

현장 GPR 탐사자료와 지하공간통합지도 상호위치 정확도 분석에 관한 연구*

송석진¹ · 조해용² · 한담혜³ · 김성길^{4*}

A Study on the Analysis of Positional Accuracy between the GPR Survey Data and Underground Space Integration Map*

Seok-Jin SONG¹ · Hae-Yong CHO² · Dam-Hye HAN³ · Sung-Gil KIM^{4*}

요 약

최근의 도심지에서 발생하고 있는 지반함몰 및 침하, 노후 지하시설물 파손 등의 지하 안전에 관한 이슈가 증가하고 있어 보다 정확한 지하시설물의 관리 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 현장에서 취득하는 GPR 탐사 성과로부터 취득한 지하시설물 공간정보와 지하공간통합지도의 공간정보를 상호 비교하는 기법을 도출하였다. 본 연구를 통해 개발한 지하공간통합지도 연계 현장활용 서비스 프로토타입 프로그램을 사용하여 강남역 주변 일부 구간에 대하여 현장 활용성 검증을 위한 GPR 탐사성과와 지하공간통합지도의 위치 정보를 비교한 결과 최대 0.879m, 최소 0.101m, 평균 오차는 0.625m로 나타났다. GPR탐사 성과의 정확도가 보장될 경우 지하공간통합지도의 위치정확도 개선에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 지하공간통합지도, 지하시설물, GPR탐사, 정확도개선

ABSTRACT

Recently, issues regarding underground safety such as sink hole, ground subsidence and damage to old underground facilities have been increasing in urban areas, raising the need for more accurate management of underground facilities. Thus, this study

2020년 11월 23일 접수 Received on November 23, 2020 / 2020년 12월 08일 수정 Revised on December 08,

2020 / 2020년 12월 08일 심사완료 Accepted on December 08, 2020

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20DCRU-B158151-01)

1 지티에스(주) 연구소장 Director of Research institute, GTS co.

2 지티에스(주) 대표이사 President & CEO, GTS co.

3 지티에스(주) 연구원 Solution Develop. Team Researcher, GTS co.

4 지티에스(주) 이사 Director, GTS co.

* Corresponding Author E-mail : ksg365@naver.com

derived a technique for comparing spatial data of underground facilities acquired from GPR exploration results acquired at the site with spatial data of integrated underground spatial maps. Using this underground space integrated map-linked service prototype program developed through this study, comparing the location information of the GPR exploration results and the underground space integrated map for the verification of site usability in some sections around Gangnam Station, the results demonstrated that the location of the map is 0.879m maximum, minimum of 0.101m and the average fudge factor was 0.625m. If accuracy of the GPR exploration results is guaranteed, it is judged that it can be used to improve the location accuracy of the underground space integration map.

KEYWORDS : *Underground Space Integration Map, Underground facilities, GPR exploration, Accuracy improvement*

서 론

1. 연구의 배경 및 목적

도심지 지반 침하로 인하여 피해가 증가하는 상황에서 국토교통부에서는 지반 침하 사고 예방 및 체계적인 지하 안전관리를 위하여 지하에 매설된 시설물, 구조물, 지반정보 등으로 구성된 지하공간통합지도를 2015년부터 구축하고 있다. 이 사업은 2023년까지 전국 모든 지역을 대상으로 구축하는 것으로 목표로 진행되고 있다(Park *et al.*, 2018). 국토교통부에서 전국적으로 구축을 추진하고 있는 지하공간통합지도는

그동안 보안적, 기술적 요인으로 행정망 내의 국가기관과 지방자치단체에서만 활용할 수 있어 그 활용성이 매우 제한되어 있었다. 그림 1은 지하공간통합지도가 현장에서 활용되지 못하는 점과 지하공간에서의 사고로 인한 긴급대처가 되지 못하는 본 연구의 배경 및 필요성을 나타낸다. 건설현장의 신속한 긴급상황 대처를 위하여 현장에서는 스마트 기기와 현장 무선통신을 이용한 모바일 기반의 실시간 현장안전관리 프레임워크를 구축하여 관리하는 연구가 수행되고 있다(Park *et al.*, 2013). 최근의 도심지에서 지하 안전에 관한 이슈가 증가하고 있어 더욱 정확한 지하시설물의 관리 필요성이 대두되고 있으며, 지하시설물 탐사 현장 및 건설(굴착)

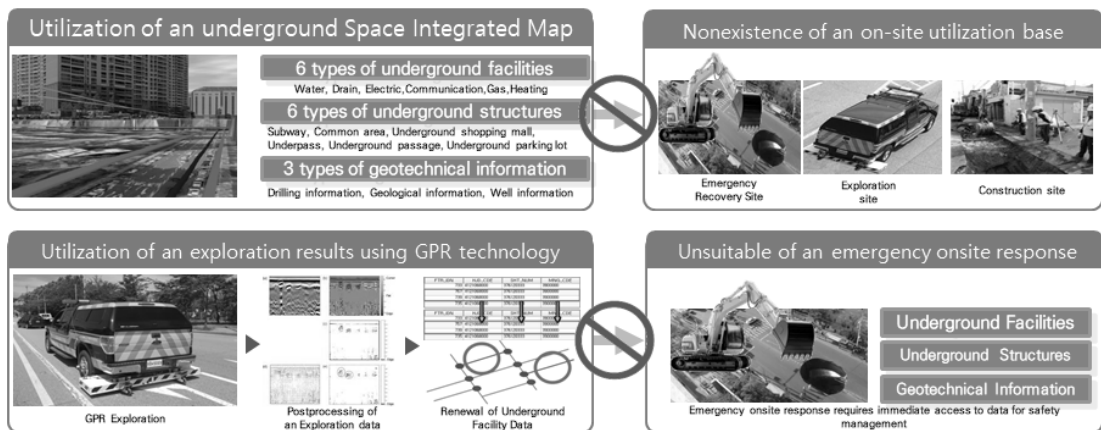


FIGURE 1. Background and necessity of the study

현장에서의 지하공간통합지도 활용이 매우 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 지하공간통합 지도를 현장에서 실시간으로 활용하고, 현장에서 취득하는 GPR 탐사 성과로부터 지하시설물의 공간정보를 쉽게 취득하며, 취득한 지하시설물 공간정보와 인근 위치의 지하공간통합지도의 공간정보를 상호 비교하는 기법을 통해 지하공간통합지도의 위치 정확도를 간접적으로 확인하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 『지하공간통합지도 갱신 자동화 및 굴착 현장 안전관리지원 기술개발』 연구사업의 2세부 『지하공간통합지도 현장 활용기술 개발』 연구 중 단위과제인 『탐사 현장 지하공간통합지도 실시간 활용 기술 개발』 연구에 속하며, 총 4차년도에 걸쳐 추진되는 연차 추진 연구 단계의 1차년도 연구에 해당한다. 또한, 본 단위과제는 실시간 지하공간통합지도 활용 기반 지하

정보 탐사 현장 지원 시스템을 개발하는 것을 최종 목표로 추진하고 있으며, 본 연구에서는 2-2 세세부 성과인 지하공간통합지도의 3차원 지하시설물 객체와 2-1세세부의 성과인 GPR 탐사 성과로부터 추출 및 구성하는 3차원 지하시설물 공간정보의 상호 간 위치를 비교하는 프로토타입 프로그램을 개발하여 지하공간통합지도 데이터와 탐사 성과의 정확도를 검토하기 위한 기초자료로 활용하였다. 그림 2는 본 연구의 최종 목표 및 범위를 나타낸다.

3. 연구에 활용한 소프트웨어

지하공간통합지도 3차원 객체와 GPR 탐사 성과로부터 추출한 3차원 공간정보의 상호 위치 비교 분석을 개발하기 위해 Visual Studio 2019, .Net C#을 사용하였다, C# OpenGL 라이브러리인 OpenTK(Open Toolkit library) 4.0을 적용하여 공간정보 처리를 수행하였으며, 이를 가시화하기 위해 GGViewer API를 사용

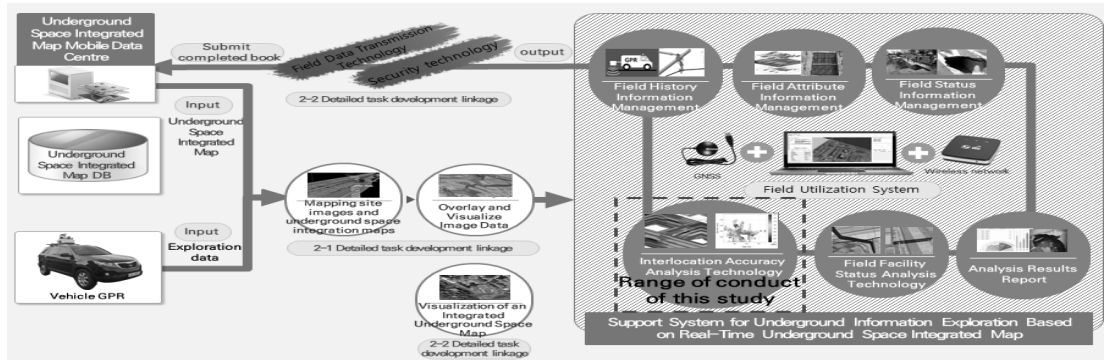


FIGURE 2. The final goal of the unit task and the scope of this study

TABLE 1. Software used for processing spatial information

division	Software	type	version	remark
Development program	Visual Studio	.Net C#	2019	development language
3D spatial information processing	OpenTK	dll	4.0.0	C# OpenGL Library
Visualization of integrated underground space map	GGViewer	dll	1.1.0	2-2 sub details Underground space integration map on-site support client API
Save 3D spatial geometry	Postgresql PostGIS	DBMS	9.5.6 9.3	Open Source DBMS

하였다. 처리한 3차원 공간정보의 저장을 위해 Postgresql 9.5 및 PostGIS 2.3을 사용하였다. 표 1은 본 연구에서 공간정보 처리를 위해 사용한 소프트웨어를 나타낸다.

상호위치 정확도 분석 모듈 개발

1. 지하공간통합지도의 3차원 객체 형태

지하공간통합지도 현장 지원 클라이언트 API는 지하공간통합지도 모바일 데이터센터에서 glTF 형태로 서비스한다. glTF의 기본구조는 “https://www.khronos.org/glTF/”에서 나타내는 것처럼 scene, node, mesh, camera, skin, material, accessor, texture, bufferView, animation, sampler, image, buffer로 구성되며, 지하공간통합지도의 경우 scene, node, mesh, bufferView, buffer로 구성되어 이를 JSON 포맷으로 GGViewer.dll에 전달하고 가시화한다.

GGViewer를 통해 전달받아 가시화되는 지하 시설물 객체의 공간정보는 vertices, normals, indices로 구성되어 있으며, vertices는 객체의 3차원 vertex를 구성하고, normals는 법면의 방향을 제공하며, indices는 vertex의 인덱스

정보를 가지고 있다. 이를 3차원상에서 가시화하게 되면 그림 4와 같다.

2. GPR 탐사 성과 데이터 형태 및 탐사성과 객체 추출

본 연구사업의 2세부 『지하공간통합지도 현장 활용기술 개발』 중 2-1세세부 연구의 단위 과제 “3D 정밀 지하정보 수집 및 통합데이터 처리 기술 개발”을 통해 현장에서 수집되는 GPR 탐사 성과는 CSV 형태로 수집된다. GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사는 전자기파 (Electromagnetic wave) 중 고주파를 탐사 장비에서 방사시켜 반사되는 신호의 속도, 세기 등을 통해 목표물의 위치와 성질을 파악하는 레이더 탐사법을 지하 공간에 적용한 기술이다 (Travassos *et al.*, 2018). GPR 탐사는 비접촉 물리탐사 방법의 일종으로 관측을 통해 지하 매질물, 공동 등을 탐지할 수 있다. 지하매질을 다라 전자파가 확산하기 때문에 전파되면서 습득되는 속도나 주파수에 따라 매질 층의 두께 및 위치정보를 습득할 수 있다. 2-1세세부 연구를 통해 현장에서 취득한 자료는 그림 5와 같이 GPR 탐사 단면을 구성한다.

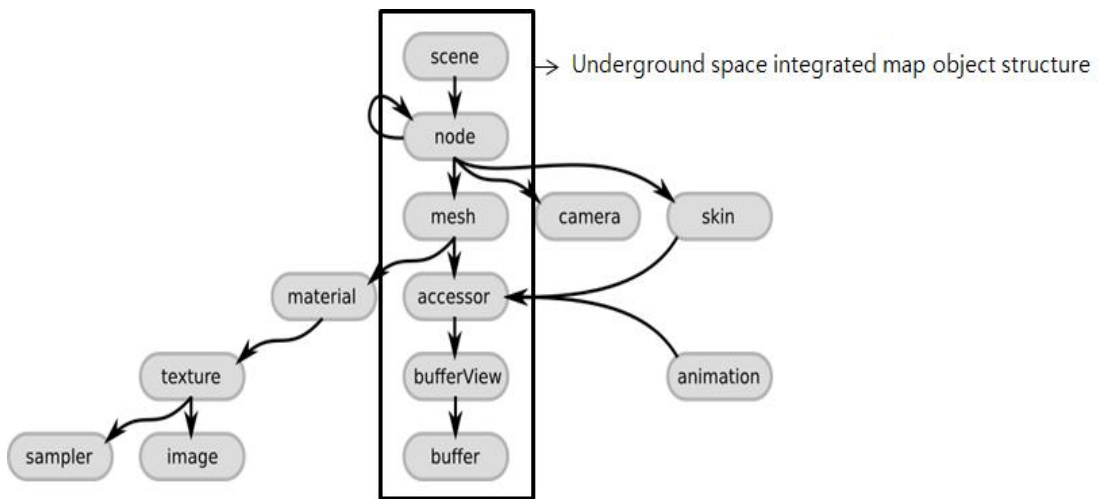


FIGURE 3. Structure of an underground space integration map object in glTF format

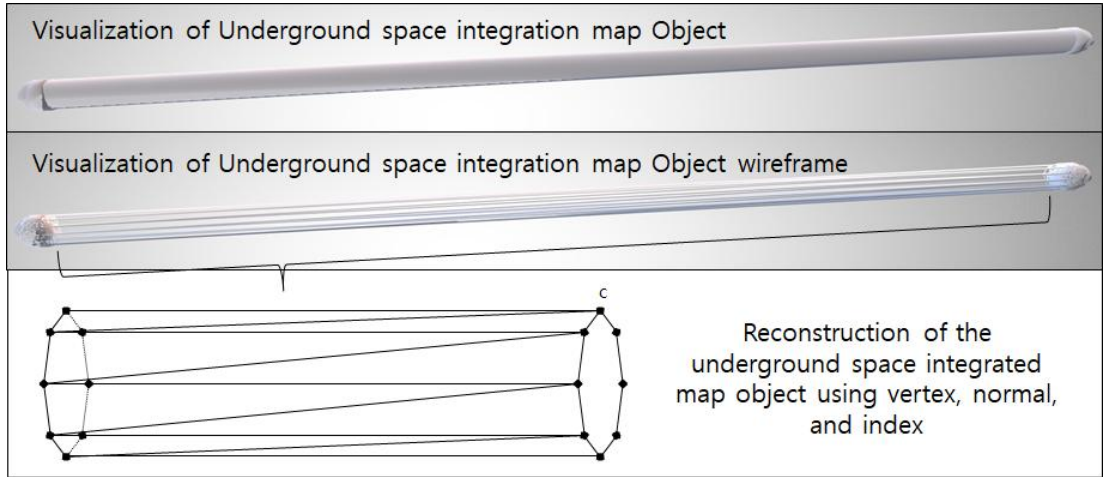


FIGURE 4. Reconstruction of underground space integrated map object

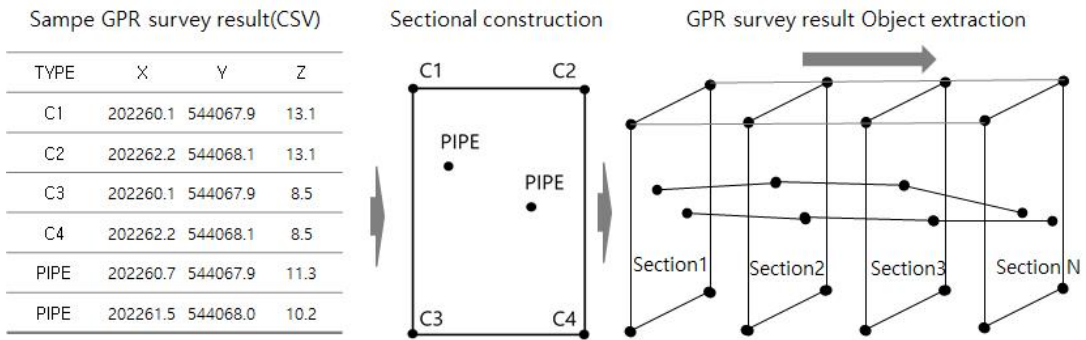


FIGURE 5. GPR survey result Object extraction

3. 탐사단면과 지하공간통합지도의 교차 관계와 교차점 계산

탐사 단면을 기준으로 단면을 확장하여 지하공간통합지도 지하시설물 객체를 분할하면 절단 평면과 교차하는 삼각형 메쉬와의 경계점들을 계산하여야 한다. 먼저 삼각형 메쉬의 정점들이 절단 평면에 의해 양분되는지는 교차 관계를 계산하여 알 수 있다. 예를 들어 그림 6과 같이 a, b, c로 이루어지는 삼각형 메쉬에 대하여 절단 평면인 section의 교차점을 구할 때 절단 평면의 방정식을 식 1이라고 한다면 메쉬의 세 정점 a, b, c의 좌표를 평면의 방정식에 대입하여 O1, O2 점과 같이 교차 관계를 알 수 있다

(Lee et al., 2015).

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{1}$$

식 1의 x, y, z를 평면상의 점, A, B, C를 평면에 대한 법선 벡터, D를 법선벡터의 길이로 두면 평면상의 점 C1, C2, C3의 3차원 좌표로부터 연립방정식 행렬식으로 변환하고 식 2와 같이 A, B, C, D 값을 구한다.

$$O_{(x, y, z)} = a_{(ax, ay, az)} + u(c_{(cx, cy, cz)} - a_{(ax, ay, az)}) \tag{3}$$

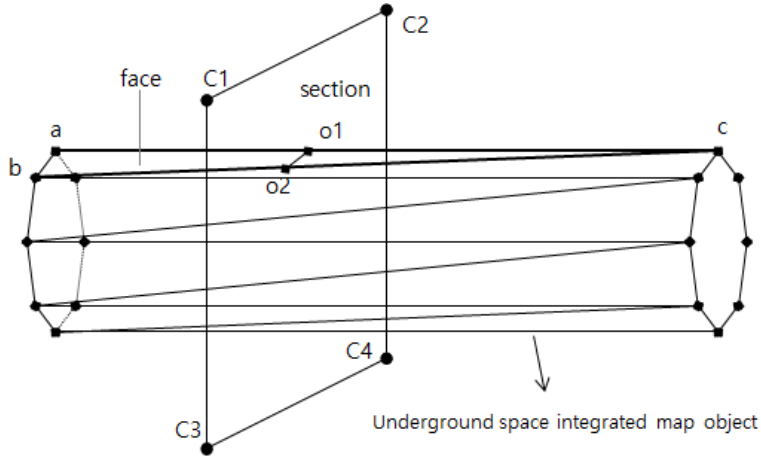


FIGURE 6. GPR survey section and underground space integration map object intersection extraction

$$\begin{aligned}
 A &= c1_y(c2_z - c3_z) + c2_y(c3_z - c1_z) + c3_y(c1_z - c2_z) \\
 B &= c1_z(c2_x - c3_x) + c2_z(c3_x - c1_x) + c3_z(c1_x - c2_x) \\
 C &= c1_x(c2_y - c3_y) + c2_x(c3_y - c1_y) + c3_x(c1_y - c2_y) \\
 -D &= c1_x(c2_y \times c3_z - c3_y \times c2_z) + c2_x(c3_y \times c1_z - c1_y \times c3_z) + c3_x(c1_y \times c2_z - c2_y \times c1_z)
 \end{aligned} \tag{2}$$

식 3의 O 를 평면상의 점, a 는 정점 a 의 좌표, c 는 정점 c 의 좌표로 두면 u 의 값을 구할 경우 점 O 의 좌표를 구할 수 있다. 이를 위해 식 3을 식 1에 대입하여 식 4로 전개한 후 u 를 정리하면 식 5가 된다.

$$\begin{aligned}
 A(a_x + u(c_x - a_x)) + B(a_y + u(c_y - a_y)) \\
 + C(a_z + u(c_z - a_z)) + D = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$u = \frac{Aa_x + Ba_y + Ca_z + D}{A(a_x - c_x) + B(a_y - c_y) + C(a_z - c_z)} \tag{5}$$

식 5와 같이 u 값을 구하게 되면 u 값이 0에서 1 사이의 값일 경우 식 3을 이용하여 O 점의 좌표를 얻기 위해 지하공간통합지도 객체의 전체 삼각형 메쉬에 대하여 단면과의 교점좌표를 연산하고 $O1 \sim On$ 까지의 교점 좌표를 추출한다. 여기서 추출한 $O1 \sim On$ 까지의 교점좌표 중 가장 큰 z 좌표를 가진 점의 좌표를 관상교 좌표($U1 \sim Un$)로 취득하여 탐사 성과 객체 추출 좌

표점($P1 \sim Pn$)과 함께 그림 7과 같이 식 6을 이용하여 dx , dy , dz , 및 Δd 를 계산한다.

$$\begin{aligned}
 dx &= ABS(u_x - p_x) \\
 dy &= ABS(u_y - p_y) \\
 dz &= ABS(u_z - p_z) \\
 \Delta d &= \sqrt{(u_x - p_x)^2 + (u_y - p_y)^2 + (u_z - p_z)^2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

이상과 같이 정의한 계산식을 바탕으로 지하 공간통합지도 객체와 GPR 탐사 성과 객체 간의 위치정확도 비교 분석 모듈을 그림 8과 같이 모듈 클래스를 설계하고 지하공간통합지도 연계 현장 활용 서비스 프로토타입 프로그램을 개발하였다.

4. 강남역 주변 현장 실증 탐사성과 및 지하 공간통합지도 객체 비교 결과

본 연구를 통해 개발한 지하공간통합지도 연계 현장 활용 서비스 프로토타입 프로그램을 사

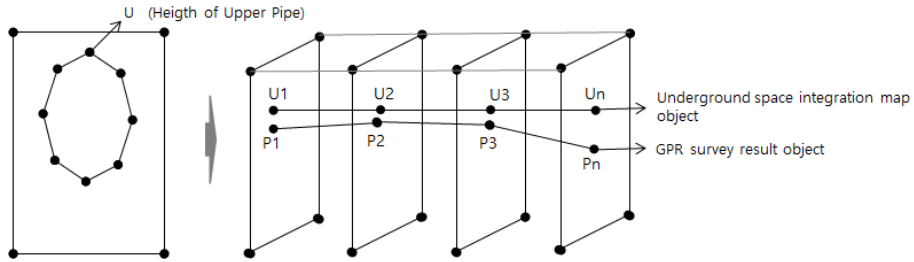


FIGURE 7. Extraction of height of Upper pipe of Underground space integration map Object and GPR survey Object position analysis

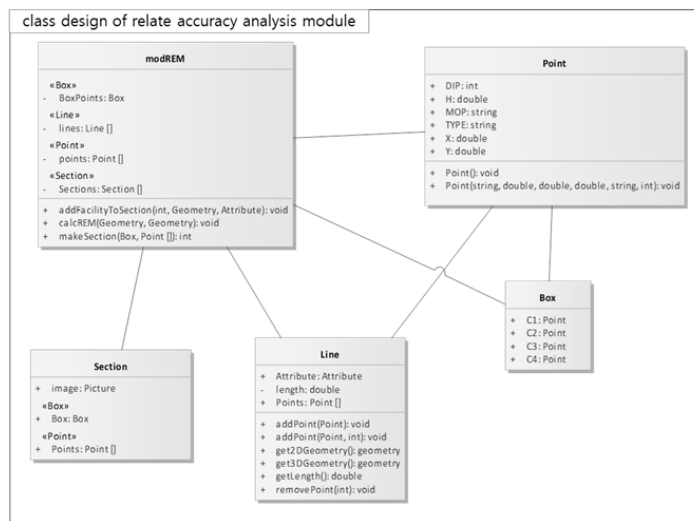


FIGURE 8. relate accuracy analysis module class design

용하여 그림 9와 같이 강남역 주변 일부 구간 (Loc.1. 서울 서초구 서초동 1380, Loc.2. 서울 서초구 서초동 1739-1)에 대하여 현장 활용성 검증을 위한 GPR 탐사 성과와 지하공간통합지도의 위치 정보를 비교한 결과 표 2와 같이 나타났다.

현장 실증 위치 두 지역에 대하여 GPR 탐사 성과로부터 생성한 지하시설물 객체와 인접한 지하공간통합지도 객체 간의 상호 위치 비교를 통해 지하공간통합지도의 위치 정확도를 확인하고, 이를 통해 측량성과의 속성정보를 효율적으로 추출 반영할 수 있는 기초 판단자료로 활용할 수 있었다.

두 지역 모두 단면 1~단면 5까지 모든 단면

에서 지하공간통합지도와 GPR 탐사 성과 객체 간의 위치 오차를 산출할 수 있었으며, 상호 비교 분석 결과 Loc.1의 단면 1에서 최대 0.844 m, 단면 5에서 최소 0.101m, Loc.2의 단면1에서 최대 0.879m, 단면3에서 최소 0.799m의 위치 오차가 보였다. 표 2는 현장 실증 위치에서 GPR탐사 성과로 생성한 객체 위치와 지하공간통합지도 객체간의 상호 위치 값을 나타낸다. 국토교통부의 공공측량 작업규정(국토지리정보원 고시 제2018-1076호) 제132조에 의하면 지하시설물 측량기기(탐사기기)의 정확도 기준은 금속관로 탐지기의 경우 평면위치 0.2m, 깊이 0.3m이며, 비금속 관로탐지기의 경우 평면 위치 0.2m, 깊이 0.4m로 기준으로 삼고 있다.

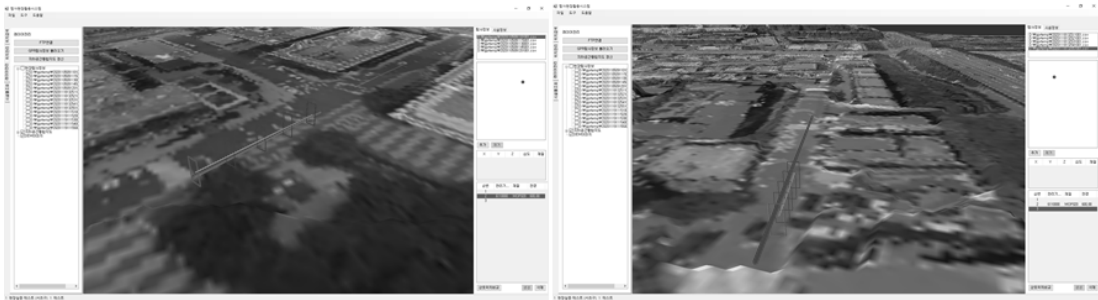


FIGURE 9. Field verification test with portotype program
 ※ The source if “prototype program execution screen capture” R&D report

TABLE 2. Accuracy comparison of underground space integrated map object and GPR survey result object

No.	Underground space integration map Object (m)			GPR Survey Result Object (m)			error (m)				
	x	y	z	x	y	z	dx	dy	dz	Δd	
L o c a l 1	Sec.1	202265.223	544072.343	10.7	202265.815	544072.792	11.1	0.592	0.449	0.400	0.844
	Sec.2	202262.843	544078.819	10.7	202263.283	544079.156	10.9	0.440	0.337	0.200	0.589
	Sec.3	202260.463	544085.294	10.7	202260.751	544085.518	10.8	0.288	0.224	0.100	0.378
	Sec.4	202258.083	544091.770	10.7	202258.223	544091.886	10.7	0.140	0.116	0.000	0.182
	Sec.5	202255.702	544098.245	10.7	202255.688	544098.250	10.6	0.014	0.005	0.100	0.101
L o c a l 2	Sec.1	201883.005	543785.312	20.6	201883.741	543785.578	20.2	0.736	0.266	0.400	0.879
	Sec.2	201884.062	543781.772	20.7	201884.802	543781.902	20.3	0.740	0.130	0.400	0.852
	Sec.3	201885.118	543778.231	20.8	201885.784	543778.417	20.4	0.666	0.186	0.400	0.799
	Sec.4	201886.014	543775.068	20.9	201886.739	543775.101	20.5	0.725	0.033	0.400	0.829
	Sec.5	201886.910	543771.905	21.0	201887.577	543772.093	20.6	0.667	0.188	0.400	0.800
Avre.							0.501	0.193	0.280	0.625	
RMSE							0.544	0.232	0.300	0.668	

본 연구에 사용된 GPR탐사 장비의 성과는 향후 테스트베드의 정확도 검증을 통해 공공측량 성과 기준을 만족할 경우 지하공간통합지도 갱신에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

탐사 현장 지하공간통합지도 실시간 활용을 위하여 지하공간통합지도 연계활용 서비스 프로토타입 프로그램을 개발하였으며, 현장 실증 테스트를 통해 프로그램의 정확도 분석 결과 및 활용성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 지하공간통합지도와 GPR 탐사 성과로부터 추출한 객체 간의 위치 오차를 산출할 수

있는 프로토타입 프로그램을 개발하였다.

둘째, 본 연구에서 개발한 프로그램을 활용하여 분석한 결과 현장 실증 지역에서 최소 0.101m, 최대 0.879m, 평균 0.625m, RMSE 0.668m의 위치 오차를 확인하였다.

셋째, 현재 개발된 프로토타입 프로그램의 상대 위치 산출 결과를 토대로 단면 간격의 조정 기능 및 거리 오차에 따른 지하시설물 종류의 일치 여부를 판단하는 기능이 추가로 필요할 것으로 판단되어 차년도 연구에서 고도화에 적용할 계획이다. 추후 지속적인 연구를 통해 GPR 탐사 성과의 정확도가 보장될 경우 지하공간통합지도의 위치정확도 개선에 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 탐사 현장에서의 지하공간통합지도 활용에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.



REFERENCES

- Lee, W.B., W.Y. Hao, B.P. Kyung and S.H. Ryu. 2015. Dismantling Simulation of Nuclear Reactor Using Partial Mesh Cutting Method for 3D Model. *Journal of Digital Convergence* 13(4):303-310 (이완복, 학문원, 경병표, 유석호. 2015. 3D 형상 모델의 부분 절단 기법을 이용한 원자로 해체 시뮬레이션, 디지털융복합연구 13(4):303-310).
- Park, D.H., Y.G. Jang and H.S. Choi. 2018. A Study on the Construction Plan of 3D Geotechnical Information for the Support of Underground Space Safety, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(1):23-34 (박동현, 장용구, 최현상. 2018. 지하안전관리 지원을 위한 3차원 지반정보 구축 방안 연구, 한국지리정보학회지 21(1):23-34).
- Park, M.S., E.J. Kim, H.S. Lee, K.P. Lee and S.W. Suh. 2013. Real Time Safety Management Framework at Construction Site based on Smart Mobile, *Korean journal of construction engineering and management* 14(4):3-14 (박문서, 김의준, 이현수, 이광표, 서상욱. 2013. 스마트모바일 기반의 실시간 현장안전관리 프레임워크, 한국건설관리학회 논문집14(4):3-14).
- Travassos, X.L., S. L. Avila. R. L. da S, Adriano and N. Ida. 2018. A Review of Ground Penetrating Radar Antenna Design and Optimization, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* 17(3):385-402.
- The Khronos Group Inc. 2020. `glTF-2.0-reference-guide`. <https://www.khronos.org/developers/reference-cards/> (Accessed March 11, 2020).