

GPR 유전률 상수 보정과 영상자료 패턴분석을 통한 비금속 관로 탐사 정확도 확보 방안

Study to Improve the Accuracy of Non-Metallic Pipeline Exploration using GPR Permittivity Constant Correction and Image Data Pattern Analysis

김태훈¹⁾ · 신한섭²⁾ · 김원대³⁾

Kim, Tae Hoon · Shin, Han Sup · Kim, Wonda

Abstract

GPR (Ground Penetrating Radar), developed as a technology for geotechnical investigations such as sinkhole exploration, was used limitedly as a method to resolve undetectable lines in underground facility exploration. To improve the accuracy of underground facility data, the government made it possible to explore underground facilities using a non-metallic pipeline probe from July 2022. However, GPR has a problem in that the exploration rate is lowered in the soil with high moisture content, such as soft soil, such as clay layer, and there is a lot of variation in long-term accuracy. In this study, as a way to improve the accuracy of exploration considering the characteristics of GPR and the environment of underground facilities, we propose a GPR exploration method for underground facilities using permittivity constant correction and pattern analysis of GPR image data. Through this study, the accuracy of underground facility exploration and high reproducibility were derived as a result of field verification applying GPR frequency band and heterogeneous GPR.

Keywords : non-metallic pipeline, GPR, permittivity constant, image data pattern analysis

초 록

싱크홀 탐사 등 지반조사를 위한 기술로 개발된 GPR (Ground Penetrating Radar)은 지하시설물 탐사에서 불탐구간을 해소하기 위한 방법으로 한정되어 사용하고 있었다. 정부는 지하시설물 데이터의 정확도 개선을 위하여 2022년 7월부터 비금속 관로 탐사기를 이용한 지하시설물 탐사가 가능하도록 하였다. 그러나 GPR은 점토층 등과 같이 연약지반 같은 수분함량이 높은 지반에서 탐사율도 낮아지고, 정확도에 많은 변동이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 GPR의 특성과 지하시설물의 환경을 고려한 탐사정확도 향상방안으로 유전률 상수 보정과 GPR 영상자료의 패턴분석을 이용한 지하시설물 GPR탐사 방안을 제시하고자 한다. 본 연구를 통하여 GPR 주파수 대역과 이기종 GPR을 적용한 현장검증 결과 지하시설물 탐사의 정확도 향상 및 높은 재현성 결과를 도출하였다.

핵심어 : 비금속 관로 탐사기, GPR, 유전률 상수, 영상자료 패턴분석

Received 2022. 03. 14, Revised 2022. 04. 12, Accepted 2022. 04. 19

1) Member, Spatial Information Quality Management Servicee (E-mail: maverick08@naver.com)

2) Member, ALL for Land Inc. (E-mail: hsshin1905@all4land.com)

3) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College (E-mail: kimwd@inhac.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지하시설물은 국민 생활편의에 필수적인 기반 시설물로 안전사고 발생 시 이를 이용하는 시민의 불편함뿐만 아니라 막대한 인명과 재산상의 피해를 입을 수 있다. 이러한 지하시설물에 대한 관심과 정책의 변화는 인명피해 또는 재산피해로 이어진 각종 사건사고를 통해 이루어졌다. 특히 1994년 아현동 가스폭발사고, 1995년 대구지하철공사장 가스폭발사고 등 연이은 대형 지하공간에 대한 사고는 큰 인명피해를 발생했다. 당시 정부는 이러한 대형 재난사고로 이어질 수 있는 지하시설물 안전사고에 대한 예방을 위하여 '제1차 국가지리정보체계 구축사업'을 통해 상수, 하수 등 7대 지하시설물 도면에 대한 전산화 사업을 추진하였다(SIQMS, 2021). 지하시설물 전산화 사업은 1998년 정보화 근로사업의 일환으로 지하시설물도 전산화를 시작하였으며(MOCT, 2002), 2014년까지 시(市)급 지자체의 상수도 지하 시설물 전산화를 완료하였고, 현재 군(郡)단위 지자체로 확대하여 구축하고 있다(MOLIT, 2013).

공공측량작업규정에서 지하시설물 측량은 신규 관로 공사 또는 관로 교체 시 직접 측량하는 부분과 2018년 이전에 매설된 지하시설물을 탐사하는 부분으로 구분하고 있다. 그러나 지하시설물 탐사의 경우 금속 관로 탐사기만 측량기기 성능검사에 포함되어 있어 비금속 관로에 대한 탐사와 검증은 이루어지고 있지 않은 실정이다(Kim *et al.*, 2021). 이에 따라 지하시설물 탐사 정보의 정확성이 낮아지고, 특히 지자체 상수도 관로 중 비금속 관로 비율이 금속 관로에 비해 급속하게 증가하고 있어 비금속 관로 탐사방법에 대한 도입의 필요성이 증가하고 있다. 또한, 2014년 이후 전국적으로 싱크홀 사고가 증가하면서 지자체를 중심으로 지반침하 예방을 위한 GPR 탐사기술을 이용한 공동조사 사업이 확산되고 있다. 이에 GPR 탐사에 대한 관심과 기술력의 증가는 지하시설물 불탐지역을 대상으로 탐사기술에 대한 검증이 다년간 활발하게 이루어졌다. 정부에서는 2022년 7월부터 공간정보 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령 및 시행규칙을 개정하여 지하시설물의 정확도를 개선하기 위하여 비금속 관로 탐사기의 성능검사와 정확도 기준 등을 마련하였다. 하지만 GPR을 이용한 지하시설물 탐사에서는 지반의 종류나 함수율, 공극의 상태 등 탐사 대상의 특성에 의해 대상물을 인식하거나, 위치결정 정확도에 많은 변화를 유발한다(Olhoef, 1984). 하지만 현재 세부적인 작업방법 및 규정에 대한 기준이 마련되어 있지 않고, 공공측량 성과심사의 경우 금속 관로 탐사기와 다르게 굴착을 통한 검사방법밖에 없는 상황이다. 또한, 현재 지하시설물 탐사와 유사한 공동조사의 경우 작업절차 및 방법 등이 마련되어 있으나, 유사한 환경을 탐사하는 지하시설물

을 대상으로 하는 작업절차와 세부적인 방법 등은 마련되어 있지 않아 앞으로 비금속 관로 탐사기에 대한 일관성 있는 성과와 이를 검증할 수 있는 방법이 마련되어야 할 것이다.

따라서 연구에서는 대표적인 비금속 관로 탐사기인 GPR을 지하시설물 탐사에 적용하기 위하여 정확도 결정에 중요한 요소인 유전률 상수 산출에 대한 일반적인 방법론을 제시하여 지하시설물 탐사 및 검증에 쉽고 정확하게 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 또한, GPR 탐사결과인 영상자료의 패턴분석 방법을 통해 공동조사 등 일반적인 GPR 탐사결과 분석과정과 다르게 주관적인 분석이 아닌 객관적으로 관로를 결정할 수 있는 방안을 마련하여 실험검증을 통해 성과의 재현성을 검증하고자 한다.

2. GPR의 특징

2.1 GPR 특성

GPR은 Fig. 1과 같이 레이더 펄스인 전자기파(EM wave: ElectroMagnetic wave)를 송신안테나로부터 지하로 방사한 후 지반 내로 전파된 레이더탐사 전자기적 물성이 다른 매질의 경계면(포장층, 지하시설물, 공동 등)에서 반사된다. 이를 수신안테나에서 받게 되며, 수신파의 형상이나 전달시간 등을 분석하여 내부 매질의 종류와 상태를 결정하게 된다(Rhee *et al.*, 2020).

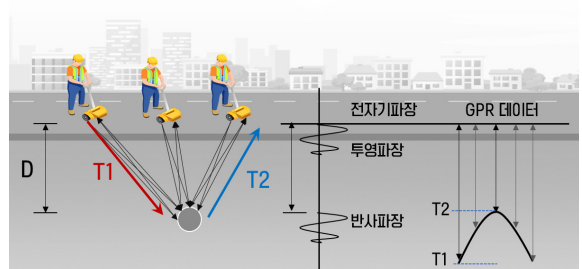


Fig. 1. GPR principle

GPR은 모든 지반환경에 탐사가 가능한 것이 아니라 토질의 상태에 따라 탐사의 여부가 결정되며, 일반적인 토질에서는 유전체 및 자기이완, 거리, 전기 전도도 등 여러 이유로 전파 손실에 의한 감쇠현상이 나타난다(Olhoef, 1984). 점토 함량이 높은 토사, 습지, 폐기물 처리장과 같이 낮은 비저항을 갖는 지반이나 비가 온 뒤에 비저항이 낮아진 도로에서는 심한 감쇠현상이 발생한다. 이로 인해 탐사가 가능한 심도가 얕아지며 수신된 전자기파의 세기가 약하므로 상대적으로 주변 전자기파 잡음의 영향이 커져 해석 정밀도 또한 저하되는

경향이 있다(KSEG, 2002). 이러한 GPR의 특성을 이해하지 않으면 지하시설물을 대상으로 적용하는데 한계가 있을 것이다.

지반의 성분은 지역마다 이질적이며, 특히 탐사가 어려운 점토층과 같은 지역의 분포를 정확하게 구분하기는 매우 어렵다. 따라서 GPR을 이용하여 탐사를 실시할 때 탐사기에서 보낸 전자파의 속도가 일정하게 지반을 투과하여 매질물에 반사되어 돌아오는 시간은 지반의 성질마다 다르게 나타난다. 지금까지 많은 연구에서 이러한 특성을 분석하고 탐사 정확도를 확보하기 위하여 연구를 하고 있으나 지반의 성질을 일반화 하는데 한계가 존재한다. 따라서 GPR 탐사에서는 상대 유전률 상수값 보정을 통해 지반의 특성을 반영하여 성과를 개선할 수 있다. 하지만 모든 지반을 일반화하는데 한계가 있으며, 지상에서 지하의 상태를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 유전률 상수를 산정하기 위해서는 맨홀, 공기변, 제수변 등 지상연결 시설물을 통해 관로의 매설깊이를 측정하고, 이를 GPR에 입력한 후 유전률 상수를 산출할 수 있다. 이렇게 계산된 수치는 그 지역의 유전률 상수값으로 결정하여 탐사를 진행해야 한다.

2.2 GPR 운영방식

연구에서는 지하시설물 탐사에 GPR을 도입하기 위하여 장비의 운영방식, 적절한 주파수 대역, 센서방식 등에 대하여 지금까지의 연구사례 등을 조사하여 분석하였다. GPR 탐사를 위한 장비 운영방식은 사람이 직접 운영하는 핸드형방식과 차량에 연결하여 운영 가능한 차량형으로 구분할 수 있다. 하지만 차량에 연결 가능한 GPR 대부분이 차량이 진입하기 어려운 공간에도 탐사하기 위하여 핸드형 방식으로 운영이 가능하기 때문에 도로뿐만 아니라 인도 등 좁은 지역에 탐사가 필요한 지하시설물을 대상으로 한 탐사는 핸드형 기준으로 작업방법을 마련하였다. 또한, GPR은 단일 주파수 대역인 Impulse방식과 여러 주파수 대역을 동시에 취득 가능한 Step-Frequency방식 두 가지로 구분할 수 있다. GPR은 Table 1.과 같이 주파수 대역에 따라 탐사가능 심도가 다르고, 이에 따라 탐사 목적과 방법에 따라 센서방식을 결정하고 있다(Baek, J.E, et al, 2014). Impulse 방식의 경우 단일 주파수이기 때문에 센서방식보다 목표탐사 심도에 따라 주파수 대역을 결정하고 적용하는 반면, Step-Frequency 방식의 경우 일반적인 목표 심도가 있는 것이 아니라 일정 영역이상 범위에 다양한 요소를 탐사하기에 적합한 방식으로 불특정한 위치에 존재하는 지반층 및 공동조사 분야에서 많이 적용하고 있는 방식이다.

Table 1. GPR antenna frequency band for each exploration purpose

거치 방법	주파수	최대탐사 가능 깊이	탐사 적용분야
접촉식	2600 MHz	0.4 m	콘크리트 구조물 조사
	1600 MHz	0.5 m	콘크리트 구조물 조사
	900 MHz	1.0 m	콘크리트 및 공동탐사
	400 MHz	4.0 m	지하시설물 및 공동탐사
	270 MHz	6.0 m	지하시설물 및 지반조사
	200 MHz	9.0 m	지반조사
	100 MHz	15.0 m	지반 및 광산조사
비접촉식	2000 MHz	0.7 m	포장두께 조사
	1000 MHz	0.9 m	도로 및 교면포장 조사

3. 지하시설물 GPR 탐사방법

3.1 작업절차

연구에서는 GPR의 특성과 지하시설물 환경을 고려한 탐사 방안을 제시하고자 한다. GPR 탐사는 영상자료를 통해 관로의 형상(Hyperbola)이 나타나면 영상자료를 통해 관로의 매설깊이와 위치를 결정하게 된다. 공동탐사와 지반조사를 위한 GPR의 경우 불특정한 위치에 존재하는 정보를 취득하기 위하여 모든 지역에 대해 탐사를 진행해야 하나 지하시설물의 경우 연속적으로 연결된 관로의 위치를 패턴 추적탐사로 진행하기 때문에 이에 적합한 탐사방법을 마련하였다. Fig. 2는 연구에서 마련한 지하시설물 GPR 탐사 절차이며, 유전률 상수 산출, 탐사 및 보완탐사, 영상자료분석 순으로 구성하였다. 유전률 상수의 경우 관로의 매설심도의 정확도를 결정해주는 보정계수로써 탐사의 시작과 끝뿐만 아니라 검증 가능한 구간에서 지속적으로 산출 결과에 대한 검증을 실시해야 한다. 또한, GPR은 현장에서 영상자료를 통해 관로의 존재 또는 위치파악이 가능하므로 관로의 형상을 파악하기 어려운 위치에서 보완탐사를 통해 위치를 조정하여 정확한 관로의 형상을 찾을 수 있을 때까지 탐사를 수행하도록 하였다.

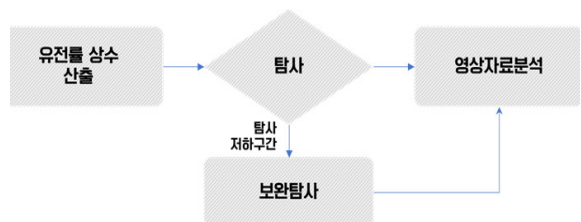


Fig. 2. GPR Exploration Procedures

3.2 유전률 상수 산출 및 탐사방법

GPR에서 유전률 상수는 지반에 위치한 지하매설물의 정확한 위치를 찾도록 보정해주는 수치이다. 반대로 지하시설물의 매설깊이를 알고 있는 경우 정확한 유전률 상수를 역으로 산출할 수 있다. 따라서 연구에서 유전률 상수의 결정은 맨홀과 같은 지상시설물을 통해서 산출하도록 하였으며 특히, 탐사대상 지하시설물을 대상으로 산출하도록 하였다. 이는 탐사대상 주변에 존재하는 하수 등과 같은 시설물에서 유전률 상수를 산출하여도 작업규정에서 요구하는 정확도 기준($\pm 30\text{cm}$)에 포함되는 성과를 얻을 수 있으나, 연구에서 마련한 영상자료의 패턴분석 시 동일관로에 대한 영상자료에서의 Hyperbola형상을 확인할 수 없어 패턴분석에 한계가 존재한다. 이는 유전률 상수 산출 시 탐사된 Hyperbola형상이 앞으로 탐사 단계에서 취득하는 영상자료의 Hyperbola형상과 비교하여 동일관로임을 확인해야 하기 때문이다. 따라서 연구에서는 Fig 3과 같이 유전률 상수 산출 영상자료를 기반으로 동일관로의 형상을 따라 탐사가 가능한 탐사방안을 마련하였다.

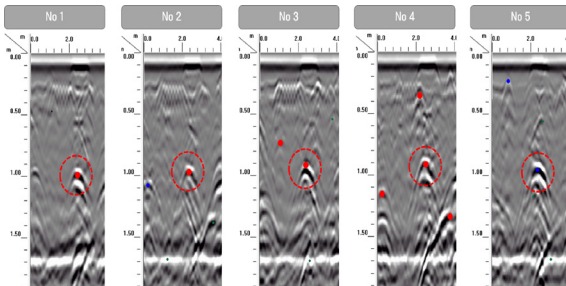


Fig. 3. Image data acquisition result according to standard exploration method

Fig. 3에서 1번 탐사지점은 유전률 상수 산출 시 취득한 영상자료이며, 여기서 Hyperbola형상을 기준으로 2번부터 5번 탐사지점까지 일정 간격이상을 기준으로 탐사한 결과이다. 유전률 상수를 산출하여 정확하게 취득한 정보를 기반으로 탐사 시 관로를 추적하기 때문에, 아무런 정보없이 관로의 형상을 찾기 위한 경험과 기술력을 요구하지 않았다. 연구에서는 Hyperbola 형상의 변화가 생길 경우 보완탐사를 실시하도록 하였다. 보완탐사는 Fig. 4와 같이 표준탐사를 진행하다가 관로의 형상이 변화하거나 사라진 경우 변화가 시작한 지점과 사라진 지점을 찾도록 하였다. 이는 관로가 탐사되지 않는 지점을 찾는 불탐구간의 시작점을 찾거나 관로의 변화가 시작된 지점을 찾기 위한 방법이다.

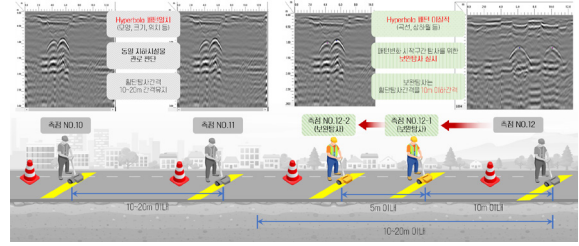


Fig. 4. Complementary exploration method

3.3 위치측량 및 영상자료 분석방법

지하시설물 금속 관로 탐사의 경우 현장에서 관로의 평면위치와 매설깊이를 결정하고 있다. 하지만 GPR의 경우 현장에서 탐사 즉시 정확한 관로의 위치를 결정하는데 한계가 있기 때문에 취득한 영상자료를 분석하여 정확한 매설깊이와 위치를 결정해야 한다. 따라서 연구에서는 Fig. 5와 같이 탐사 시 횡단탐사 지점의 시작점과 끝점을 대상으로 절대위치 측량을 실시하고, 영상자료 분석단계에서 탐사의 시작점 또는 끝점에서 거리를 산정하여 관로의 평면위치를 결정하도록 하였다.



Fig. 5. Exploration and location surveying plan for cross-section exploration

타분야의 경우 현장에서 탐사도 중요하지만 취득한 영상자료에 대한 분석단계를 가장 중요한 공정으로 전문성과 많은 경험을 요구한다. 연구에서 마련한 지하시설물 GPR 탐사의 경우 공동탐사와 지반조사와 다르게 지상연계시설을 통해 정확한 위치와 정보를 이용하여 외부 환경요소에 따라 변화하는 Hyperbola 형태를 추적하기 위하여 탐사방법을 마련하고 있다. 따라서 지하시설물 GPR 탐사의 영상자료분석 단계는 지반조사와 같이 정밀한 자료분석이 아니라 Hyperbola 형태의 패턴을 따라 탐사가 잘 진행되었는지 다른 관로로 탐사가 진행되었는지 등을 검토한다. 또한 보완탐사 등이 필요한 구간을 점검하는 등 탐사의 정확도를 판독하는 단계와 영상자료의 패턴분석이 완료되면 최종적으로 Fig. 6과 같이 관로의 평면위치와 매설깊이를 결정하는 단계로 구분할 수 있다.

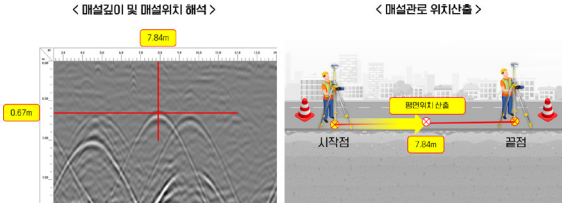


Fig. 6. Buried location analysis and calculation method

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험개요

연구에서는 경기도 시흥시 대야동의 450mm 비금속 하수 관로 구간을 대상으로 연구의 실험 및 분석을 실시하였다. 실험에서는 연구에서 제시한 탐사 대상관로의 유전률 상수 산출방법과 타시설물 관로로 유전률 상수를 산출했을 때의 유전률 상수의 결과와 그 결과로 탐사를 진행했을 때 다른 맨홀에서 매설깊이의 정확도를 비교하였다. 또한, GPR 영상자료 패턴분석 방법으로 지하시설물 탐사의 적용성을 분석하고, 제조사가 다른 기기종 GPR을 이용하여 탐사결과의 재현성 검증을 통해 향후 성과검증의 가능성을 분석하고자 한다. 실험을 위하여 Table 2와 같이 주파수 대역별 그리고 제조사 및 센서방식의 GPR을 투입하였다.

Table 2. GPR equipment used

제조사	GSSI		IDS
	350MHz	200MHz	250/700MHz
센서방식	Impulse	Impulse	듀얼 Impulse
탐사방식	핸디형	핸디형	핸디형

4.2 유전률 상수 산출비교

연구에서는 유전률 상수 산출과 검증을 위하여 탐사대상 관로의 시설물과 주변의 타 시설물을 기준으로 유전률 상수를 각각 산출하고, 비교를 위해 Impulse 350MHz와 듀얼 Impulse 250/700MHz GPR을 이용하여 분석을 실시하였다. Fig. 7과 같이 유전률 상수 산출은 지상연결 시설물을 개방하고, 측정할 수치를 입력하여 산출하고 바로 관로 매설깊이가 측정가능한 반대편 관로에 대하여 유전률 상수 산출값에 대한 검증을 실시하였다. 유전률 상수 산출과 검증을 동일한 지상연결 시설물에 적용하는 이유는 매설깊이 측정오류 또는 유전률 상수의 입력오류 등 인위적인 오차를 신속하게 제거하기 위함이다.



Fig. 7. Calculation and verification method of permittivity constant

다른 주파수 대역의 탐사장비를 통해 탐사대상 관로와 타 시설 관로에서 유전률 상수를 각각 산출하여 관로의 매설깊이와 비교하였다. Table 3과 같이 주파수 대역마다 같은 지점에서 유전률 상수는 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 유전률 상수가 탐사환경에 따라 변화하는 변수이며, 이러한 변화는 탐사 당시 GPR의 정확도를 보정해주는 계수로 판단할 수 있다. 따라서 지하시설물 GPR 탐사를 위해서는 유전률 상수를 산출하고 지속적으로 검증하여 탐사의 정확도를 확인하고, 날짜 또는 관로의 크기나 재질이 바뀔 경우 반드시 유전률 상수를 재산출하여 탐사를 진행해야 할 것이다.

Table 3. Comparison of permittivity constant calculation results to according to pipelines

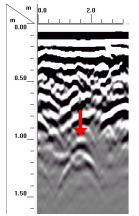
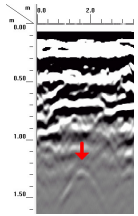
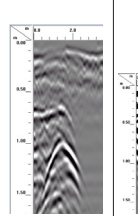
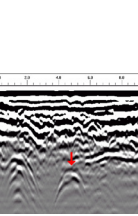
주파수	200MHz		350MHz		250-700MHz	
	탐사 일시	2022. 02.04	2022. 02.03	2022. 02.15	2022. 02.15	2022. 02.15
산출 관로	탐사대상 관로	탐사대상 관로	탐사대상 관로	주변 관로	탐사대상 관로	주변 관로
측정한 매설 깊이	1.10m	1.10m	1.10m	1.00m	1.10m	1.00m
산출 유전률 상수	11.3	12.0	12.6	12.0	9.18	9.32

4.3 GPR 영상자료 패턴분석

연구에서는 탐사대상 관로에서 유전률 상수를 산출하고 GPR 영상자료를 이용하여 관로의 형상을 표현하는 Hyperbola 형태를 확인하면서 추적탐사를 진행해야 탐사의 정확도를 확보할 수 있는 방안을 제시하였다. Table 4는 유전률 상수 산출 시 동일 관로 또는 주변의 관로에서 산출한 결과를 비교한 결과로 연구에서 제시한 동일 관로 유전률 상수 산출의 필요성을 검증하였다. 동일 관로의 경우 유전률 상수를 산출하고 검증한 영상자료의 Hyperbola 형상이 다음 탐사 지점에서 유사한 관로의 형상을 바로 찾을 수 있어 동일 관로임을 확인할 수 있다. 반대로 주변의 존재하는 타 시설물 관

로에서 유전률 상수를 산출할 경우 관로의 크기와 재질이 다르기 때문에 Table 4와 같이 Hyperbola 형상이 다르게 표현되었다. 도심지의 경우 복합관로가 존재하는 지역에서 탐사대상 관로를 다른 시설물로 오해할 수 있어 잘못된 성과를 취득할 수 있다. 따라서 탐사대상 관로에서 유전률 상수를 산출하고 이를 기준으로 탐사를 진행할 경우 정확한 관로의 형상을 파악함으로써 탐사의 정확도를 확보할 수 있다.

Table 4. Comparison of permittivity constant calculation image data result

탐사대상 동일 관로에서 유전률 상수 산출		주변 타 시설물 관로에서 유전률 상수 산출	
산출시 탐사 영상자료	탐사 영상자료	산출시 탐사 영상자료	탐사 영상자료
			

지하시설물 탐사는 다른 분야의 GPR 탐사와 다르게 연속되는 시설물을 대상으로 탐사를 진행하므로 관로 재질이나 크기가 변화하거나, 시설물을 보호하는 시설이 존재하거나, 위치가 급변하지 않는 이상 유사한 Hyperbola 형상을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다. 이에 연구에서는 산출한 유전률 상수를 통해 탐사를 진행하였으며, 탐사간격은 실험분석을 위하여 5m 간격으로 진행하였다. 관로 형상의 변화가 생기면 탐사반대 방향 2m간격으로 이동하여 보완탐사를 실시하였다.

Fig. 8은 유전률 상수 산출결과를 기준으로 5m간격으로 탐사를 수행한 결과이다. No.1과 2지점에서 확인된 영상자료를 기준으로 관로의 형상을 추적하여 대상관로를 탐사할 수 있었다.

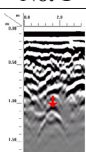
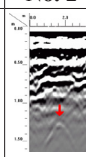
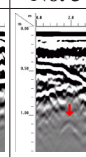
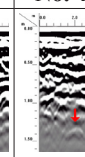
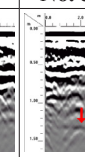
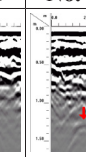
No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
					
유전률상수 산출	유전률상수 검증	탐사 지점	탐사 지점	탐사 지점	탐사 지점

Fig. 8. Calculation of 350MHz GPR permittivity constant and standard survey result

Fig. 9는 5m 간격으로 탐사를 수행하는 중 No.16 지점에서 관로의 상단을 정확하게 판단할 수 없어 보완탐사를 실시하였다. 보완탐사는 탐사 반대방향으로 간격을 줄여가며 탐사를 실시하여 관로의 변화가 시작되는 지점(No. 16-2)을 탐사하였다. 해당 구간의 경우 약 4m 구간에 대하여 시설물이 존재한 것으로 확인되며, 이 구간이 지난 이후 일정한 간격으로 탐사가 가능하였다.

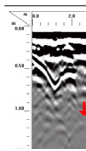
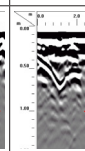
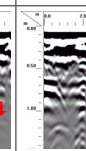
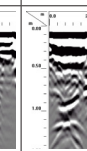
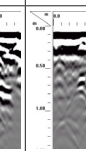
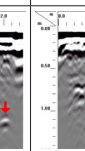
No. 15	No. 16-2	No. 16-1	No. 16	No. 17	No. 18
					
탐사 지점	보완탐사 지점	보완탐사 지점	관로 확인 불가	보완탐사 지점	탐사 지점

Fig. 9. 350MHz GPR 표준탐사 및 보완탐사 결과

Fig. 10은 250/700MHz 듀얼 Impulse방식의 GPR로 저주파와 고주파를 동시에 취득할 수 있는 장점이 있어 저심도 및 고심도에 위치한 관로에 상관없이 탐사가 가능한 GPR을 이용하여 실험하였다. 듀얼 방식의 GPR의 성과 또한 단일 주파수 대역의 탐사장비와 같이 동일 관로를 패턴추적 탐사방법으로 쉽고 정확하게 탐지할 수 있었으며, 관로의 형상을 판단할 때 유전률 상수를 산출하고, 검증할 때 탐사한 영상자료를 기반으로 정확한 관로를 선택하여 탐사를 진행할 수 있었다.

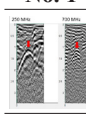
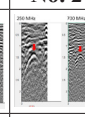
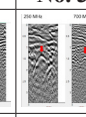
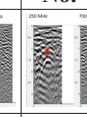
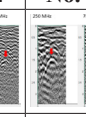
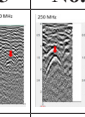
No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
					
유전률 상수산출	유전률 상수검증	탐사 지점	탐사 지점	탐사 지점	탐사 지점

Fig. 10. 250/700MHz GPR permittivity constant calculation and survey result

4.4 결과분석

연구에서는 비금속 관로를 대상으로 연구에서 제시한 유전률 상수 산출계수를 통한 GPR 영상자료의 정확도를 개선하고, 패턴추적 탐사방법을 통해 데이터를 취득하여 그 결과를 확인하였다. 비교방법은 정확한 유전률 상수 보정계수를 산정하기 위하여 탐사대상 관로와 탐사 대상 관로 주변에 타

시설물을 기준으로 각각 유전률 상수를 산출하여 수치를 비교하고, 절대 정확도 기준으로 관로의 매설깊이 오차를 비교하였다. 그 결과 Table 5와 같으며, 동일 관로를 기준으로 유전률 상수를 산출하여 탐사하였을 때 주변 타 관로를 산출한 유전률 상수값이 다르게 나타났으며, 수치의 차이는 크지 않으나 매설깊이 정확도는 동일 관로를 대상으로 유전률 상수를 산출했을 때 더 정확한 성과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Table 5. Comparison of permittivity constant calculation results according to pipelines

구분	350MHz GPR		250/700MHz GPR	
	탐사대상 관로 유전률 상수	주변 타 시설 관로 유전률 상수	탐사대상 관로 유전률 상수	주변 타 시설 관로 유전률 상수
산출유전률 상수	12.6	12.0	9.18	9.32
매설깊이 탐사결과	1.14m	0.90m	1.14m	1.12m
매설깊이 오차	0.04m	0.10m	0.04m	0.12m

또한, 동일한 지점에서 관로의 매설깊이(1.1m)를 측정하여 유전률 상수를 산출한 결과 주파수 대역별로 수치가 다르게 나타났다. 이는 주파수에 따라 전파의 속도가 다르기 때문이며, 동일 주파수의 GPR도 탐사 당시의 습도, 온도 등 환경에 따라 유전률 상수는 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

연구에서는 유전률 상수 산출과 함께 취득한 영상자료를 기준으로 패턴추적방식의 탐사를 진행하였다. 또한 동일 주파수 대역의 GPR을 이용하여 열흘 간격으로 탐사를 진행하고, 그 결과를 비교하였다. 결과비교는 상대정확도 기준으로 공공측량 작업규정 제186조(오차의 허용범위)에 적합한 결과가 나타나고, 영상자료를 통해 탐사의 재현성이 확보되는지 확인하였다.

우선 시흥시 비금속 관로 구간에 350MHz GPR을 이용하여 2월 4일과 2월 15일 동일 구간에 대하여 탐사를 진행하였으며, 동일지점에 대하여 상대적 위치차이를 비교한 결과는 Table 6과 같다. 최대 평면위치 차이는 16.7cm이며, 최대 심도 차이는 5cm로 오차 허용범위 안에 포함되었다. 동일한 장비로 동일지점을 탐사한 경우 심도의 차이는 크지 않으나 일부 평면위치에서 차이가 크게 나타났으며, 대부분 지역은 10cm 이내로 동일 주파수 대역의 GPR을 이용하여 탐사하고, 그 결과를 검증할 경우 재현성에 문제가 없었다.

Table 6. Siheung Sewage Pipeline Section 350MHz Same GPR Comparison of Results by Exploration Date (m)

측점	2022년 2월 4일(A)			2022년 2월 15일(B)			차이(A-B)			
	X(N)	Y(E)	심도	X(N)	Y(E)	심도	ΔX	ΔY	ΔD	ΔH
3	539043.264	182018.574	1.26	539043.300	182018.609	1.24	-0.036	-0.035	0.050	0.02
4	539038.562	182023.938	1.08	539038.442	182023.822	1.11	0.120	0.116	0.167	-0.03
5	539033.721	182028.688	1.12	539033.757	182028.722	1.17	-0.036	-0.034	0.050	-0.05
6	539028.750	182034.517	1.13	539028.714	182034.483	1.16	0.036	0.034	0.050	-0.03
7	539024.288	182039.101	1.13	539024.190	182039.011	1.11	0.098	0.09	0.133	0.02
8	539020.327	182043.278	1.06	539020.385	182043.333	1.07	-0.058	-0.055	0.080	-0.01
9	539013.501	182050.602	1.04	539013.549	182050.649	1.02	-0.048	-0.047	0.067	0.02
10	539011.007	182053.441	0.90	539011.103	182053.533	0.89	-0.096	-0.092	0.133	0.01
11	538997.207	182042.057	1.02	538997.173	182042.094	1.02	0.034	-0.037	0.050	0.00
12	538992.501	182037.983	1.06	538992.534	182037.946	1.04	-0.033	0.037	0.049	0.02
13	538987.804	182033.699	1.09	538987.848	182033.650	1.07	-0.044	0.049	0.066	0.02
14	538981.914	182028.447	1.06	538981.880	182028.483	1.05	0.034	-0.036	0.050	0.01
15	538973.719	182020.941	1.26	538973.603	182021.061	1.21	0.116	-0.12	0.167	0.05
16	538969.711	182017.358	1.27	538969.700	182017.369	1.23	0.011	-0.011	0.016	0.04
18	538965.102	182013.317	1.18	538965.125	182013.292	1.19	-0.023	0.025	0.034	-0.01
18-1	538966.567	182014.274	1.14	538966.544	182014.298	1.14	0.023	-0.024	0.033	0.00
18-2	538967.188	182015.044	1.12	538967.193	182015.039	1.13	-0.005	0.005	0.007	-0.01
19	538961.769	182010.106	1.11	538961.770	182010.107	1.08	-0.001	-0.001	0.001	0.03
20	538956.917	182005.787	0.99	538956.917	182005.787	0.98	0.000	0.000	0.000	0.01

연구에서는 동일 제조사의 다른 주파수 대역의 장비를 통해 탐사결과를 비교하였으며. 그 결과는 Table 7과 같다. 350MHz와 200MHz GPR 탐사 결과, 최대 심도차이는 6cm로 나타났으며, 주파수 대역과 무관하게 GPR 탐사가 가능할 경우 관로의 심도 차이는 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다. 다만 해상도의 차이가 커 200MHz와 같이 저주파의 GPR 영상자료의 경우 SW의 해상도를 조절하는 기능을 이용하여 관로의 최상단을 결정하였다. 영상자료의 해상도가 낮은 경우 Hyperbola 형상이 희미하게 나타나며 SW의 기능을 통해 해상도 등 영상을 조절하여 관로의 최상단을 찾을 수 있다.

저주파 대역의 200MHz와 350MHz Impulse GPR은 최대 평면위치 차이는 19.3cm로 오차의 허용범위에 포함되었으나 350MHz 동일 주파수 대역에 대비하여 더 큰 차이가 발생함

을 알 수 있었다. 이는 해상도의 차이에서 발생하는 문제로 SW를 통해 영상을 조절하여 관로의 최상단을 판단할 때 평면 위치를 선택하는 범위가 넓어져 영상을 분석하는 사람의 오차가 발생할 수 있는 단점이 있다. 따라서 GPR 탐사를 진행할 때 관로의 매설깊이에 따른 적절한 주파수 대역의 GPR을 이용하여 탐사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

연구에서는 GSSI사의 350MHz Impulse GPR과 250/700MHz 듀얼 Impulse GPR에 대하여 동일 탐사지점에 대해 탐사를 진행하였다. 그 결과는 Table 8과 같으며, 최대 평면위치 차이는 19.7cm며, 최대 심도차이는 4.6cm로 나타났다. 전체적으로 일부 구간을 제외하고 10cm 이내로 큰 차이를 보이지 않았으며, 주파수 대역이 다르더라도 탐사결과는 공공 측량작업규정의 오차범위를 벗어나지 않아 GPR 탐사기술이 지하시설물 탐사에 적용할 수 있음을 확인하였다.

Table 7. Comparison of search results for each frequency band in the Siheung sewer pipe section (m)

측점	350MHz (A)			200MHz (B)			차이(A-B)			
	X(N)	Y(E)	심도	X(N)	Y(E)	심도	ΔX	ΔY	ΔD	ΔH
3	539043.264	182018.574	1.26	539043.367	182018.673	1.23	-0.103	-0.099	0.143	0.03
4	539038.562	182023.938	1.08	539038.445	182023.824	1.03	0.117	0.114	0.163	0.05
5	539033.721	182028.688	1.12	539033.783	182028.748	1.11	-0.062	-0.06	0.086	0.01
6	539028.75	182034.517	1.13	539028.631	182034.405	1.1	0.119	0.112	0.163	0.03
7	539024.288	182039.101	1.13	539024.229	182039.047	1.11	0.059	0.054	0.08	0.02
8	539020.327	182043.278	1.06	539020.257	182043.21	1.04	0.07	0.068	0.098	0.02
9	539013.501	182050.602	1.04	539013.363	182050.467	0.99	0.138	0.135	0.193	0.05
10	539011.007	182053.441	0.9	539010.985	182053.42	0.85	0.022	0.021	0.03	0.05
11	538997.207	182042.057	1.02	538997.292	182041.962	1.03	-0.085	0.095	0.127	-0.01
12	538992.501	182037.983	1.06	538992.621	182037.846	1.04	-0.12	0.137	0.182	0.02
13	538987.804	182033.699	1.09	538987.92	182033.571	1.09	-0.116	0.128	0.173	0
14	538981.914	182028.447	1.06	538982.033	182028.32	1.03	-0.119	0.127	0.174	0.03
15	538973.719	182020.941	1.26	538973.782	182020.876	1.23	-0.063	0.065	0.091	0.03
16	538969.711	182017.358	1.27	538969.801	182017.267	1.3	-0.09	0.091	0.128	-0.03
18	538965.102	182013.317	1.18	538965.235	182013.172	1.22	-0.133	0.145	0.197	-0.04
18-1	538966.567	182014.274	1.14	538966.615	182014.224	1.19	-0.048	0.05	0.069	-0.05
18-2	538967.188	182015.044	1.12	538967.319	182014.92	1.18	-0.131	0.124	0.18	-0.06
19	538961.776	182010.099	1.11	538961.79	182010.085	1.12	-0.014	0.014	0.02	-0.01
20	538956.93	182005.772	0.99	538957.038	182005.653	1	-0.108	0.119	0.161	-0.01

Table 8. Comparison of results of heterogeneous GPR exploration in Siheung sewer pipe section (m)

측점	350MHz (A)			250-700MHz (B)			차이(A-B)			
	X(N)	Y(E)	심도	X(N)	Y(E)	심도	ΔX	ΔY	ΔD	ΔH
3	539043.323	182018.632	1.24	539043.45	182018.754	1.199	-0.127	-0.122	0.176	0.041
4	539038.442	182023.822	1.11	539038.565	182023.94	1.152	-0.123	-0.118	0.17	-0.042
5	539033.781	182028.746	1.17	539033.913	182028.871	1.176	-0.132	-0.125	0.182	-0.006
6	539028.714	182034.483	1.16	539028.762	182034.528	1.145	-0.048	-0.045	0.066	0.015
7	539024.19	182039.011	1.11	539024.335	182039.144	1.06	-0.145	-0.133	0.197	0.05
8	539020.385	182043.333	1.07	539020.302	182043.253	1.036	0.083	0.08	0.115	0.034
9	539013.525	182050.626	1.02	539013.494	182050.595	1.021	0.031	0.031	0.044	-0.001
10	539011.103	182053.533	0.89	539010.962	182053.398	0.874	0.141	0.135	0.195	0.016
11	538997.173	182042.094	1.02	538997.218	182042.044	0.99	-0.045	0.05	0.067	0.03
12	538992.534	182037.946	1.04	538992.509	182037.974	1	0.025	-0.028	0.038	0.04
13	538987.848	182033.65	1.07	538987.775	182033.731	1.06	0.073	-0.081	0.109	0.01
14	538981.937	182028.422	1.05	538982.058	182028.293	1.044	-0.121	0.129	0.177	0.006
15	538973.603	182021.061	1.21	538973.656	182021.006	1.23	-0.053	0.055	0.076	-0.02
16	538969.7	182017.369	1.23	538969.716	182017.353	1.245	-0.016	0.016	0.023	-0.015
18	538965.169	182013.243	1.19	538965.262	182013.142	1.23	-0.093	0.101	0.137	-0.04
18-1	538966.544	182014.298	1.14	538966.504	182014.339	1.168	0.04	-0.041	0.057	-0.028
18-2	538967.168	182015.062	1.13	538967.072	182015.154	1.176	0.096	-0.092	0.133	-0.046
19	538961.77	182010.107	1.08	538961.784	182010.091	1.106	-0.014	0.016	0.021	-0.026
20	538956.944	182005.757	0.98	538956.996	182005.699	0.944	-0.052	0.058	0.078	0.036

5. 결론

본 연구에서는 대표적인 비금속 관로 탐사기인 GPR을 이용하여 탐사대상 관로를 통해 유전률 상수를 산출하여 매설깊이 정확도를 확보하고, 이때 취득한 영상자료를 기준으로 패턴 추적방식의 지하시설물 GPR 탐사방안을 제시하였다. 기술의 적용성과 탐사결과의 재현성 검증을 위하여 실험 및 결과분석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 탐사대상 관로의 지상연결 시설물을 통해 정확한 유전률 상수를 산출할 수 있었으며, 이 시설물에서 취득한 영상자료를 연속적으로 탐사될 관로의 위치와 형상을 파악하는 기준으로 활용할 수 있었다.

2. 탐사대상 관로와 주변의 타 관로의 지상연결 시설물에서 유전률 상수를 각각 산출한 결과 탐사대상 관로의 지상연결 시설물에서 유전률 상수를 산출할 경우 가장 정확한 결과물을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 유전률 상수를 산출하고 검증한 영상자료의 Hyperbola

형상을 기준으로 탐사성고를 검증할 수 있었다. 탐사지점을 이동할 때마다 Hyperbola 형상의 패턴을 분석하여 관로를 선택하였으며, Hyperbola 형상이 사라지거나 변형된 경우 탐사 반대 방향으로 이동하여 관로의 변화지점을 찾을 수 있었다. 이러한 탐사방법은 관로의 상하월, 급격한 방향변경 등으로 나타나는 현상으로 패턴분석과 보완탐사를 통해 관로의 정확한 위치를 확인할 수 있었다. 또한, 지하시설물 상단에 철판 또는 자갈층 등 불탐구간이 나타나는 지점을 정확하게 파악할 수 있었다.

4. 기존의 GPR 탐사에 대한 경험과 기술을 요구하는 다른 분야와 달리 연구에서 제시한 유전률 상수 산출을 통해 GPR 영상자료 패턴추적 탐사방법을 적용할 경우 지하시설물의 환경에 대한 이해와 구축 경험으로 비금속 관로 탐사기인 GPR의 적용 가능성을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 '공간정보품질관리원'의 연구지원에 의하여 진행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Baek, J.E, and Choi, J.S(2016), Under Road Exploration Technology using GPR, Korea Society of Road Technical Articles, Vol. 16, No. 3. pp.11-16.
- Kim, T.Y, Kim, B.I, Kim, J.W, Park, H.M, and Yoon, J.S(2016), Determining the Optimal Frequency of Ground Penetrating Radar for Detecting Voids in Pavements, International journal of highway engineering v.18 issue 2, pp.37-42
- Kim, W, Lee K.W., and Kim, T.H(2021), A Study on Quality Level of Underground Spatial Information for Accuracy Improvement, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Volume 39 Issue 3, pp 167-177.
- Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists (KSEG). (2002). Geophysical exploration guidelines for application in the civil engineering environment field, Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists (KSEG).
- Lee, S.H, and Jang, I.H,(2019), A Study on the Underground Condition of Road Using 3D-GPR Exploration, Journal of the Korean Geoenvironmental Society Volume 20 Issue 2, pp.49-58
- MOCT (2002), The 1st National GIS Project White Paper.
- MOLIT (2013), White Paper of Underground Facilities, Computerized Business.
- Olhoeft, G. R. (1984). "Applications and limitations of ground penetrating radar. Expanded Abstracts." 54th Annual International Meeting and Exposition of the Society of Exploration Geophysicists, Atlanta, GA, pp. 147-148.
- RHee. J.Y, Shim, J.W, Lee, S.R., and Lee, K.H(2020), A Consideration on the Electromagnetic Properties of Road Pavement Using Ground Penetrating Radar (GPR), Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Volume 40 Issue 3: pp. 285-294
- Spatial Information Quality Management Service(SIQMS) (2021), A study on upgrading the underground facility management system, Research Paper.