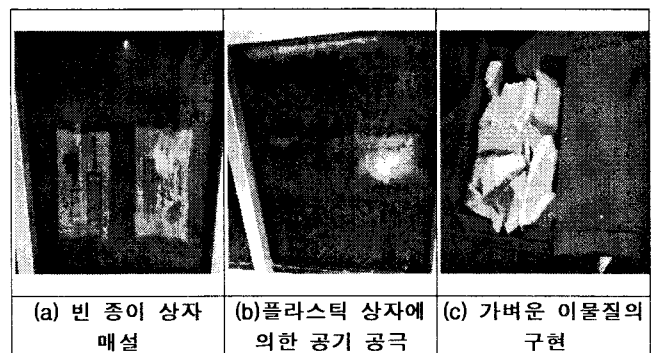


그림 7 다양한 공극 상태의 구현

### 3.2 GPR 탐사자료의 취득

3.1절에서 기술된 바와 같이 다양한 조건을 구현한 실내 실험용 테스트 필드에 대한 GPR 반응을 조사하여 분석을 실시하였다.

다음의 그림 8, 그림 9, 그림 10은 여러 가지 상태로 구현된 현장 조건을 가상하여 취득된 GPR 실험의 결과에 대

한 반응 샘플을 나타내고 있다.

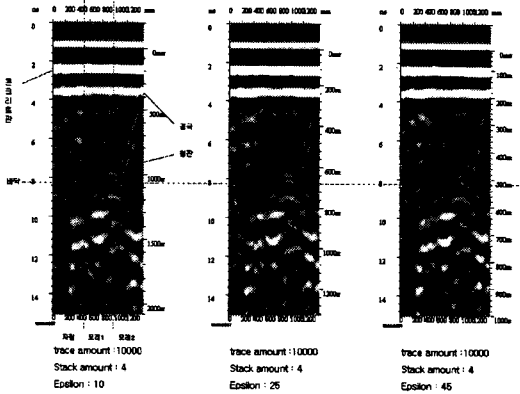


그림 8 유전율 변경에 따른 토양 반응 특성

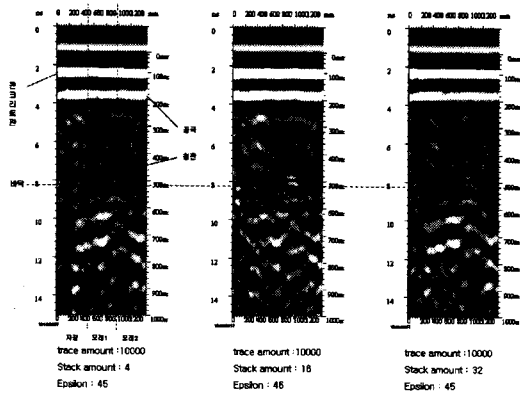


그림 9 stack 변경에 따른 토양 반응 특성

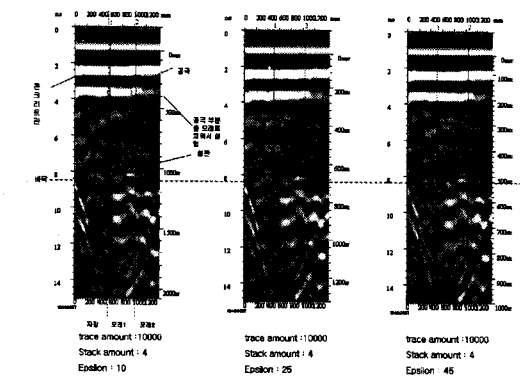


그림 10 trace 변경에 따른 토양 반응 특성

## 4. 결과분석 및 현장 적용

### 4.1 토양 종별 특성

그림 8, 그림 9, 그림 10에서 나타난 바와 같이 자갈, 균질의 모래, 불균질한 모래 등에서 확인한 반사 특성의 차이를 나타내었다.

이는 매개변수의 차이와는 독립된 반응의 특성을 나타내

었다.

또한 자갈의 특성에 있어서 공기 공극과 물 공극으로 구분하여 실험한 결과, 그림 11과 같은 영상을 얻을 수 있었다.

그림 8과 11을 비교하면 공기 공극에 비하여 물 공극에서 파장이 급격하게 변화하여 공기공극과 물 공극을 비교 판단할 수 있음을 나타내고 있다.

진행속도 있어서는 stack 값이 높을수록 자세한 결과를 얻을 수 있으나 진행속도가 급격히 저하되는 것으로 나타났다.

그러나 모래와 자갈의 본체 부분은 차이가 미세하여 판별에 따른 추가적인 조사가 필요하였다.

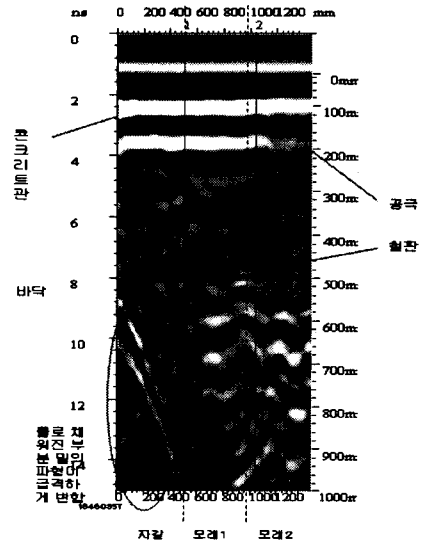


그림 11 물 공극에 의한 반응의 변화

### 4.2 공극 매질에 따른 특성

토양의 특성에 따른 변화 더불어 관로 배면의 특성을 파악하는데 있어서 중요한 것은 공극 자체 매질의 특성이며, 이에 대한 파장의 특성은 다음의 그림 13과 같다.

그림 12에서 얻은 결과는 물과 경량 물질을 보호하기 위하여 플라스틱 재질의 보관함을 사용하였는데, 이에 의한 효과를 최소화하기 위하여 종이 상자를 이용하여 종이 공극과 경량재질의 공극 상태를 재현하였다. 이에 대한 파장의 결과는 다음의 그림 13에 나타나 있다.

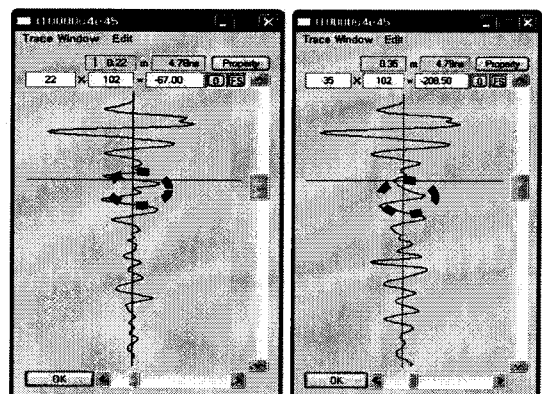


그림 12 매질의 종류에 따른 파장 차이

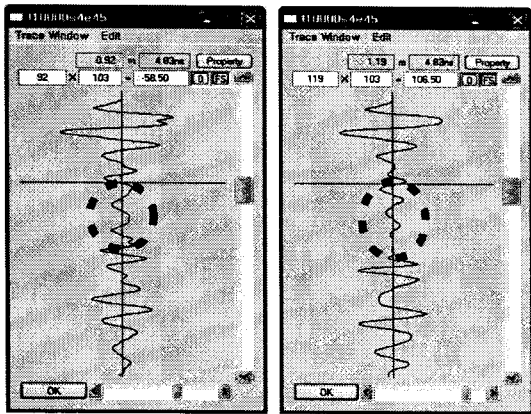


그림 13 종이 상자 내 매질의 파장 변화

그림 14에 나타난 바와 같이 종이 상자내의 공기와 경량 매질의 변화에 있어서도 내부를 구성하는 매질의 차이에 의하여 반사 파장의 특성은 변화를 나타내었다.

그림 12와 13에 나타난 바와 같이 관로 배면의 상태를 재현한 실내의 실험에 있어서 배면 구성 매질의 차이에 따라 GPR에 의한 반응의 특성도 변화함을 알 수 있었다.

하지만 정확한 위치를 파악하기 위해서는 반사 신호의 정밀한 처리가 필요하며, 정상적인 상태는 각종 파장의 매개변수에 따라서 상이한 결과를 보이는 것으로 나타났으며, 이에 대한 보완은 현장 테스트와 추가적인 영상 자료의 해석을 통하여 보완되어야 할 것으로 사료된다.

### 4.3 현장 적용 결과

실험실 환경이 아닌 실제 지반에서의 배면 특성 파악을 위하여 실험실 결과를 이용한 야외 실험을 실시하여 GPR 특성을 파악하였다.

그림 14와 같이 실제 관의 배면 부분에 여러 가지 공극을 인공적으로 재현하고 탐사를 실시하였다.



그림 14 야외 실험을 위한 관로 배면 상태 재현

그림 14와 같이 설치된 관로에 대한 GPR 탐사를 실시한 결과는 다음 그림 15와 같다. 자갈, 공극, 큰 자갈, 나무뿌리에 의한 공극 등을 모두 추출할 수 있었다.

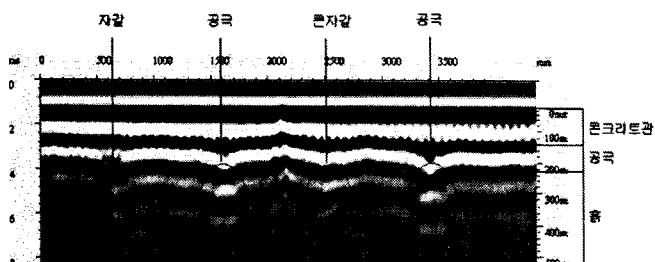


그림 15 GPR 탐사 결과 분석 영상

그림 15에 나타난 탐사 영상을 헬버트 변환을 이용하여 처리하고, 구분을 위한 색을 부여한 결과는 다음의 그림 16에 나타나 있다.

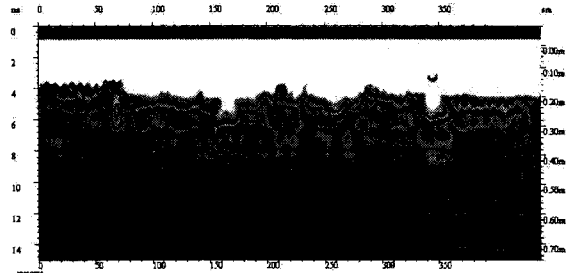


그림 16 헬버트 변환 후 탐사 영상

### 5. 결론

본 연구는 지하 관로의 배면의 지반 상태를 탐사하고 평가하기 위하여 GPR 탐사 기법을 적용하기 위한 기초 연구를 진행하고 실제 상태에서 탐사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. GPR 탐사 기법을 적용하여 관로의 배면 상태를 조사한 결과 토양의 상황과 매질의 특성에 대한 차이를 탐사할 수 있었으며, 이에 대한 파장의 변화를 추적하여 특성을 파악하였다.
2. 반사 특성 파악을 위한 실내 실험 결과를 이용하여 실제 대상물에 대한 탐사 특성을 파악한 결과, 공기 공극 및 자갈 등에 의한 매질의 변화 등을 추적할 수 있었다.
3. 관로 재질의 특성이나 철근의 배근에 의한 영향 등을 고려하고, 토양의 특성을 고려한 탐색 기법에 대한 추가적인 분석 요소 등에 대한 추가적인 실험 등이 도입되어야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. Daniel, Jeffrey, Fundamentals of Ground Penetrating Radar, 1990.
2. Reynold, J. M., An Introduction to applied and Enviromental Geophysics, John Wiely and Son, 1997.
3. 박영삼, 전도성과 비전도성 지하매질관의 GPR 탐사, 조선대학교 대학원 석사학위 논문, 2002.
4. 실순지, 지오레이다의 송수신 파형 및 모형반응 계산에 관한 연구, 서울대학교 공학 석사 학위논문, 1995
5. 신민호, 이선복, 남옥현, 오영철, 지하레이더를 이용한 지하매질물 모형탐사 연구, 금호건설 연구소, 1999.
6. 이종형 외, 상하수도공학, 2006.
7. 한국건설기술연구원, 지하매질관로 관측 자료 처리 및 관리시스템 개발, 위탁연구보고서, 2006.