

지하시설물 측량에 있어서 GPR 탐사방법의 정확도 검증 기준에 관한 연구

A Study on the Accuracy Verification Criteria in Underground Facilities Surveying Using GPR

오이균*
OH, Yi-Kyun

Abstract

In order to manage the underground spatial information in systematic and effective way, production of an integration underground spatial information map is essential process. The government has been making efforts to expand manage the production of 3D underground spatial integrated map. In recent the GPR is actively used for exploring underground facilities in non-exploring area and sinkhole.

For achieving the research objectives presenting the accuracy of verification standard in underground spatial information surveying using GPR, the related legislation standard, the experiment results and international criteria have been analyzed. From this research it is found that the accuracy standard has been made by the related academic society(USA) and association(UK) in foreign counties. It is recommended that indicate the verification standard with number and percent together considering the characteristics of GPR.

Keyword: GPR, accuracy standard, 3D underground spatial integrated map, underground facilities

1. 서론

우리나라에 있어 지하시설물 매설의 역사는 구한말 시대부터 매설된 상·하수도관에서부터 시작하여 현재에 이르기 까지 도시를 중심으로 다양한 종류와 규격, 재질 별로 대량 매설되어 있다. 그러나 과거 지하시설물별 관리체계가 분리되어 있었고, 정확한 디지털 관리도면이 부재함에 따른 어려움을 겪고 있었는데, 서울시에서 1980년대부터 점차 지하시설물등록에 관심을 갖고 사업추진을 시작하였다. 본격적인 등

록 사업은 1994년 12월의 서울 아현동과 1995년 4월 대구지하철 공사장의 연이은 가스폭발로 인한 대참사로 대규모 인명 및 재산 손실을 초래한 것을 계기로 지하시설물등록 관리에 대한 관심을 갖게 되었다(이강원 2015). NGIS구축사업의 일환으로 1997년부터 지하시설물전산화등록사업을 본격적으로 착수한 이래 현재까지 각 지자체 별로 사업을 지속적으로 하고 있다. 2007년과 2009년 감사원 감사결과 지하시설물 통합 활용 부분과 데이터 갱신체계의 정비에 대한 사항이 문제점으로 대두된 이후 통합관리부분과 갱신시스

* 신한대학교 토지행정학과 교수 Department of Land Administration, Shinhan University(ykoh@shinhan.ac.kr)

템 등에 발전적 변화가 있었으나 아직도 불탐시설물(상수관로 기준 40%)이 상당량 존재하고 있다(김원대 2021). 2000년대 들어 지반침하로 인한 싱크홀이 서울시를 비롯한 전국에 분포하고 갑작스런 싱크홀 재난발생이 점차 증가 추세에 있는데, 싱크홀 발생 원인으로 노후 상하수도 파손 및 부설시공 등을 들고 있다.

정부에서는 일정규모 이상의 지하굴착 공사를 수반하는 사업에 대해서는 안전평가를 실시하는 지하안전 관리에 관한 특별법(법률제13749호, 2016.1.7.제정, 2018.1.1.시행)을 제정하고, 안전점검대상 지하시설물을 법률로 지정하여 관리하고 있다. 이에 따라 안전점검대상 시설물에 대하여 종전의 조사 완료일을 기준으로 매 5년마다 1회 이상 지표투과레이더 탐사를 통한 공동(空洞)조사를 하도록 실시시기와 조사방법을 규정하여 불탐지역 탐사와 더불어 GPR(Ground Penetration Radar)을 이용한 지하시설물 탐사는 더욱 증가할 것으로 예상된다.

본 연구와 관련된 선행 연구로는 박순표(1985)는 우리나라 최초로 시가지 지하시설물 측정등록과 관리에 관한 연구를 하였고, 오이균(1988)은 지하시설물 탐사에 최초로 레이더 방식을 이용한 지하시설물 측량에 관한 연구를 진행하여 평면 및 수직오차를 실제 비교하였으며, 이재기(1997)는 다양한 탐사기법과 지하시설물 정확도를 비교분석 하였다. 이용욱(2007)은 서울시 소재 6대 지하시설물의 위치정확도를 비교분석 하였고, 김정욱(2016)은 지하시설물 탐사에 차량 견인형 GPR의 탐사정확도를 확인실험을 하였으며, 송석진(2020)은 GPR의 탐사성과와 지하공간통합지도의 위치 정확도를 비교 분석하였다. 김원대(2021)은 최초로 지하공간정보 정확도의 품질 등급제도입을 위한 제도 및 규정 정비 필요성을 제시한 바 있다.

GPR탐사 방법을 이용한 위치오차에 관한 연구는 1980년대부터 현재에 이르기까지 분야 별로 다수 이루어진 편이고, GPR 테스트베드가 필요기관 별로 다수 설치되어 있으며, 최근에는 지하공간정보 품질등

급제에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 법규나 장비 성능기준 등 이외에는 GPR측량의 정확도 기준 검증에 관한 연구는 일부 한정된 편이다.

따라서 본 연구에서는 국내 법규 상 지하시설물의 용어 정의 등을 고찰하였으며, 1980년대부터 최근까지 연구 제시된 GPR정확도 실험성과 및 테스트 베드 시험 결과를 조사하여 문헌 분석하였고, 법규 상 지하시설물 측량 관련 허용오차 기준 등과 해외 GPR탐사 정확도 기준들을 조사하여 제시하였다. 이를 통하여 추후 사용 확대가 예상되는 GPR측량 방법에 있어 지하시설물 불탐구간 등의 정확도 향상에 기여하고자 한다.

2. 지하공간정보구축 연혁 및 현황

2.1. 지하시설물 정의

우리나라 지하시설물에 대한 법규상 정의는 도로법, 지하안전관리에 관한 특별법, 공공측량작업규정, 지하공간통합지도 제작 작업규정에서 정의한 내용이라 할 수 있다. 먼저 법령으로 규정한 주요 지하시설물을 설치하는 경우에 그 준공도면을 도로관리청에 제출하도록 규정되어 있는데, 이 경우 도로법 제62조 제2항 및 동법 시행령 제59조에서 정의한 지하시설물은 “가스공급시설, 송유관, 상수도 관로시설, 154,000볼트 이상의 송전시설, 외접관경이 3미터 이상인 전기통신관에 수용되는 전송·선로설비, 고압가스를 수송하는 배관, 유독물질을 수송하는 배관, 도시철도 중 지하에 설치한 시설, 열수송관”이다.

지하안전관리에 관한 특별법(지하안전법) 규정에는 지하정보와 지하시설물의 정의에서 내용상 차이가 있는데 먼저 지하정보로는 상·하수도, 통신, 전력, 수도, 난방 등 지하 시설물 6종, 지하철, 공동구, 지하보도·차도, 상가, 주차장 등 지하 구조물 6종, 시추, 관정(우물), 지질(地質) 등 지반 정보 3종이고, 지하안전법

제2조 4호 및 동법 시행령 제2조에서 규정한 지하시설물은 수도, 하수도, 전기설비, 전기통신설비, 가스공급시설, 집단에너지 공급시설, 공동구, 지하도로, 지하광장, 도로, 도시철도시설, 철도시설, 주차장, 건축물, 지하도 상가가 있다.

또한 공공측량 작업규정 제128조 1호에서 규정한 정의로 부속 시설물을 포함한 도로, 상수도, 하수관로, 가스관로, 통신관로, 전력관로, 송유관로, 난방 열관로와 그밖에 신호 및 가로등과 관련된 지하시설, 지하철 및 ITS관련 지하시설, 지하에 설치된 케이블TV 및 유선선로, 공동구, 지하도 및 지하상가 시설 등과 같이 공공의 이해관계가 있는 지하시설물이다.

마지막으로 지하공간통합지도 제작 작업규정 제2조에서 정의한 것으로 수도, 하수도, 전기설비, 전기통신설비, 가스공급시설, 집단에너지공급시설, 공동구, 지하도로, 지하광장, 도시철도시설, 철도시설, 지하주차장, 지하도상가 등 지하를 개발·이용하는 시설물이다.

이상의 법에서 규정한 지하시설물들의 정의는 대부분 중복되는 같은 내용이나 약간씩의 용어상 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

현재 4개의 법규상에서 규정한 지하시설물의 용어 정리를 현실에 맞게 통합하여 정리하는 것도 필요할 것이다.

미국에서는 지하시설물을 총괄하여 일반적으로 ‘Underground Utility / Asset’이라고 하여, 자산적 가치로 인정하고 있으며, 일부 영어권 국가에서는 ‘Underground Facility’ 라고도 하고 지하시설물의 위치조사(Locating) 및 도면화(Mapping)를 다루는 분야의 공학을 SUE(Subsurface Utility Engineering)이라 하고 있다(김원대 2021).

2.2. 지하시설물 측량 연혁

지하시설물의 최초 측량은 도시화가 일찍 이루어진 유럽에서 시작되었는데, 1875년 독일의 튜빙겐

(Tübingen)에서 시작되었으며, 1881년 폴란드 바르샤바(Warszwa), 1915년 스위스 올텐(Olten), 1917년 바젤(Basel), 1954년 베른(Bern)등으로 점차 확대되었다. 국내에서는 전자기 유도방식을 이용한 지하시설물 측량 장비로 특수여건을 지닌 서울의 3개 지역(창덕궁, 여의도, 종로)을 대상으로 1982년2월5일부터 7월16일 까지 약 6개월 동안 실험측량을 실시한 바 있다(박순표 1985).

최초의 GPR측량의 1987년부터 1989년까지 2년여 동안 서울의 8개 구(마포, 용산, 서대문, 동작, 종로, 중, 은평, 성북) 지역의 도로대장 작성 사업에 GPR탐사 장비를 일본으로부터 도입하여 탐사를 시작하였다(오이균 1988).

이후 지하시설물도 전산화사업이 제1차 NGIS구축 기본계획(1995~2000)의 10대 핵심 사업에 포함되어 1995년 지하시설물 관리 실태 조사를 시작으로 1997년 경기도 과천시에서 지하시설물 관리체계 시범사업을 실시하였으며, 서울과 부산을 포함한 국내 거점도시 19개시를 대상으로 2002년까지 지하시설물도 수치지도화 사업이 완료되었다. 2008년 지하시설물 통합관리 정보화전략계획(ISP) 수립 이후 지하시설물통합관리체계 구축 확산사업을 통하여 시(市)·군(郡)·자치도화 사업이 완료되었다. 2011년도에 완료하였고, 2012년부터는 활용시스템 개발 및 시(市)·군(郡) 지역으로의 확산을 통하여 지하시설물 구축 및 통합작업을 수행하고 있다. 그러나 불탐 지하시설물이 상당수 존재하고, 실제 도면과 불부합 상태의 지하시설물도 상당수 있는 편이다(이강원 2015).

따라서 현재 국토부에서는 전 국토의 3차원 공간정보 구축을 위한 162개 지자체에 ‘3D 지하공간통합지도’의 완성을 최단 시일 내에 완성을 목표로 추진하고 있다.

2.3. 지하시설물 관리기관

상·하수도 시설물의 경우 관리기관은, 서울, 부산 등 지방자치단체에서 직접관리하고 있으며, Table 1 과같이 일부 수자원공사에 위탁관리는 하는 경우도 있다. 가스의 경우는 한국가스공사의 LNG관로 관리와 소비자에게 직접 공급하는 도시가스 사업자가 각 지역별로 약 27개의 기업이 관리하고 있으며, 전력의 경우는 한국전력이 전기를 공급, 관리하고 통신은 한국통신, SKT, U+ 등 기업에서 관리하고 있다. 전력과 통신의 경우 지상의 공급선을 지중화를 추진하고 있는 추세이며, 신도시의 경우는 지중화공사를 대부분 시행하고 있다(이용욱 2007).

지하시설물 관리에 관한 법률로는 지하시설물을 설치하는 경우에는 그 준공도면을 해당 도로관리청에 제출하도록 도로법에 규정되어 있으며, 지하의 안전 개발과 이용 기반침하 방지를 위해 개발사업 등에 지하안전 평가를 받도록 지하안전관리에 관한 특별법이 제정되었고, 공공측량 작업규정에서 지하 시설물탐사 조사 및 탐사, 위치측량 방법 및 허용오차를 규정하여 지하시설물을 관리하고 있다. 국외의 기준에서 볼 때, 관련법령 및 지하시설물 탐사율, 기술 등은 최상위 권에 속하나 컨트롤 타워 역할 부재로 효율적인 서비스 제공 면에서는 개선의 여지가 많은 편이다.

3. GPR지하시설물측량 방법

우리나라에서는 공공측량 작업규정(제138조)에서 지하시설물의 조사와 탐사 대상 및 범위를 규정하고 있는데, 이들 대상물에 대한 조사방법(제139조)과 탐사방법(제140조)도 규정되어 있으며 지하 시설물의 평면위치는 관로 중심선을 기준으로 하며, 깊이는 지표면에서 시설물의 상단까지로 탐사하고, 여러 종류의 시설물을 동시에 탐사할 경우에는 종류별로 구분하여 탐사하고 금속관로, 비금속관로 및 케이블 등 시설물의 재질에 따라 적합한 시설물 탐사방법을 선택하도록 규정하고 있다.

시설물들을 조사하는 방법으로는 자력탐사 (Magnetic Survey), 탄성과 반사법 탐사(Seismic Reflection Survey)을 포함하여, 십 수 종류의 탐사방법이 있으나 실제 현장에서 기본적으로 자주 활용하는 탐사 방법으로는 Figure 1과 같이 금속관로 위치 탐사에 일반적으로 사용하는 전자유도에 의한 관로 위치 탐사방법인 MPL(Micro-computerized Pipe Locator)과 금속관로 및 비금속관로 모두 탐사가 가능한 GPR 탐사방법 등이 있다(이강원 2015).

Table 1. Underground facility management agency (Unit : Km)

Source : Audit Report on Safety Management of Underground Burials, 2018

	Underground facility					utility-pipe conduit
	Water works	Sewerage	Electric	Heating	Gas	
Total	197,535	137,193	19,918	4,143	53,291	150
Manager	local government Korea Water Resources Corporation	local government	Korean electric power corporation (KEPCO)	Korea District Heating Corp. privately operate(15)	Korea Gas Corporation, City gas business. (33)	local government (11), public enterprise(5) or Private sector(3) Consignment.

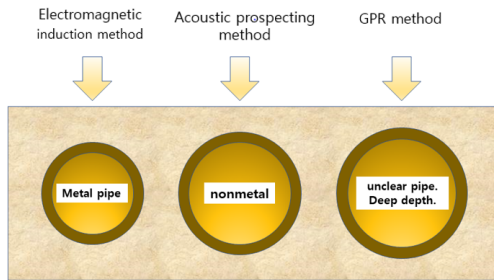


Figure 1. Method of detect underground facilities

3.1. 전자유도탐사 방법

전자유도탐사법(Electromagnetic induction method)은 Figure 2와 같이 전도체를 통해 약한 AC 전류를 통과시키고 그 분포로부터 매몰된 물체의 위치와 깊이를 탐색하여 발생하는 AC 자기장의 강도를 측정하는 방법이다. 전도체를 통해 전류를 통과하는 방법에 따라 여러 종류로 분류할 수 있으며, 적용 대상에 따라 가장 적합한 방법을 선택할 필요가 있고, AC 전류의 주파수는 수 Hz~100KHz의 영역에 있다. 자기장의 강도는 교류를 발생시키는 매몰된 물체로부터의 거리의 제곱에 반비례하며, 자기장의 방향은 모든 자속이 매몰된 물체 바로 위에 횡방향으로 설정된 코일을 관통하는 방향이다. 주변부에 탐사할 물체 이외의 도체가 없으면 자기장이 깨끗한 동심원이 되어 높은 정확도를 기대할 수 있지만, 주변부에 도체가 많으면 자기장의 분포가 왜곡되어 정확도가 저하된다. 또한 원칙적으로 전도체 이외의 다른 것에는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 직접법은 그림과 같이 송신기와 관로를 직접 접속해서 전자파를 관로에 실어보내는 방법으로 다른 한쪽 단자는 땅에 접지시킨다. 다른 관이 존재할 경우에도 찾고자 하는 관로의 위치 확인이나 추적이 가능하며 정확성이 높은 편이다. 간접법(유도법)은 송신기에서 전자파를 방출해서 관로에 전자유도하는 방법으로 위치를 알거나 추정되는 관로상에 수신기를 위치시켜 수신기로 탐사해 나가는 방법이나 다른 관

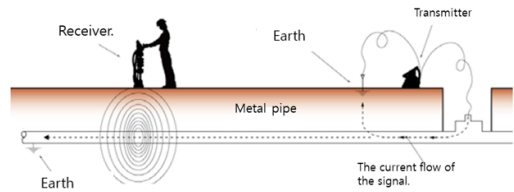


Figure 2. Electromagnetic induction method

Source : 에스파, 2013

로가 존재할 경우 각각의 관로에 전자유도가 되어 찾고자하는 관로의 위치확인이 어려워질 수 있다. 비전도체는 여러 종류의 탐침(probe)을 매설물 속에 투입시켜 송신되는 신호를 수신하여 위치를 결정하게 된다. 가격이 저렴하고 조작이 간편하여 지하 시설물 탐지기법 중 가장 보편적으로 이용되는 방법이다(에스파-탐사協會 2013).

3.2. GPR탐사 방법

3.2.1. GPR의 탐사원리

레이다를 이용한 측량방법은 1901년 O.J. Truett가 처음 고안 하였으며, 1929년에 Eve와 Keys가 중파대의 방송파가 지하에 투입하는 것을 지적하여 실제로 미국 켄터키의 Monmoth동굴에 실험하여 확인을 하였다. 레이다측량방식이 구체화된 것은 1960년대 후반경 부터라고 볼 수 있는데 미국의 오하이오 주립대학의 Electro Science Lab 등에서 연구를 하였다. 일본에서는 1973년부터 전파에 의한 지하시설물 측량의 연구를 시작하였으며, 1975년에는 동경전력과 전광제작소의 협력으로 base and base pulse radar를 이용한 지하시설물 측량 장비를 개발하였다. 국내에서도 1970년대 말부터 지하시설물 측량에 관심을 갖고 1987년도부터 일제 GPR장비를 이용한 탐사를 시작하였다(오이균 1988).

GPR은 Figure 3과 같이 지상에 둔 안테나에서 전자파를 발사하고 이를 땅속에 입사하면, 입사된 전자파

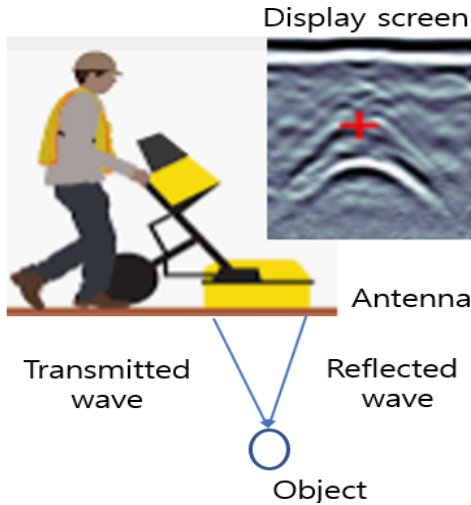


Figure 3. Principle & component of GPR

가 땅속을 전파해 가지만 전파 중에 전기적 특성이 다른 물체가 존재하면 그 계면에서 반사를 일으키고, 안테나의 이동과 동시에 얻어지는 반사신호를 연속적으로 겹쳐 화상화 함으로써 땅속의 단면 영상을 얻는다.

GPR은 기능에 따라 제어 디스플레이 장치와 시스템 컴퓨터가 있는 본체와 송수신이 가능한 안테나로 구성된다. 마이크로파 영역의 전자파 펄스는 지하로 방출되며 반사된 부분을 포착하여 물체의 위치를 결정한다. 마이크로파 영역에서 적절한 전자파 주파수를 선택하면 지면에서 약 수 미터까지 전자파 펄스를 입사해 그 반사파를 관측할 수 있다.

송신 안테나로부터 약 100 MHz~1000 MHz의 중심 주파수를 가지는 펄스가 지상에서 발생하며, 수신 안테나가 반사파 및 도착 시간을 관측한다. 지상으로 돌아오는 전자파는 감쇠하면서 지면을 통해 전파되지만, 전파 경로에 전기적 특성(주로 지면의 상대적 허용도)이 다른 경계면이 있으면 전자파 펄스 반사 및 전송이 발생한다. 매설물의 유무를 수신 안테나로 반사된 전자파와 펄스를 포착하여 검출하고, 전송에서 수신까지의 시간을 측정하며, 매립된 물체의 깊이를 전자파의 속도에 곱하여 결정한다.

지상에 있는 전자파의 속도 V 는 진공에서 빛의 속도 C 와 전파 토양의 상대적 비유전율을 이용하여 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon s}} \quad (1.1)$$

c : 광속, ϵs : 토양의 비유전율

지상의 전자파의 속도는 토양의 상대적 허용도에 의해 결정되며, 상대적 허용도가 높을수록 속도가 떨어진다. 또한 속도가 작을수록 진공에서 빛의 속도에서 더 빨리 접근한다.

전자파의 속도가 V 라고 가정하면, 매몰된 물체의 깊이 D 는 GPR에서 측정한 반사파의 시간 t 를 이용하여 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다.

$$D = \frac{Vt}{2} \quad (1.2)$$

다음 방정식은 방정식(1.1)과 (1.2)에서 도출된다.

$$D = \frac{Ct}{2\sqrt{\epsilon s}} \quad (1.3)$$

위의 방정식에 따르면, 전자파 펄스의 반환 시간 t 는 GPR의 검색에서 측정할 수 있기 때문에, 매몰된 물체의 깊이는 상대적 과도성을 결정함으로써 결정할 수 있다. 즉, 상대적 완전성의 정확한 판단은 매몰된 물체의 깊이를 정확하게 찾아내는 것과 직결된다.

전자파의 주파수는 전자파의 일부 영역으로 제한된다. 탐사에 사용되는 전자파의 빈도는 탐사의 해상도와 탐사의 깊이에 큰 영향을 미친다. Figure 4는 탐색 가능한 깊이와 분해능에 대한 빈도의 영향을 개략적으로 보여주며, 주파수가 높을수록 분해능이 높아져 더 작은 물체를 검색할 수 있다. 반면 빈도가 낮으면 높은 깊이에서 검색이 가능하지만 해상도가 낮아져 작은 물체를 검색할 수 없게 된다.

일반적으로 주파수를 늘리면 고해상도 달성될 것으

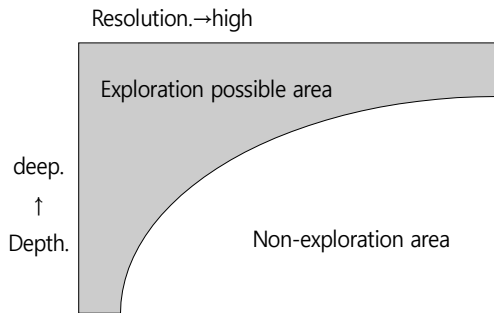


Figure 4. Exploratory depth and resolution.

로 예상되지만 일정 한도를 넘으면 수분 등의 영향이 강해지고 조사 자체가 어려워진다. 또한 주파수를 낮추면 더 높은 탐사 깊이가 실현되지만, 유효 출력이 증가하지 않는 한 일정한 한계를 넘어 깊이를 높이는 어렵다. GPR 탐사는 각안테나에서 송신되는 전자파 주파수로 탐사가능심도, 탐사가능관경, 탐사정도가 달라진다. 지하시설물을 탐사할 경우에는 탐사를 하고자 하는 심도범위, 탐사대상이 되는 물체의 크기를 검토하여 최적의 주파수를 선택할 필요가 있다.

인력으로 탐사할 수 있는 일반적으로 사용되는 GPR장비(중심주파수 300MHz, 총중량 약60Kg)의 탐사 가능 심도는 토질에 따라 다르지만 약 2.5m~3m 깊이 내에서 측정오차는 수평 10cm 이내, 수직 10% 이내가 기대된다(에스퍼-탐査協會 2013).

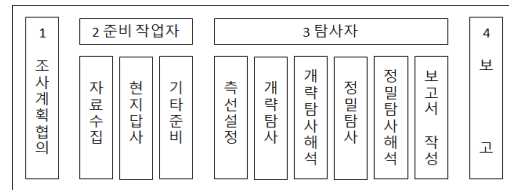


Figure 5. GPR 탐사의 기본공정

3.2.2. GPR 탐사공정

GPR탐사의 기본 공정은 대략 Figure 5와 같은데, 먼저 탐사준비 작업의 일환으로 먼저 대장자료 등을 입수하여 현장 내의 지하매설물 정보를 파악하고, 현장답사를 통하여 도로 현황과 측선의 설정(주사하는 측선을 결정하여 노상에 마킹)등을 결정한다. Figure 6과 같이 측선대로 현장에서 개략 탐사를 실시하고 Figure 7과 같은 탐사 이미지를 확인하여 대상물의 위치를 파악한다. 만약 1차 탐사한 부분에 판독이 어려운 지역이 나타 날 경우 메쉬 형태로 정밀탐사를 재차 실시한다. 탐사 작업을 완료 후 획득한 데이터 및 해석 결과를 보고서 형식으로 제출하게 된다.

4. GPR의 정확도 기준

GPR탐사방법은 지하정보를 영상으로 얻을 수 있어 전자유도방식 등 여타 탐사방식에 비하여 쉽고 편리한 방법으로 생각할 수 있으나, 토양 및 함수비 등 지

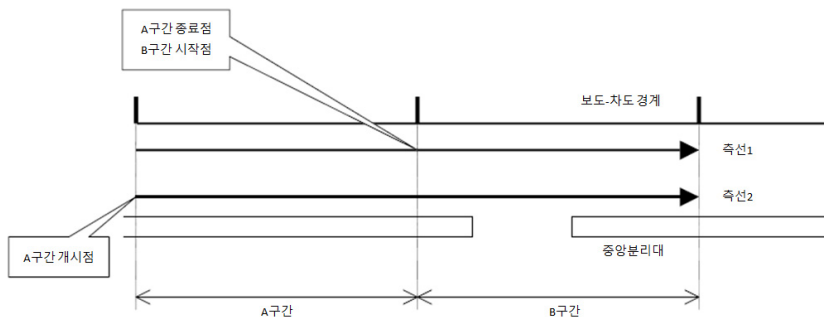


Figure 6. GPR 탐사작업

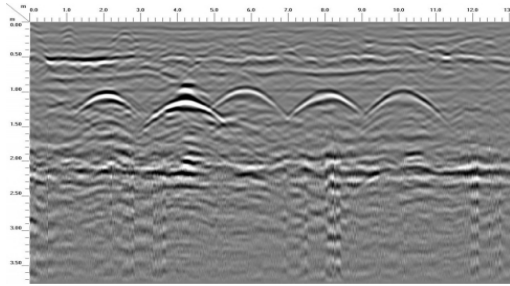


Figure 7. GPR image

중구성물질의 성격과 종류에 따라 Table 2와 같이 유전 상수가 달라짐에 따라 전자파 반사 및 감쇠 등 다양한 탐사 장에 요인을 내포하고 있어 탐사과정에 있어 숙련된 경험과 지식이 요구된다. 건조한 모래토양에서는 작동이 잘되지만 염분을 다량으로 포함한 토양의 경우는 탐사가 가장 어렵고, 함수비가 높은 점토질의 토양 환경에서도 탐사가 어려울 수 있다. 따라서 탐사할 때마다 일일이 실제 정확도 검증을 위해 매번 굴착을 할 수 없는 현실이기 때문에 해외에서는 주로 GPR탐사방법을 단독으로 사용하기보다는 기존 시설물 정보와 전자유도 방식 등을 병용하여 정확도를 높이고, 참조용으로 많이 사용하고 있다.

4.1. 국내 GPR 정확도 연구

지하시설물측량에 대한 정확도는 외국의 경우 법규정보다는 학회나 협회에서 마련한 기준들을 통용하고 있는데 반하여, 우리나라에서는 공공측량 작업규

Table 2. The relative permittivity of the main substance.

material	non permittivity
Air	1
Ice	3
asphalt	6~9
Sand. (Dry)	9
Sand (wet), soil.	10
A paved + soil	11~21
Unpaved, Field soil.	24~40
water	81

정 제6장 지하시설물 측량에서 지하시설물의 정의(제128조), 지하시설물 측량절차(제130조), 측량기기의 성능기준(제132조), 지하시설물의 조사·탐사 대상 및 범위(제138조), 지하시설물에 대한 탐사간격(20m) 및 시설물 탐사 오차의 허용범위(제140조) 등을 Table 3과 같이 법령에서 기준을 정하여

이 기준을 따르도록 하고 있으며, 확인 굴착의 경우에는 지상측량의 정확도를 준용하도록 하고 있다. 또한 지하공간통합지도 제작 규정(국토교통부고시 제2018-661호)에서 품질기준과 검사방법등을 상세히 명시하고 있다.

GPR탐사방법의 정확도 검증은 지중 구성 물질 및 지표표장 상태 등이 다양한 관계로 도입당시부터 현재까지 시행된 GPR정확도 연구들에서 제시한 탐사 정확도를 년도 별로확인해보면, 1987년 최초 실험결

Table 3. Performance standard of underground facility survey equipment.

Source : Public Survey Work Regulations(Article 132)

Equipment.		Performance	Range
Detector (underground facility)	Metal pipeline detector.	Horizontal. 20cm, Vertical 30cm	Based on a pipeline with $\varnothing 80\text{mm}$ or more and a depth of 3m or less
	Non-metallic pipe detection.	Horizontal. 20cm, Vertical 40cm	
	Manhole detector.	Detection of buried manholes. 50cm More than	

Table 4. Location error of underground facilities(1987)

Source : OH YK. 1987

	Material and diameter	Horizontal position(m)			Vertical position(m)		
		Observation value.	actual value.	Error.	Observation value.	actual value.	Error.
Communication line 1	PVC ø 100mm	0.50	0.57	0.07	1.30	1.00	0.30
Communication line 2	PVC ø 100mm	3.00	2.90	0.10	1.80	1.50	0.30
Water line	SP ø 100mm	9.00	9.05	0.05	1.60	1.35	0.25
Eelectric line	FRP ø 250mm	10.50	10.60	0.10	1.50	2.00	0.50
Gas line	CIP ø 100mm	19.50	19.40	0.10	1.60	1.30	0.30

Table 5. RMSE of vehicle traction type GPR (by facility)

Source : K JW. 2016

	Water work		Gas		Heating		Electricity		Communication	
	Distance	Depth	Distance	Depth.	Distance	Depth	Distance	Depth	Distance	Depth
Average	0.234	0.314	0.367	0.299	0.427	0.184	0.413	0.160	0.139	0.236
Maximum	0.904	1.007	0.699	0.538	0.698	0.500	0.698	0.266	0.693	0.595
Minimum	0.016	0.027	0.013	0.016	0.216	0.006	0.216	0.071	0.017	0.076
RMSE	0.342	0.427	0.360	0.342	0.466	0.250	0.466	0.177	0.257	0.297

과에서는 Table 4와 같이 수평위치오차 0.05~0.10m로 나타나 비교적 정확함을 알 수 있었으나, 깊이오차는 0.25~0.5m로 다소 크게 나타나 있다(오이균 1988).

1997년 지하매설물측량의 정확도 연구에서 GPR을 이용한 비금속관로에 대한 실험에서 관경 100mm이상 깊이 3.0m 이하에서 평면위치오차 ± 0.20 m, 깊이오차 ± 0.30 m로 나타났다(이재기 1997).

2016년 전자유도탐사와 차량 견인형 GPR 성과분석을 한 결과 Table 5와 같이 평면위치에 대한 RMSE값의 차이가 0.25m~0.48m, 수직값은 0.17~0.43m로 나타났으며, 관경 및 매설 심도를 구분하여 분석한 결과 ø300mm 초과 시 평면오차가 약 0.25m로 정확하였으며, 심도는 1.5m 이하일 경우 약 0.27m로 나타났다. 따라서 차량형 GPR장비로부터 신뢰할 수 있는 탐사성과는 심도 1.5m 이하에 관경 300mm를 초과하는 관로로 분석하였다(김정욱 2016).

2020년 현장 GPR 탐사자료와 지하공간통합지도와

의 상호위치 정확도 분석에서 최소 0.101m, 최대 0.879m, 평균 0.625m, RMSE 0.668m의 위치 오차를 확인하였다(송석진 2020).

2021년에 비금속 상수관을 GPR탐사한 결과 GPR로 측정한 비금속 상수관의 위치 정확도는 0.035m 이내로 나타났으며, 매설깊이에 대한 정확도는 -0.16~0.15m이었으며, 평균 0.103m 정도로 나타나 공공측량 작업규정의 지하시설물 측량을 위한 기기의 성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다(이근왕 2021).

또한 한국건설기술연구원과 KT 등 전국 수개소에 기관별, 목적별로 테스트베드를 설치하고, 다양한 매립환경과 관종 및 관경별 탐사 실험을 하고 있으며, Figure 8과 Table 6과 같이 불탐 사유 및 대상을 제외하고는 평면위치오차 ± 5 cm, 수직오차 ± 10 cm의 탐사 정확도를 나타내었다(KOSECO 2021).

그러나 위 내용에 따른 긍정적 결과에도 불구하고, 현장 굴착이 어려운 관계로 대부분 맨홀 등 노출된 시

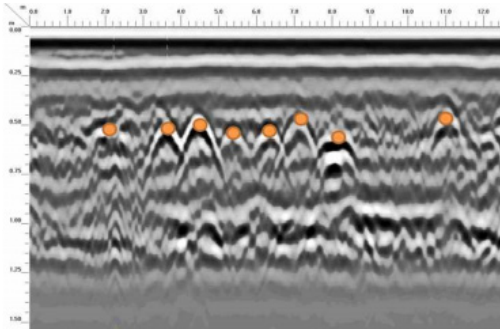


Figure 8. GPR image interpretation

Source : KOESECO. 2021

설 및 기존 도면을 참고하여 탐사한 결과가 다 수이다. 또한 교외 지역에 설치된 테스트베드로는 지역별, 매립 성분별 집중 매설된 지하시설물을 백프로 모두 반영하는 것은 한계가 있을 수밖에 없고, 도로포장 상태, 강우량과 적설량에 따른 토양의 함수비 변화 등 여러 요인에 따라 탐사에 장애가 발생한다. 대부분 GPR탐사 현장에서는 탐사장비 업체의 매뉴얼에 의존하고, 탐사자의 경험과 숙련도에 의해 판독 결과가 좌우될 수밖에 없다. 따라서 세밀하게 구성된 테스트베드의

Table 6. Location error of GPR

Source : KOESECO. 2021

No	Horizontal position(cm)	Vertical position(cm)	Note
1	± 5cm	± 10cm	Good
2	± 3cm	± 5cm	Good
3	± 3cm	± 6cm	Good
4	± 3cm	± 5cm	Good
5	Detection error		
6	± 5cm	± 10cm	Good
7	± 3cm	± 5cm	Good
8	± 5cm	± 10cm	Good

구성 및 GPR장비 특성에 맞는 체계화된 교육 훈련이 필요하다.

4.2. 국외 GPR 정확도 기준

GPR탐사의 해외기준은 먼저 일본의 경우 GPR탐사 협회에서 탐사 매뉴얼에 2.5m~3m 깊이 내에서 측정 오차는 수평 10cm 이내, 수직 10%의 기대치를 명시

Table 7. GPR level classification

Source : ASCE. 2002

Level	Location accuracy		Method
	Horizontal	Vertical	
1st(A)	±25mm	±50mm	Verifild Visually
2nd(B1P)	±150mm or 15%	±150mm or 15%	ViaPost –Processed GPR
3rd(B2P)	±250mm or ±40%	±250mm or ±40%	ViaPost –Processed GPR
4th(B3P)	±500mm	Undefined	ViaPost –Processed GPR

Table 8. Accuracy according to the area where the facility is located

Source : PAS128: 2014

Method	GPR Search Resolution	Typical Application
M1	If that's the case	Undeveloped area
M2	2m or high density array	Suburban area
M3	≤ 1m or high density array	Urban
M4	≤ 0.5m or high density array	The downtown area

하였다(エスパー探査協會 2013).

미국 토목학회(ASCE: American Society of Civil Engineers)가 제안한 SUE(Subsurface Utility Engineering, 천심도시설공학)는 지하매설물을 효과적으로 관리하기 위해 A, B, C, D 구분하였다(ASCE 2002). ASCE에서 정한 규정들을 인용하여 영국과 유럽을 비롯한 각 국가들이 GPR 탐사에 대한 기준으로 참고하고 있는데, Table 7은 영국의 표준협회(British Standard Institution)에서 2014년에 만든 지하시설물에 대한 탐사와 위치 검증 기준(PAS128: 2014)중에서 GPR탐사방법과 관련된 내용이다.

그 기준을 참고해 보면 건설공사 및 굴착을 위한 공사단계별 지하시설물 정보등급 4등급으로 나누어 분류하는데 가장 정확도 면에서 성과가 좋은 A등급의 경우 육안으로 확인이 가능한 매설공사 현장에서의 실측 및 지하시설물의 사후 관리 과정에서 노출된 부분에 대한 측량에 의해 얻어진 지하시설물의 정확한 '평면위치 및 깊이정보'로서 지하시설물의 관종, 관경, 관재질 등의 속성정보도 포함한다. B등급은 전자유도

탐사, 지하투과레이다(GPR) 탐사, 음파탐사 등의 적절한 지구물리탐사 방법을 적용하여 얻은 지하시설물의 '수평 위치' 정보, C등급은 맨홀, 전력구, 소화전 등 지상에 드러난 시설물의 측량, 대략적인 탐사로 얻은 지하시설물 정보와 도면 및 기록(D등급의 정보)에 대한 전문가의 판단 등을 포함한다. D등급은 기존 기록 및 구두 자료로 부터 얻은 정보로서 지하시설물의 '대략적인' 평면위치를 파악하기 위한 것이다. 각각의 세부기준 중에서 GPR탐사를 반영한 기준으로 보면, Table 7과 같이 1등급(A)은 육안으로 직접 확인이 가능한 경우로 수평정확도 $\pm 25\text{mm}$, 수직 정확도 $\pm 50\text{mm}$ 이며, 2등급(B1P)은 GPR 후처리 데이터를 기준으로 하여, 추정 수평정확도 $\pm 150\text{mm}$ 또는 $\pm 15\%$, 수직 정확도 역시 $\pm 150\text{mm}$ 또는 $\pm 15\%$ 이다. 3등급(B2P)은 GPR후처리 데이터 기준으로 추정 수평정확도 $\pm 250\text{mm}$ 또는 $\pm 40\%$, 수직정확도 $\pm 250\text{mm}$ 또는 $\pm 40\%$ 이고, 마지막 4등급(B3P)은 GPR후처리 데이터 기준으로 추정 수평정확도 $\pm 500\text{mm}$ 이나 수직정확도는 정의되지 않았다.

Table 9. Accuracy according to the material of the facility.

Source : PAS128: 2014

Quality Level	post-processing	Location accuracy		reference
		Horizontal	Vertical	
QL-B4	N/A	Undefined	Undefined	Only found the records.
QL-B3P	Yes	500mm	Undefined	PE water pipe detected only by GPR.
QL-B2P	Yes	250mm	$\pm 40\%$ of detected depth	Communication cable that can only be detected by EML.
QL-B1P	Yes	150mm	$\pm 15\%$ of detected depth	Iron gas pipes detected by EML and GPR.

Table 10. Depth measurement range according to GPR frequency.

GPR frequency	Depth range	Depth decision	Minimum size
100MHz	Maximum 5m	$\pm 10\%$	0.5m
250MHz	3m	$\pm 10\%$	0.3m
500MHz	2m	$\pm 10\%$	0.2m
1000MHz	1m	$\pm 10\%$	0.1m

또한 시설물이 위치한 지역을 기준으로 Table 8과 같이 혼합한 도심지역의 경우 0.5m이하의 탐사 해상도를 번잡한 도시지역은 1m이하, 교외지역은 2m이하, 그 밖의 미개발 지역에서는 2m이하의 GPR탐사 해상도를 기준으로 하고 있다.

지하 시설물 종류 별로 품질 등급별 위치오차는 Table 9와 같이 철제 가스관로는 수평위치 오차 150mm, 수직위치오차는 깊이의 15%이고, 통신관로는 수평위치 오차 250mm, 수직위치오차는 깊이의 40%이며, PE수도 관로는 수평위치 500mm, 수직오차는 정의되지 않았다.

GPR주파수에 따른 심도 측정범위는 Table 10과 같이 100MHz에서 최대 5m까지 탐사가 가능하고 위치 결정은 $\pm 10\%$ 정도의 수직위치 오차와 최소크기는 0.5m로 나타났다.

4.3. 국내외 GPR 정확도 검증 기준 비교

국내 법규상 규정(공공측량 작업규정)은 금속관로와 비금속관로로 나누어 수평위치오차는 200mm로 같으며, 깊이 오차만 금속관로 300mm, 비금속관로 400mm의 차등을 두고 있다. 국내 년도 별 GPR탐사 실험성과를 분석해본 결과 탐사결과와 실제 위치를 확인한 데이터는 비교적 정확한 성과를 나타내었고, 탐사 년도 경과에 따른 오차발생 등은 특별히 발생하지 않는 것으로 조사되었다. 차량 견인용 GPR 탐사 장비는 주로 싱크홀 등 지하의 공동(空洞)을 탐사하는 것으로 일반 GPR탐사 성과와는 다소 차이가 있었으며, GPR탐사성과와 지하공간통합지도 상의 성과에서는 차이를 보였으나, GPR탐사에 의한 비금속 상수관로 위치 정확도는 규정 이내였고, 테스트베드 실험결과는 일부 불탐대상을 제외하고는 우수한 탐사 결과로 조사되었다. 그러나 탐사 방해요소인 토양의 염분 성분이나 강우에 따른 함수비 및 다중시설물 매립지역 등을 고려한 탐사 테스트는 미진한 편으로 이를 보

완한 테스트 성과가 필요하다.

국외의 GPR탐사 정확도 검증 기준은 지역별, 재질별, 주파수별로 나누어져 있는 것을 알 수 있는데, 국내외를 통틀어서 일본의 GPR탐사협회의 탐사 매뉴얼에 명시한 3m 깊이에서 측정오차는 수평 10cm 이내, 수직 10%의 위치 정확도가 가장 높은 기준이었다. 영국의 경우 지하시설물 측량 중 육안으로 관측이 가능한 노출 시설물의 탐사 정확도 기준등급(A)을 수평위치오차 $\pm 25\text{mm}$, 수직위치오차 $\pm 50\text{mm}$ 로 가장 높게 설정하였고, 그다음 정확도 등급(B)은 국내에서 요구하는 작업 환경과 유사하였는데, GPR탐사, 전자유도탐사, 음파탐사 등의 적절한 탐사방법을 적용하여 얻은 지하시설물의 위치오차는 수평, 수직 모두 150mm 또는 $\pm 15\%$ 를 나타내었다. 또한 대략적인 탐사로 얻은 지하시설물 정보, 도면 및 기록에 대한 전문가의 판단 등을 포함한 기준(C)의 지하시설물의 위치오차는 수평, 수직 모두 250mm 또는 $\pm 40\%$ 로 나타났다. 국내외의 GPR탐사 정확도 기준은 일부 조건을 제외하면 거의 비슷하였는데, 국외의 경우 기준치를 수치와 병행하여 퍼센트(%)로 위치 오차를 표시하고 있었으며, GPR 탐사의 특수성으로 비추어 국내 기준에도 반영할 필요가 있을 것으로 사료되었다.

따라서 우리나라에서도 GPR의 탐사성과 기준은 GPR탐사 방법 특성상 법규로 정하는 것 보다는 해외의 예처립 협회나 학회 등의 관련 단체에서 기준을 마련하고 적용한 후에 법규정으로 도입하는 것이 좀더 효율적이라고 사료되었다. GPR탐사방법의 정확도 검증 기준은 국내의 실제 관측치와 유사한 환경을 보이는 기준들을 참조하고 해외 기준들을 분석한 결과 Table 11과 같이 그 평균치는 대략적으로 위치 정확도는 심도 3m 이내를 기준으로 하여 수평위치 200mm 또는 $\pm 15\%$, 수직위치 300mm 또는 $\pm 15\%$ 으로 나타났다. 추후 GPR의 특성과 지하 구성 물질 요소 등을 고려하고, 지역별 시설물별 다양한 실험결과를 토대로 한 세분화된 GPR탐사방법의 정확도 검증 기준 연구가 필

Table 11. Criteria for setting the accuracy of GPR exploration method.

		Location accuracy		reference
		Horizontal	Vertical	
domestic law	Metal pipe.	200mm	300mm	Based on a pipeline with a diameter of 80mm or more and a depth of 3m or less.
	Non-metallic pipe.	200mm	400mm	
Accuracy of domestic observation.		50~350mm	150~400mm	More than 100mm in diameter and less than 3m in depth.
Overseas standards.		150~250(500)mm or $\pm 15\sim 40\%$	150~250mm or $\pm 15\sim 40\%$	500mm of non-metal pipe.
Average value		200 mm or $\pm 15\%$	300 mm or $\pm 15\%$	If it's 3m, 15% is applied, 450mm.

요하다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 GPR탐사방법에 따른 정확도 기준을 검증하기 위해 GPR탐사방법 원리 및 방법들을 고찰하였으며, 기존의 법규와 국내에서 연구된 GPR탐사 위치오차 성과와 해외기준을 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 국내에서는 지하시설물의 정의를 도로법, 지하안전관리에 관한 특별법, 공공측량작업규정, 지하공간통합지도 제작 작업규정에서 규정하고 있었는데, 법의 목적과 성격에 따라 다소의 차이가 있었다. 따라서 법규상 지하시설물 용어 정의에 대하여 정비が必要한 것으로 사료된다.

둘째, 국내 기존 GPR탐사에서 조사된 정확도는 일부 장비 및 도면과의 차이를 제외하면, 테스트 베드 성과와 더불어 양호하게 조사되었으나, 탐사 방해요소인 토양의 성분이나 강우에 따른 함수비 및 다중시설물 매립지역 등을 고려한 세밀한 탐사 테스트는 미진한 편으로 이의 보완이 필요하다.

셋째, 우리나라에서는 지하시설물의 위치오차를 공공측량작업규정에서 규정하고 있으나 해외는 협회나

학회에서 제시한 기준들을 참고하고 있는 것으로 나타났다. GPR의 특성을 감안하여 일정기간 협회 등의 기준을 적용한 후, 법규정으로 반영 하는 것도 효율적이라고 사료 된다.

넷째, 법규에서 정한 위치오차와 국내 실험 결과 및 해외 기준 등을 비교한 후 GPR탐사방법의 정확도 평균치를 반영한 결과 대략 위치오차기준은 수평위치 200mm 또는 $\pm 15\%$, 수직위치 300mm 또는 $\pm 15\%$ 로 나타났다.

불탐구간이나 싱크홀 등의 지하시설물 조사 측량에 있어 GPR탐사 방법은 다양한 지중 물질 구성 특성 상 지역별, 시설물별로 차이가 발생할 수 있으며, GPR탐사 특성상 조사자의 경험과 역량이 절대적이므로 이에 따른 체계적인 교육훈련의 도입이 필요하며, 지하시설물의 정확도 검증 기준은 일반측량의 위치정확도와는 달리 명확한 수치로 정하는 것보다 해외에서와 같이 지하시설물별 중요도와 재질 등을 감안한 등급별 일정한 비율로 표시하는 것이 좋을 것으로 사료되었다. 따라서 추후 지속적인 연구를 통한 다양한 실험 결과를 토대로 세분화된 GPR탐사방법의 정확도 검증 기준의 정립이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

References

- 이강원. 2015. 지하공간정보 관리론. 시그마 프레스, pp. 559-573.
- Lee KW. 2015. *Underground space information management theory*. Σ press, pp. 559-573.
- 박순표. 1985. 시가지지하시설물 측정등록과 관리에 관한 연구. 석사학위논문. 연세대학교 행정대학원. pp. 3-9.
- Park SP. *A Study on the Measurement Registration and Management of Urban Underground Facilities*. Master Thesis. Yonsei University. pp. 3-9.
- 오이균. 1988. 레이더방식을 이용한 지하시설물측량에 관한연구. 석사학위 논문. 연세대학교 공학대학원. pp. 1-5, 32.
- Oh YK. 1988. *A Study on the Underground Utility Survey Using Radar System*. Master Thesis. Yonsei University. pp. 1-5, 32.
- 이재기외. 1997. 지하매설물 측량의 정확도. 한국지형공간정보학회논문집 5(1): 139-145.
- Lee JG. 1997. Underground facilities Detecting Accuracy. *Korea Spatial Information Society*. 5(1): 139-145.
- 이용욱. 2007. 지하시설물도 현황 및 정확도 분석에 관한 연구. 한국측량학지. 25(3): 224.
- Lee YW. 2007 A Study on Status and Accuracy of Underground Facilities Maps. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*. 25(3): 224.
- 김정욱. 2016. 지하시설물 탐사에 대한 차량 견인형 GPR의 적용에 관한연구. 석사 학위 논문. 서울시립대학교. pp. 78-79.
- Kim JW. 1016. *A Study on Applying Ground Penetrating Radar of Vehicle Traction Type to Underground Facility Induction*. Master Thesis. University of Seoul. pp. 78-79.
- 송석진. 2020. 현장 GPR 탐사자료와 지하공간 통합지도 상호위치 정확도 분석에 관한 연구. 한국지리정보학회지. 23(4): 208-216.
- Song SJ. 2020. A Study on the Analysis of Positional Accuracy between the GPR Survey Data and Underground Space Integration Map. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 23(4): 208-216.
- 김원대 외. 2021. 지하공간정보 정확도 향상을 위한 품질등급제 연구. 한국측량학회. 39(3): 167-177.
- K WD. 2021. A Study on Quality Level of Underground Spacial Information for Accuracy Improvement. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 39(3): 167-177.
- エスパー探査協會. 2013. エスパー 探査 標準積算資料〈埋設物調査, 空洞調査〉
- ESPAR Exploration Association. 2013
- 이근왕. 2021. 네트워크 RTK와 연계한 비금속 상수관의 GPR 탐사. 한국산학기술학회논문지. 22(2): 296.
- Lee KW. 2021. GPR Exploration of on-metallic Water Pipes Linked with Network RTK. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 23(4): 208-216.
- KOSECO. 2012 Test-bed Exploration Report.
- American Society of Civil Engineers(ASCE). 2002. Standard Guideline for the Collection and Depiction of Existing Subsurface Utility Data.

2021년 10월 06일 원고접수(Received)

2021년 10월 28일 1차심사(1st Reviewed)

2021년 11월 25일 게재확정(Accepted)

초 록

지하공간정보를 체계적이고 효율적으로 관리하기 위해서는 기본적으로 지하공간정보통합지도 제작이 필요하고 이를 위해서는 기존에 매설된 지하공간정보의 등록이 필수적이다. 1997년부터 본격적으로 지하시설물전산화등록사업에 착수한 이래 지속적으로 지하시설물에 대한 조사 측량을 지자체별로 지속적으로 추진하고 있다. 또한 싱크홀 등의 위험요소에 대비하기 위해서 정부에서는 지하안전에 관한 특별법을 제정하는 등 지하시설물관리에 많은 노력을 하고 있으며, 이에 따라 GPR탐사방법에 의한 지하시설물 조사측량이 증가 추세에 있다. 본 연구에서는 GPR탐사 방법의 원리 등의 이론들을 고찰하고, 국내 관련 법규와 국내 GPR탐사 실험성과 및 해외 기준들을 분석하여 GPR탐사방법의 정확도 검증 기준을 제시하고자 하였다. 그 결과 해외에서는 주로 학회나 협회에서 정확도 기준을 설정하여 활용하고 있었고, 법규 및 기존의 실험성과와 해외기준과의 비교 결과 부분적인 차이가 있었으며, 검증기준에 있어서 GPR탐사방법의 특성을 감안 해외사례와 같이 오차의 기준을 퍼센트로 병행으로 하는 사례도 필요하다는 결론을 얻었다.

주요어: GPR탐사방법, 정확도 검증, 지하공간정보통합지도, 지하시설물