

3차원 정밀탐사 지하시설물 정보 수집 기술 개발*

류지송¹ · 장용구^{2*}

Development of underground facility information collection technology based on 3D precision exploration*

Jisong RYU¹ · Yonggu JANG^{2*}

요 약

지상공간의 확보를 위해 도시정비사업, 재개발사업, 고속도로 지하화 등의 굴착공사가 수반된 건설공사가 증가하고 있다. 더불어 이런 건설공사 또는 자연의 영향으로 인해 지하수위가 변동되거나, 노후 상하수도 관로로 인한 토사유출이 원인이 되어 지반함몰이 발생하는 등의 안전사고가 증가하고 있다. 지하시설물 관리기관은 강화된 지하안전관리에 관한 특별법에 따라 지속적인 조사와 탐사를 통해 지하정보의 정확도 향상을 위한 노력을 수행해야 하는 실정이다. 이에 본 연구에서는 지하시설물의 정확도 확보를 할 수 있도록 3차원 정밀탐사 지하시설물 정보 수집을 위해 장비의 구성과 데이터 처리방식을 정의한다. 그리고 3차원 지하시설물 정보 수집 기술을 개발한다. 이후 개발된 기술을 검증한 결과 수평정확도가 기존 방식 대비 오차를 평균 6cm 가량 향상시켜 공공측량작업규정의 오차범위 이내의 3차원 지하시설물 정보를 취득할 수 있었고, 수직정확도는 기존과 동일한 수준을 확인한다. 향후 본 연구에서 제안한 차량형 3차원 지하시설물 정보수집기술을 활용한다면, 공공측량 성과심사를 득할 수 있는 수준의 지하시설물 정보를 신속하게 대량으로 취득할 수 있는 수집체계 구축이 가능할 것으로 보인다.

주요어 : 지하공간통합지도, 지하시설물 탐사, 지표투과레이더, LiDAR, 현장실증

ABSTRACT

Safety accidents are increasing, such as changes in groundwater levels due to construction work or natural influences, or ground cave-ins caused by soil runoff from old water supply and sewage pipes. In addition, underground facility management agencies must make efforts to improve the accuracy of underground information through

2023년 10월 14일 접수 Received on October 14, 2023 / 2023년 10월 31일 수정 Revised on October 31, 2023 / 2023년 11월 03일 심사완료 Accepted on November 03, 2023

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 : RS-2020-KA158151)

1 한국건설기술연구원 박사후연구원 Post Doctor, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology

2 한국건설기술연구원 연구위원 Research Fellow, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology

* Corresponding Author E-mail: wkddydrn@kict.re.kr

continuous investigation and exploration in accordance with the Special Act on Enhanced Underground Safety Management. Accordingly, in this study, we defined the configuration of equipment and data processing method to collect 3D precise exploration underground facility information and developed 3D underground facility information collection technology to ensure accuracy of underground facilities. As a result of verifying the developed technology, the horizontal accuracy improved by an average of 6cm compared to the existing method, making it possible to acquire 3D underground facility information within the error range of the public survey work regulations.

KEYWORDS : *Underground Geospatial Information Map, Exploration System, GPR, LiDAR, Field Test*

연구개요

1. 배경 및 필요성

지상공간의 확보를 위해 도시정비사업, 재개발사업, 고속도로 지하화 등의 굴착공사가 수반된 건설공사가 증가하고 있다. 더불어 이런 건설공사 또는 자연의 영향으로 인해 지하수위가 변동되거나, 노후 상하수도 관로로 인한 토사유출이 원인이 되어 지반함몰이 발생하는 등의 안전사고가 증가하고 있다(Ministry of Science and ICT, 2015).

이에 국토교통부는 「지하안전관리에 관한 특별법」(약칭 지하안전법)을 제정하여 2018년부터 시행 중이다. 지하안전법은 지하시설물 관리기관이 1년마다 1회 이상 육안조사를 수행하도록 하고 있고, 5년마다 공동조사를 수행하도록 하고 있다. 더 나아가 국토부는 지하안전법을 개정하여 지하안전을 강화하고자 하였다. 주요 개정 내용은 주기적으로 지하정보의 갱신계획을 수립하고, 신설, 이설, 폐관, 조사·탐사 등으로 지하정보에 변화가 있는 경우 지하정보통합체계에 의무적으로 반영하도록 법을 강화하였다. 이로 인해 지하시설물 관리기관은 지속적인 조사와 탐사를 통해 지하정보의 정확도 향상을 위한 노력을 수행해야 하는 실정이다.

지하시설물 정보는 2018년도부터 노출 상태에서 지하시설물의 측량을 의무화 하였고, 공공 측량 성과심사를 득하게 하였다. 그러나 2018

년 이전에 구축된 지하시설물은 일부 전산화 되어 있으나 이 또한 도면이기(도면을 디지털화만 하여 측량이 되지 않은 상태)정보로 정확도를 담보하기 어렵다. 이와 같은 상황에서 국토교통부에서는 지하시설물 정확도 개선을 위해 지하시설물 정확도 개선 정보화전략계획을 수립했다. 여기서 지하시설물의 정확도를 “지하시설물 전산화 과정인 지하시설물도의 위치 및 속성정보와 현실 지하시설물과의 일치성 정도”와 같이 정의했다(Molit, 2021). 현재 지하시설물의 정확도를 확보하는 방법은 불확실한 위치정보를 갖는 지하시설물 매설지점을 굴착하여 실제 측량을 수행하는 방법, 금속관로탐사장비를 통해 탐사를 하는 방법, 비금속관로 탐사장비를 활용하여 탐사하는 방법이 있다.

노출측량은 정확한 지하시설물의 위치를 확보할 수 있다. 그러나 정확도 확보를 위해 도로점용 및 굴착을 수반하기 때문에 비용과 기간이 오래 걸린다는 한계가 있다. 금속관로 탐사장비를 통해 탐사를 하는 경우 굴착을 하지 않고 정확한 위치정보를 확보할 수 있다. 그러나 금속관로만 탐사가 가능하고, 맨홀과 맨홀 사이의 관로 길이가 500m이상인 경우 탐사가 어렵다. 더욱이 최근 신설되는 관로의 재질이 금속관로보다 비금속관로가 많아 탐사할 수 있는 대상이 줄어들고 있는 추세이다(Molit, 2021). 마지막으로 비금속관로 탐사방법의 경우 금속, 비금속에 상관없이 탐사가 가능하고, 차량형의 경우 대량의 지하시설물의 탐사가 비교적 짧은 기간

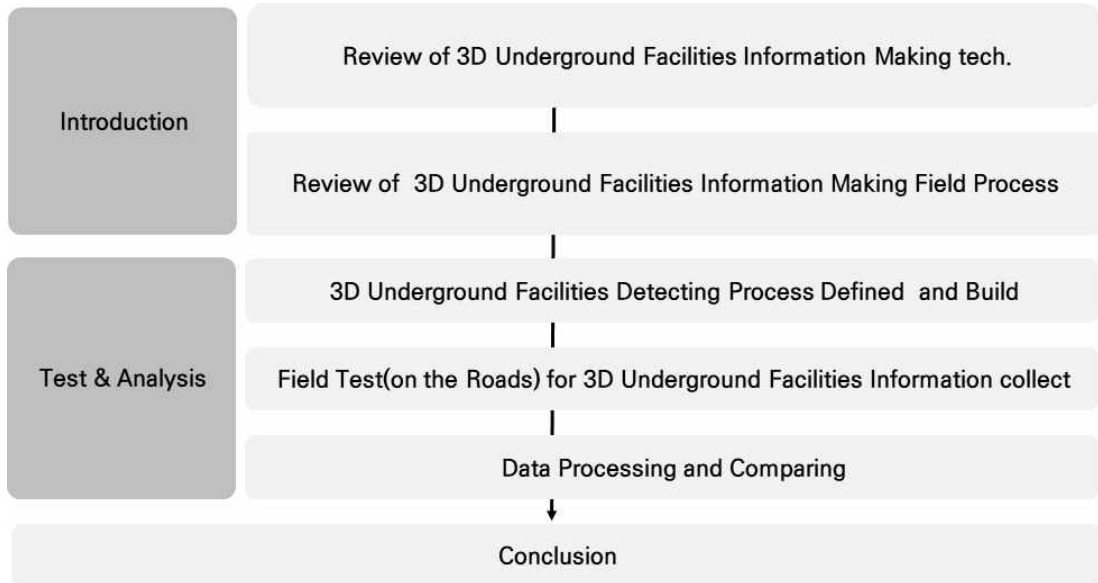


FIGURE 1. Research flow

내에 수행할 수 있다는 장점이 있다. 현행 비금속관로 탐사 방식은 위치측위에 GPS(Global Positioning System)를 활용하고 있는데, 높은 지형지물로 인해서 도심지에서 활용이 어렵다는 한계가 있다(Kim, 2019).

이에 본 연구에서는 그림 1과 같이 현재 활용되고 있는 3차원 정밀탐사 기술과 방법을 조사하고 분석하여 3차원 정밀탐사 지하시설물 정보 수집 기술을 정의한다. 이후 정의된 개념에 필요한 하드웨어, 소프트웨어 적용 방안에 대하여 검토한다. 이후 하드웨어와 소프트웨어를 결합한 일

2. 연구범위 및 방법

연구방법은 그림 1과 같이 현재 활용되고 있는 3차원 정밀탐사 기술과 방법을 조사하고 분석하여 3차원 정밀탐사 지하시설물 정보 수집 기술을 정의한다. 이후 정의된 개념에 필요한 하드웨어, 소프트웨어 적용 방안에 대하여 검토한다. 이후 하드웨어와 소프트웨어를 결합한 일

련의 시스템을 구현하고 현장에서 실증한다.

3차원 지하시설물 정보 수집 방법 및 현황

1. 3차원 지하시설물 지하시설물 수집 방법

지하시설물 탐사를 위해서 금속관로탐사에 용이한 전자유도방식 MPL(Micro computerized pipe location)과 관로의 관재질에 상관없이 탐사가 가능한 GPR(Ground Penetrating Radar) 방식을 사용할 수 있다(Choi *et al.*, 1998). 기존에는 비용면에서 전자유도방식을 사용하였다. 정확도는 수평정확도 $\pm 20\text{cm}$, 수직정확도 $\pm 30\text{cm}$ 수준이며, 가탐심도는 1~3m 수준이다. 그러나 금속관로만 가능하고, 취득한 탐사정보를 전산화하는데 숙련도에 따라서 3~5일가량 소요된다. 한편 GPR 탐사방식은 그림 2와 같이 수 MHz에서 수GHz범위의 전파를 지표와 접한 송신안테나를 사용해서 방사시킨 후 물체(지층, 시설물, 공동 등)에 부딪혀 반사되는 파를 수신안테나로 수집한다. 이때 되돌아온 전파를 분석하여 모니터에 생성되는 쌍곡선(Hyperbola)으

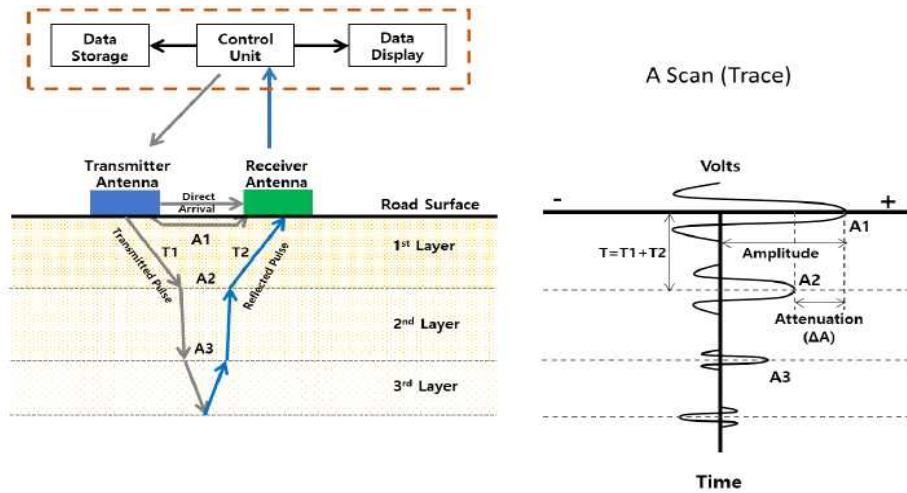


FIGURE 2. Illustration of GPR scanning on a road and a possible path of electromagnetic wave(Rhee *et al.*, 2020)

로 물체의 유무를 판단할 수 있다(Yoon *et al.*, 2016). GPR 주파수는 고주파일수록 저심도를 저주파일수록 고심도를 탐사할 수 있다(Kim *et al.*, 2016). 더불어 전자유도방식과 다르게 금속, 비금속 관로를 구분하지 않고 사용할 수 있다.

지하시설물 정보 탐사를 위해 사용되는 GPR은 지상의 x, y 좌표를 취득하기 위해 GPS를 주로 활용한다. 그러나 다중경로 오차로 인해 수평정확도가 개활지에 비해 상대적으로 떨어진 다(Kim, 2019). 이에 GPR 정보를 LiDAR (Light Imaging Detection And Ranging)와 결합하여 활용하는 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. LiDAR의 경우 센서를 중심으로 지형지물의 좌표를 점군형태로 생성해 내는 장비이다. 특히 넓은 영역을 기상조건에 구애받지 않고 위치정보를 습득할 수 있다(Lee, 2008). 기존 장비는 GPR과 GPS만 활용하는 것이 일반적이었으나 GPR과 GPS 그리고 LiDAR를 결합하여 활용하는 방식이 기존 방식에 비해 정확도를 향상시킬 수 있는 것을 볼 수 있었다(Ryu *et al.*, 2021).

2. 3차원 지하시설물 정보 수집 현황

지하시설물 정보는 「공공측량 작업규정」에

따라 탐사를 수행한다. 탐사방법은 시설물의 재질에 따라 적합한 방식을 선택하도록 하고 있고, 평면위치는 관로의 중심선, 깊이는 지표기준으로 한다. 탐사간격은 20m 이하로 하되 교차·분기되는 지점, 곡선인 관로, 제어장치 또는 밸브가 있는 경우는 간격에 상관없이 탐사를 수행해야 한다. 지하시설물 작업수행계획은 기초 조사를 기반으로 하여 지하시설물 편집도를 작성한 후 조사 및 탐사에 활용하도록 한다. 일반적인 기초조사는 탐사방식에 상관없이 동일하다. 여기에 탐사 후 작업조서 및 속성DB작성, 정위치 편집 등 전산화 과정을 수행한다.

일반적으로 3차원 지하시설물 정보를 탐사하여 수집할 때에는 비용이 저렴하고 조작이 간편한 MPL을 주로 활용한다. MPL 금속관로 탐사에 유용하지만, 비금속관로는 탐사하기가 어려워 불탐이 많이 발생한다(Oh, 2021). 다음으로 GPR을 활용하는 방법은 핸디형과 차량형으로 구분된다. 핸디형의 경우 사람이 직접 조작하여 탐사를 하는 방법으로 좁은폭과 심도에 대한 짧은 구간 탐사에 용이하다. 반대로 차량형은 넓은폭의 긴 구간에서 탐사가 용이하다. 따라서 작업규정에 명시된 바와 같이 필요에 따른 탐사방식을 선택하면 된다. 그러나 주관로에서 시설로

연결되는 인입관이나 비금속관로를 탐사할 수 없는 MPL의 활용성이 점점 떨어지고 있는 실정이다.

3. 3차원 지하시설물 정보 수집 시스템 적용 기술

GPR, GPS, LiDAR를 연계하여 활용하는 방법을 통해 지하시설물 정밀측위가 가능한 것을

알 수 있었다. 더불어 기준점(CP : Central Point)을 활용하여 현장에서 절대좌표 기반 3차원 지하시설물 탐사정보를 생성할 수 있도록 후방회법을 적용한 처리 절차를 그림 3과 같이 개선하고자 한다. 개선 기술은 실시간으로 차량이 이동하면서 도시기준점 수준의 절대좌표를 취득할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 절대좌표를 취득하는 개념은 그림 4와 같다.

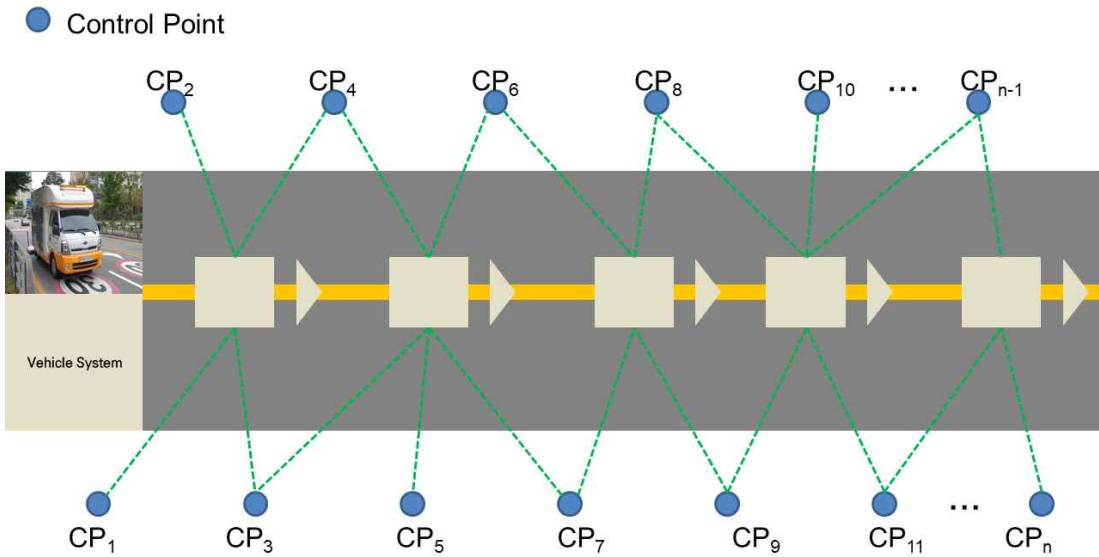


FIGURE 3. CP utilization plan to collect 3D underground facility information

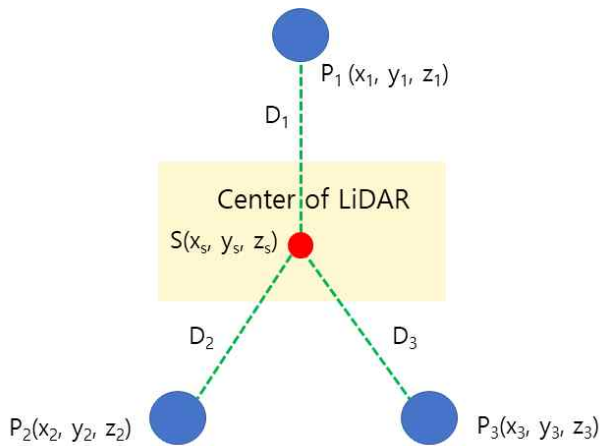


FIGURE 4. LiDAR Center coordinate Modifying Concept

제시된 방법을 활용하면 3차원 지하시설물 정보 수집을 위한 차량시스템이 이동할 때 LiDAR의 기준점을 상대좌표에서 절대좌표로 보정할 수 있다. LiDAR 원점(D1, D2, D3)을 3개의 CP점과 거리를 계산해서 산출한다. x_n , y_n , z_n 은 지하시설물 탐사 이전에 조사한 기준점이므로 상수C로 환하여 표현하면 식 1과 같은 수식을 도출할 수 있다. 도출된 수식으로 연산을 수행하면 차량에 장착된 LiDAR 데이터의 원점을 절대좌표로 보정할 수 있다. 이후 생성되는 점군데이터는 절대좌표로 취득할 수 있게 된다.

$$\begin{bmatrix} D_1^2 \\ D_2^2 \\ D_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s^2 \\ y_s^2 \\ z_s^2 \end{bmatrix} - 2x_s \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} - 2y_s \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} - 2h_s \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- * D_n = S에서 P_n 까지의 거리
- * P_n = 기준점의 위치(x, y, z)

* s = LiDAR 위치(x, y, z)

3차원 지하시설물 정보 수집 시스템 개발

1. 3차원 지하시설물 정보 수집 절차

3차원 지하시설물 정보 수집을 위해서 그림 5와 같은 절차로 수행하게 된다. 우선 하드웨어, 통신환경을 점검하고 모바일 지하공간통합지도 기반 모바일 지하공간통합지도 생성관리 시스템에서 현장 지하시설물의 위치를 확인한다 (Molit, 2022). 이후 실제 지하시설물이 위치하는지 1차로 확인을 하여 탐사 경로를 설정한다. 다음으로 국가기준점 등 현황조서를 작성하며 탐사경로와 매칭시켜 차량이 이동하면서 절대좌표를 취득할 수 있도록 경로를 조정한다. 이후 지하시설물 정보를 취득하고, 취득된 데이터를 처리하여 3차원 지하시설물 정보를 생성한다.

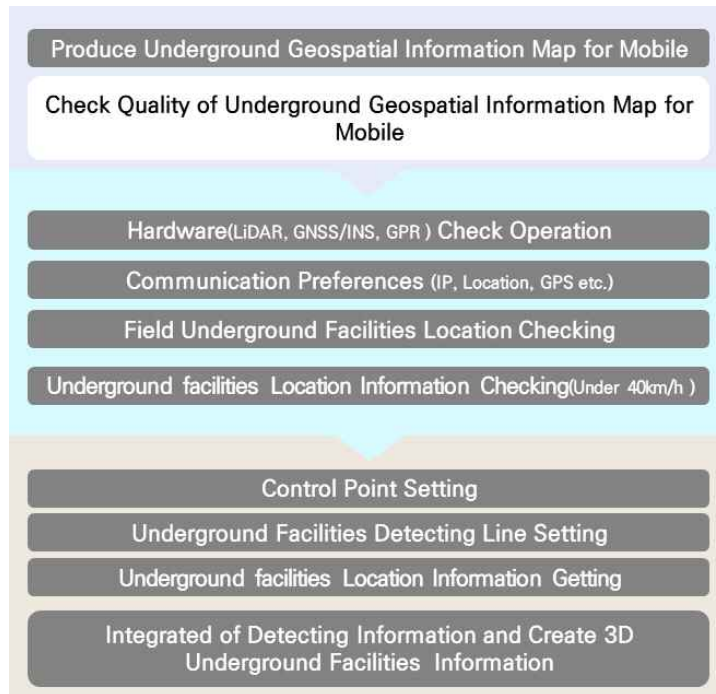


FIGURE 5. Detecting Procedure of 3D Underground Facilities

2. 3차원 지하시설물 정보 수집 기술 구축

3차원 지하시설물 정보 수집기술은 그림 6와 같이 차량시스템을 기반으로 구성된다. 차량시스템은 GPR 센서가 후방에 위치한다. 거치 장치에 16개채널로 구성된 센서가 설치되고 최대 5m 심도까지 탐사가 가능하다. 센서거치 장치 위에 LiDAR장비와 GPS장비를 설치하여 하드웨어를 구성한다(Ryu *et al.*, 2021). 소프트웨어는 그림 7과 같이 지하시설물 정밀탐사 현장지원 시스템, 복합데이터 처리시스템, AI 기반 심도측위 시스템으로 구성한다.

3. 3차원 지하시설물 정보 수집 시스템 검증

시스템 검증을 위해 서울 송파구 위례동 인근 지하시설물(하수)의 정보를 취득하여 3차원 지하시설물 정보 수집 시스템 기능과 성능을 검증하였다. 약 800m 직선구간을 설정하여 상행선, 하행선 양측에 대한 지하시설물을 탐사하여 정보를 습득, 3차원 지하시설물 정보 생성, 가시

화까지 진행하였다. 실험을 위해 설정한 구간내 지하시설물 정보는 표 1과 같다. 해당 관로가 가장 최근에 노출된 상태에서 측량된 정보로 참값으로 활용이 가능하여 실험대상으로 선정하였다.

그림 8, 그림 9와 같이 현장 기준점을 획득하고 그림 10, 그림 11과 같이 검중지역의 지하시설물의 현황을 살핀 후 지하시설물 탐사를 수행하였다. 탐사를 통해 수집한 지하시설물 정보를 3차원 지하시설물 정보 수집 시스템을 활용하여 그림 12와 같이 가시화 하였다.

4. 분석결과

기초조사 이후에 지하시설물 탐사를 진행하였다. 탐사정보가 현장에서 처리되어 3차원 성과물로 생성되어, 탐사 후 3차원 지하시설물 정보로 생성하는데까지 약 1.5일 가량 소요되었다. 더불어 취득한 지하시설물 정보는 지하공간통합지도 데이터의 좌표와 탐사로 수집된 위치좌표의 오차를 비교하여, 정확도를 표 2와 같이 검토하였다. 수평정확도와 수직정확도는 「공공측



FIGURE 6. Hardware System

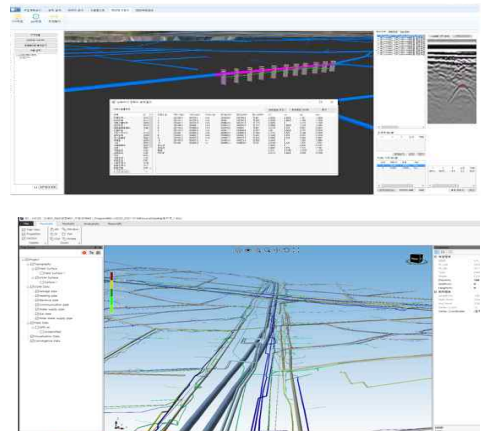


FIGURE 7. Software System

TABLE 1. Underground Facility Property Information

| | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Type of Underground facilities | Sewer Pipe |
| Management Agency | Seoul, Gyeonggi-do |
| Installation Date | 2017. 10. 01 |
| Pipe Material | Hume Pipes |
| Pipe Diameter | 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 |



FIGURE 8. Ground Control Point Setting(1)

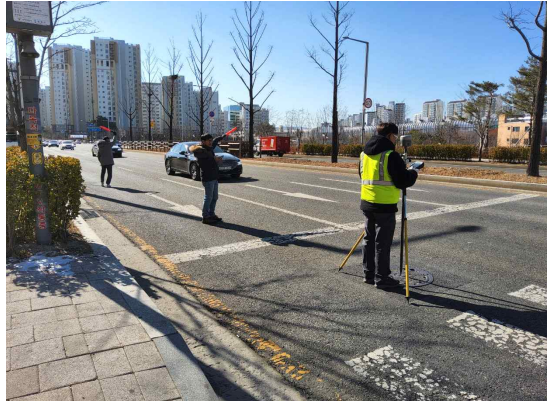


FIGURE 9. Ground Control Point Setting(2)



FIGURE 10. Field Checking based on Mobile Underground Integrated Geospatial Map



FIGURE 11. Checking Detection Result based on Mobile Underground Integrated Geospatial Map

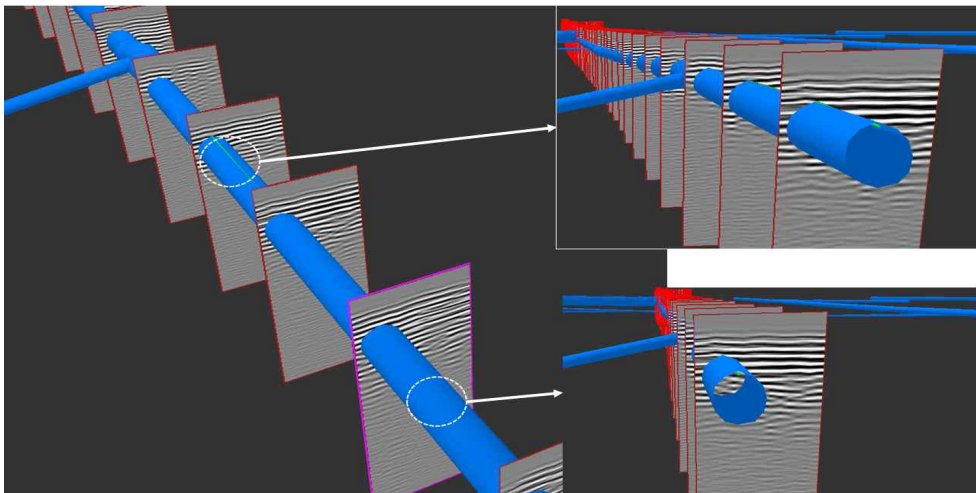


FIGURE 16. Visualization of Field 3D Underground Facilities Information

TABLE 2. Test Result

| | Meta Date (Underground Integrated Geospatial Map) | | | Vs. Integrated Detecting Information | | | |
|----------|--|-----------|-----------|--------------------------------------|-------|-------|------|
| | X(N) | Y(E) | H(EL) | X(N) | Y(E) | H(EL) | |
| Up side | PT1-1 | 541686.22 | 212146.64 | 27.50 | -0.17 | -0.17 | 0.30 |
| | PT1-2 | 541697.16 | 212146.88 | 27.58 | -0.18 | -0.18 | 0.29 |
| | PT1-3 | 541763.69 | 212150.51 | 27.50 | -0.17 | -0.17 | 0.31 |
| | PT1-4 | 541764.93 | 212150.59 | 27.49 | -0.18 | -0.19 | 0.30 |
| | PT1-5 | 541843.78 | 212154.13 | 26.86 | -0.18 | -0.18 | 0.32 |
| | PT1-6 | 541844.99 | 212154.12 | 26.86 | -0.18 | -0.18 | 0.30 |
| | PT1-7 | 541922.52 | 212157.93 | 26.12 | -0.18 | -0.18 | 0.31 |
| | PT1-8 | 541655.32 | 212144.90 | 27.87 | -0.17 | -0.18 | 0.31 |
| | PT1-9 | 541644.71 | 212144.51 | 27.85 | -0.17 | -0.16 | 0.31 |
| Downside | PT2-1 | 541999.41 | 212141.48 | 26.49 | -0.19 | -0.18 | 0.30 |
| | PT2-2 | 541934.44 | 212138.46 | 26.97 | -0.18 | -0.17 | 0.30 |
| | PT2-3 | 541874.94 | 212135.65 | 27.39 | -0.17 | -0.17 | 0.32 |
| | PT2-4 | 541814.04 | 212132.98 | 27.65 | -0.17 | -0.18 | 0.31 |
| | PT2-5 | 541756.45 | 212130.17 | 27.91 | -0.17 | -0.18 | 0.32 |
| | PT2-6 | 542110.87 | 212161.53 | 24.73 | -0.17 | -0.18 | 0.31 |
| | PT2-7 | 542068.87 | 212149.83 | 25.70 | -0.17 | -0.17 | 0.30 |
| | PT2-8 | 541876.12 | 212135.82 | 27.38 | -0.18 | -0.18 | 0.28 |
| | PT2-9 | 541815.22 | 212133.10 | 27.64 | -0.18 | -0.18 | 0.30 |
| | Minimum Error | | | -0.17 | -0.16 | 0.28 | |
| | Maximum Error | | | -0.19 | -0.19 | 0.32 | |
| | Average Error | | | -0.18 | -0.18 | 0.31 | |

TABLE 3. MPL vs. GPS applicability comparing

| | Detecting based on MPL | Detecting based on GPR |
|---------------------|--|--|
| Detecting pipe type | metal | metal and nonmetal |
| Working Speed | 3~5 days | 1~2 day |
| Accuracy | horizontality : $\pm 20\text{cm}$ verticality : $\pm 30\text{cm}$ | horizontality : $\pm 10\text{cm}$ verticality : $\pm 30\text{cm}$ |

「량성과작업규정」에 따라 지하시설물은 수평 $\pm 20\text{cm}$ 수직 $\pm 30\text{cm}$ 이내여야 활용 가능한 정보로 볼 수 있다. 3차원 지하시설물 수집 기술을 활용하여 만들어진 데이터를 지하공간통합지도와 비교한 결과 수평오차는 평균 18cm 이내, 심도 평균은 31cm 로 나타났다.

취득된 탐사결과를 바탕으로 기존 전자유도방식 탐사방식과 비교하면 표 3과 같다. 우선 관로의 종류에 구분없이 탐사가 가능하다는 장점이 있다. 정확도도 높은 것을 확인할 수 있다. 더불어 가탐심도를 탐사와 동시에 자료를 취득하여 전산화가 가능하다.

결론

본 연구에서는 지하시설물의 정확도 확보를 할 수 있도록 3차원 정밀탐사 지하시설물 정보 수집을 위해 장비의 구성과 데이터 처리방식을 정의하고 개발하였다. 이후 기술의 검증을 위해 실험 현장을 설정하고 현장실증을 수행하여 기술의 실용성을 검증하였다.

검증결과 기존 탐사방식에 비하여 더 넓은 범위를 신속하게 탐사할 수 있었다. 일반적인 자료조사에 들어가는 시간은 동일했으나 탐사와 데이터 생성, 가시화 측면에 있어서 1.5일 정도

소요 되었고 금속, 비금속에 관계없이 모든 관로를 탐사할 수 있었다.

기존 탐사방식이 소요되던 시간보다 약 50% 빠르게 데이터를 확보할 수 있어 개발된 기술이 조금 더 효과적인 것을 알 수 있었다. 또한 평면위치측위 오차가 허용 오차범위 이내에 도달한 것을 확인할 수 있었다. 단, 심도오차는 허용 오차에서 1cm가량 초과되는 경향을 보였는데 지하시설물 심도값을 도출하는 AI 소프트웨어의 개량을 통해 정확도를 올릴 수 있도록 추가적인 훈련과 실증을 수행할 필요가 있다.

향후 차량형 3차원 지하시설물 정보 수집 기술을 활용한다면, 공공측량 성과심사를 득할 수 있는 수준의 지하시설물 정보를 신속하게 대량으로 취득할 수 있는 수집체계 구축이 가능할 것으로 보인다. **KAGIS**

REFERENCES

- Choi, S.K., Park, K.S and Lim, I.S. 1998. The development of data transformation program for establishing the real-time database in underground utility, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 16(2):159-168 (최석근, 박경식, 임인섭. 1998. 실시간 지하시설물 데이터베이스 구축을 위한 자료 변환 프로그램 개발. *한국측지학회지* 16(2):159-168).
- Kim, D.S. 2019. 3D grid-based global positioning system satellite signal shadowing range modeling in urban area, *Sensors and Materials* 31:3835-3848.
- Kim, Y.T., Kim, B., 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* 18(2):37-42 (김연태, 김부일, 김제원, 박희문, 윤진성. 2016. 도로동공 탐지를 위한 지
- 표투과레이더의 적정 주파수 선정에 관한 연구. *한국도로학회논문집* 18(2):37-42).
- Lee, H.J. and Kim, S.Y. 2008. Mapping with LiDAR data and Google Earth image, IEEK summer conference 2008, The Institute of Electronics and Information Engineers, 19 June 2008, Gangwon-do Korea 31(1):755-756 (이효중, 김성약. 2008. LiDAR 데이터와 Google Earth 영상의 매핑. *대한전자공학회 2008년도 하계종합학술대회* 31(1):755-756).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2022. Development of technology for renewal automation and safety management support in excavation field on the integrated underground geospatial information map. (국토교통부. 2022. 지하공간통합지도 자동갱신 및 굴착현장 안전관리지원 기술 개발).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2021. Informatization Strategic Plan to Improve Underground Facility Information Accuracy. p.IV-28. (국토교통부. 2021. 지하시설물 정보 정확도 개선 정보화전략계획 수립. p.IV-28).
- Ministry of Science and ICT 2015. Development of Multi-channel 3-D GPR System for Roadbed Cavity Detection in the Urban Area, GP2015-043-2015(1), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, pp.14-15 (과학기술정보통신부. 2017. 도심지 지하공동 탐지 다중 채널 3차원 GPR 시스템 개발. pp.14-15).
- OH, Y.K., 2021, A Study on the Accuracy Verification Criteria in Underground Facilities Surveying Using GPR. *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, 51(2):35-49 (오이균, 2021, 지하시설물 측량에 있어서 GPR 탐사방법의 정확도 검증 기준에 관한 연구, *지적과 국토정보*, 51(2):35-49).

- 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 Engineering 40(3):285-294 (이지영, 심재원, 이상래, 이강현. 2020. 지표투과레이더(GPR)에 의한 도로포장의 전자기적 특성값 고찰. 대한토목학회 40(3):285-294).
- Ryu, J.S., Jang, Y.G., Park, D.H., 2021, Method to Improve the Location Accuracy of GPR Data for Underground Information Precise Detecting, Journal of the Korean Association of Geographic Information 24(3):1-9 (류지송, 장용구, 박동현, 2021, 지하정보 정밀탐사를 위한 GPR 데이터 위치 정확도 개선 방안, 한국지리정보학회 24(3): 1-9)
- Yoon, J.S., Baek, J.E., Choi, Y.W., Choi, H. and Lee, C.M. 2016. Signal pattern analysis of ground penetrating radar for detecting road cavities, International Journal of Highway Engineering 18(6):61-67 (윤진성, 백종은, 최연우, 최현, 이창민. 2016. 도로동공 탐지를 위한 지표투과레이더의 신호 패턴에 관한 연구. 한국도로학회지 18(6):61-67). [KAGIS](#)