

3차원 지하시설물 가공 및 부분갱신 자동화 기술개발*

– 지하공간통합지도 중심으로 –

이민규^{1*} · 최성식² · 전흥수¹ · 김성수³

Development of 3D Underground Utilities Processing and Partial Update Automation Technology*

– Focused on 3D Underground Geospatial Map –

Min-Kyu LEE^{1*} · Sung-Sik CHOI² · Heung-Soo JEON¹ · Sung-Su KIM³

요 약

도시가 확장되고 지하시설물 관련 공사가 늘어남에 따라 지하시설물 관로 네트워크를 3차원으로 분석할 수 있는 기술이 절실히 요구되고 있다. 국내에서는 2015년부터 15종의 지하정보(지하 시설물, 지하구조물, 지반)를 3차원 기반 지하공간통합지도로 구축하는 사업을 진행하고 있다. 하지만 현재 3차원 지하시설물 구축은 수작업 기반으로 구축 방법이 매우 복잡하고 지자체별 수백 만 건이 넘는 대용량 데이터를 처리하기에는 시간과 비용이 많이 발생한다. 본 논문은 3차원 지하 시설물 모델의 가공 및 갱신 자동화 구축 프레임워크를 제시함으로써 3차원 지하시설물 모델을 최소비용으로 신속하게 구축하는 방안을 수립하였다. 본 연구에서 개발된 지하시설물 가공 및 부분 갱신 자동화 기술들은 지하공간통합지도 구축사업에 즉시 현장적용이 가능할 것으로 기대한다.

주요어 : 3차원, 지하시설물, 가공 자동화, 갱신 자동화, 지하공간통합지도, 지하공간

ABSTRACT

As cities expand and underground utilities construction projects increase, there is an urgent need for a technology capable of analyzing the underground utilities network in 3D. Since 2015, 3D Underground Geospatial Map project, that has been integrating 15 types of underground information such as underground utilities, underground structures,

2020년 09월 11일 접수 Received on September 11, 2020 / 2020년 10월 26일 수정 Revised on October 26, 2020 / 2020년 10월 28일 심사완료 Accepted on October 28, 2020

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

1 아이씨티웨이(주) 책임연구원 Senior Researcher, Division of SI2

2 아이씨티웨이(주) 선임연구원 Assistant Researcher, Division of SI2

3 아이씨티웨이(주) 수석연구원 Principal Researcher, Division of SI2

* Corresponding Author E-mail : mklee@ictway.co.kr

and ground information, is in progress in S. Korea. However, the construction of 3D underground facilities is currently based on manual work and the logic for building a 3D model is very complicated. And it takes a lot of time and cost to process millions of large amounts of data per local governments. By presenting a framework on the processing and partial updating of the 3D underground utilities model, this paper aims to establish a plan to quickly build a 3D underground utility model at a minimum cost. The underground utilities processing and partial update automation technologies developed in this study are expected to be immediately applied to the 3D Underground Geospatial Map project.

KEYWORDS : 3D, Underground Utilities, Processing Automation, Partial Update Automation, 3D Underground Geospatial Map, Underground Space

서 론

상·하수도, 송유, 난방, 전기, 통신, 가스 등 지하시설물 관리는 인간의 생존 활동에 꼭 필요한 것을 운반하기 위한 중요한 시설물이다(Balogun *et al.*, 2011). 하지만 지하시설물 위치의 부정확성으로 인한 문제는 오랫동안 공공 서비스 붕괴, 건설프로젝트 지연에 따른 과다비용 발생, 재산피해, 인명피해 등과 같은 많은 문제를 발생시킨다(Li *et al.*, 2015). 지하시설물과 관련된 사고의 주요한 문제는 2차원 데이터 오류와 2차원으로 표시된 지하시설물 지도를 잘못 이해하는 데서 비롯되는 것과 같이 현장 작업자들 사이에서 소통이 적절히 이루어지지 못해서 일어난 경우이다(Fenais *et al.*, 2019). 이러한 문제로 인해 미국에서만 한해 5만 건의 지하시설물 파손 발생이 일어나고 있고(Talmaki *et al.*, 2013). 2016년 지하시설물 사고로 인한 사회적인 비용은 1.5억 달러로 예측되었다(Lyle, 2017). 국내에서는 2014년 석촌호수 주변 중대형 싱크홀 발생 계기와 도심지 지하시설물 노후화로 인한 끊임없는 지반침하 발생 문제로 인하여 중앙정부 차원에서 싱크홀(지반침하) 예방 대책 정책을 발표하였다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2014). 그리고 1994년 아현동 도시가스 폭발사고, 1995년 대구 달서구 상인동 지하철 가스 폭발사고, 2018년 KT 아현지사 통신구 화재, 2018년 일

산 백석역 온수관 파열 사고 등은 국민에게 막대한 인적·물적 피해를 가져다준 대표적인 국내 지하시설물 피해 사례이다. 이러한 지하시설물 피해를 예방하기 위해서는 지하시설물 사고 원인을 먼저 살펴볼 필요가 있다. 과거에는 대부분 2차원 기반으로 지하시설물을 관리하였지만, 2차원 지하시설물 지도는 데이터가 불충분(관경 및 심도값 부재)하거나 위치가 부정확한 때도 있으므로 굴착공사 시 지하시설물 파손사고 및 공사 기간 지연에 따른 추가 건설비용을 발생시키기도 한다(Olde Scholtenhuis *et al.*, 2018). 2차원 지하시설물 지도에서는 다양한 종류의 관로가 중첩되기 때문에 관로를 구분하기가 거의 불가능하다(Du Y and Zlatanova, 2006). 지하시설물의 위치는 지반조건에 따라 서도 변화한다. 제수지역(Dewatering Area)의 점토와 이탄층(Clay and Peat Layer)은 지반침하(Soil Settlement)를 발생시켜 시설물의 위치를 변화시키기 때문이다(Olde Scholtenhuis, 2018).

3차원 지하시설물 모델은 복잡한 지하시설물의 네트워크 구조를 이해하는 데 도움이 된다(Li *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2019). 지하공간 설계 시 엔지니어들이 지하공간 설계가 가능한 지하공간을 확인하거나, 관로 간에 물리적 충돌을 방지하기 위해 기존 시설물 위에 3차원 모델을 중첩하여 분석할 수 있다(Li *et al.*, 2015). 도시가 확장되고 지하시설물 공사가 늘어남에 따라 지하 관로 네트워크를 3차원으로 분석할

수 있는 기술이 절실히 요구되고 있다(Balogun, *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2019). 국내에서는 2015년부터 6종(상수도, 하수도, 통신, 전력, 가스, 난방)의 지하시설물 정보를 포함하는 15종의 지하정보(지하시설물, 지하구조물, 지반)를 3차원 기반으로 통합한 지하공간통합지도 구축 사업을 진행하고 있다. 하지만 현재 3차원 지하시설물 구축작업은 수작업 기반으로 3차원 모델 구축 로직이 매우 복잡하고, 지자체별 수백만 건이 넘는 대용량 데이터를 처리하기에는 시간과 비용이 많이 발생한다. 이러한 이유로 인해 제한된 시간 내에 고품질을 확보하기는 어려움이 따를 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 지하의 객체를 상세하고 정확하게 표현할 수 있는 3차원 관로 모델링 기술이 필요하다. El-Hakim(2008)은 이러한 모델이 가져야 할 5가지 필수적인 모델의 특징을 다음과 같이 기술하였다. ① 렌더링(Rendering)한 3차원 모델의 해상도는 인간의 시각으로 분간되어야 한다. ② 수집 데이터는 최대한 오류가 없고 정확성이 높아야 하며 그렇지 않으면 이후 가공 프로세스에서 부정적인 영향을 준다. ③ 모델링 툴(Tool)은 프로젝트 기간 내에 완벽히 수행될 수 있도록 고도로 자동화되어야 한다. ④ 3차원 데이터는 상세한 내용을 담으면서도 효율적인 데이터 크기를 가져야 한다. ⑤ 전체적으로 모델링 비용은 경제적이어야 한다.

본 연구에서는 3차원 지하시설물 객체의 모양과 위치를 최대한 실세계와 같이 구현하고, 구현된 지하시설물 객체가 즉시 DB에 갱신 반영되는 기술과 관련된 3차원 지하시설물 가공 및 갱신 자동화 프레임워크를 제시하였다. 연구 목표는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째, 지하시설물 2차원 데이터를 3차원 데이터로 자동 변화시키는 3차원 지하시설물 가공 프로세스를 수립하였다. 자동가공 프로세스에서 3차원 지하공간통합지도 구축 작업규정(지하시설물)의 심도 및 환경 우선순위를 고려한 심도·환경 자동산정 알고리즘 적용 3차원 구축 자동프로그램을 개발하였다. 둘째, 3차원 지하시설물 지도 부분갱신 자동화 프로세스를 수립하였다. 부분갱신

자동화 연구에서는 변경된 지하시설물 객체를 추출한 후 추출된 객체를 3차원으로 가공하여 변경객체만 신속하게 갱신(업데이트)되도록 부분갱신 자동화 프로그램을 개발하였다.

선행연구 고찰

1. 국내연구 동향

국내 초창기 3차원 지하시설물 분야 연구는 지하시설물의 3차원 가시화를 위한 3차원 공간 데이터 설계 및 파일 변환시스템 개발부터 시작되었다(Oh *et al.*, 1996; Ahn *et al.*, 1997). Oh *et al.*(1996)은 3차원 공간객체의 형식과 객체 저장 구조를 정의하고, 3차원 공간객체 변환시스템을 ARC/INFO 매크로 언어인 AML(Arc Macro Language)와 C++ 언어를 사용하여 구현하였다. Ahn *et al.*(1997)은 Oh *et al.*(1996)의 3차원 데이터 정의 및 3차원 모델 변환 모듈과 동일한 방식으로 구현된 지하시설물 3차원 관로 모델 생성기와 2·3차원 시각화, 속성정보 검색 등으로 이루어진 OpenGL 기반 시각화 모듈을 개발하였다.

WWW(World Wide Web)는 네트워크 사용자가 전 세계의 분산된 정보를 쉽고 빠르게 접근할 수 있도록 하는 매우 효과적인 정보 공유의 형태를 제공함으로써 GIS 분야에서도 인터넷 GIS라는 개념이 제시되었으며, 1990년대 중반 이후부터 웹기반 응용 소프트웨어의 개발이 폭발적으로 확산되었다(Shin *et al.* 2002; National IT Industry Promotion Agency, 2011). 웹과 GIS를 결합한 인터넷 GIS 확산은 일반 사용자들이 웹을 통하여 비싼 GIS SW 프로그램을 구매하지 않고도 브라우저 등을 통해 GIS 애플리케이션을 사용할 수 있는 장점이 있다(Kim *et al.*, 2000). 이러한 웹 기반 3차원 GIS 기술의 장점을 바탕으로 지하시설물 관리 분야에도 웹 GIS 기술 적용연구가 진행되었다(Shin *et al.* 2002; Oh *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2008). Oh *et al.*(2000) and Lee *et al.*(2008)는 웹상에서 지하시설물 데이터의 3차

원 시각화 및 능동적인 조작 및 관리·분석이 가능한 3차원 지하시설물 관리시스템을 JAVA와 VRML(Virtual Reality Modeling Language)로 구현하였다. VRML은 가상 현실 언어로 기존의 HTML이 텍스트와 이미지 위주로 구성이 되어 이를 대체할 새로운 규약으로 제정되었으며 장면 그래프(Scene Graph)라는 구조를 이용하여 3차원 콘텐츠를 표현한다(Shin *et al.* 2002). Lee *et al.*(2008)는 OGC(Open Geospatial Consortium) SEW(Sensor Web Enablement)과 같은 3차원 웹서비스 국제표준과 CityGML과 유사한 국내 3DF-GML 3차원 객체 포맷 표준을 준용하는 오픈 표준기반 3차원 지하시설물 웹서비스를 연구하였다.

웹 기반 GIS 3차원 지하시설물 관리 기술 이후 근 10년 동안 진행된 국내 지하시설물의 3차원 모델링 및 분석 방법 연구 흐름은 지하시설물 관로 모델생성 기술의 확장(Kim *et al.* 2008; Lee *et al.* 2018)과 타 요소 기술들과의 융·복합적 결합이다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2012; Kim, 2011; Choi, 2018; Lee *et al.* 2018). Kim *et al.*(2008)는 지하시설물 관로 모델링 및 관리 범위를 7대 지하시설물로 확대하고 맨홀, 밸브, 측구, 물받이 등 부속시설물 등의 심볼(Symbol)을 3차원 시각화하는 데이터 관리 방안을 제시하였다. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport(2012)는 지상 및 지하시설물 통합관리를 위해 3차원 GIS 가시화 기술 및 USN(Ubiquitous Sensor Network) 데이터를 활용한 지하시설물 관리 기술개발 연구를 진행하였다. Kim(2011)은 RTK 시스템과 3차원 게임엔진을 사용하여 실시간 지하 매설물의 각종 정보를 조회 및 3차원 가시화할 수 있는 시스템 개발을 연구하였다. Choi(2018)는 최소한의 변수만을 데이터로 불러들여서 이를 3차원으로 구현 및 수정하는 변수모델링 기반의 지하시설물 3차원 시각화 구현 및 활용에 관한 연구를 진행하였다. Lee *et al.*(2018)는 기 구축된 공간정보를 3차원으로 자동변환하기 위한 3차원 스타일링 정보를 관리하는 AR 클라우드 서버와 서

버로부터 객체의 정보 및 3차원 스타일링 정보를 수신받아 증강현실로 표현하는 AR 애플리케이션 시스템을 구현하였다.

2. 해외연구 동향

해외 3차원 지하시설물 연구 동향은 1) GIS와 CAD를 활용한 3차원 모델 시각화 연구, 2) 웹, 모바일 증강시스템을 활용한 3차원 지하시설물 모델 시각화 연구, 3) CityGML Utility ADE 데이터 모델을 기반으로 한 3차원 지하시설물 관리 연구, 4) 확률 기반의 불확실성 관로 모델 시각화 연구등과 같이 4가지 주요 연구 흐름의 경향을 띠고 있다.

2000년 초반부터는 GIS와 CAD를 활용한 3차원 모델링 연구(Balogun *et al.*, 2011; Du Y and Zlatanova, 2006; Carlo and James, 2014)가 진행되었다. Du Y and Zlatanova(2006)는 OpenGL 혹은 Direct3D 언어를 사용해서 객체 묘사에 증점을 둔 3차원 표출방식과 차별화하기 위해 시맨틱(Semantic) 형태의 속성정보를 이용한 공간 DBMS(Data Base Management System)에서 속성정보를 관리하고 CAD 소프트웨어에서 3차원 모델링 및 편집을 할 수 있는 시스템을 설계하였다. Balogun *et al.*(2011)은 GIS 프로그래밍(ArcScene)을 통해서 관로를 먼저 모델링하고 VRML 및 CAD 프로그램(3D Studio Max)을 활용한 3차원 가시화 프레임워크를 제시하였다. Carlo and James(2014)는 고속도로 설계에서 GPR 데이터로 지하시설물 위치(x,y,z)를 획득하고 CAD 포맷으로 추출된 데이터를 3차원 CAD로 가시화하는 방법을 연구하였다.

웹 기술과 모바일 증강기술 플랫폼 적용과 활용을 위한 3차원 지하시설물 연구(Guerrero *et al.*, 2013; Fenais *et al.*, 2019)도 진행되었다. Guerrero *et al.*(2013)는 장면 그래프 구조를 통한 3차원 가시화 기술을 X3D, X3DOM, WebGL 등과 같은 웹서비스 방식에서 각각의 3차원 모델링 성능을 테스트한 후 웹기반 3차원 모델링 최적화 방안을 제시하였다. Fenais *et*

al.(2019)는 지하시설물 관로 속성정보를 클라우드 시스템(Cloud System)에서 관리하고 3차원 정보 표현을 위해 구글어스의 KML(Keyhole Markup Language) 파일을 모바일 GIS-AR 증강시스템에서 활용할 수 있도록 프로그램을 구현하였다.

2차원 데이터의 위치 정확성 오류를 최소화하기 위한 확률 기반의 3차원 관로 모델링 연구도 진행되었다. Li *et al.*(2015)는 지하시설물 위치 데이터 취득과 관리를 위해 GPR, GPS, GIS를 하나의 시스템으로 통합하고 데이터 정확성 개선을 위해 3차원 불확실성 확률 밴드 모델을 연구하였다. Olde Scholtenhuis *et al.*(2018)는 CityGML Utility ADE 모델을 바탕으로 관로 라인과 관로 원통형 모양을 확률기반의 퍼지(Fuzzy) 형태로 계산하여 위치 불확실성 관로 모델을 제시하였다.

CityGML을 지하시설물 관로 네트워크에 확장시킨 CityGML Utility ADE(Becker, 2011) 데이터 모델 기반 지하시설물 3차원 관리 연구도 진행되었다(Olde Scholtenhuis *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019). Yan *et al.*(2019)는 시설물 관리 및 토지 행정을 위해 LADM(Land Administration Domain Model)과 CityGML Utility Network ADE 모델을 통합한 3차원 지하시설물 관리 3차원 데이터 모델을 제시하였다.

3. 시사점

국내외 연구 동향을 통해 3차원 지하시설물 모델 연구의 주요 흐름은 심도값 부재, 환경값 부재, 상이한 데이터 취득 방법(상대·절대 위치 좌표 혼용, 수직 기준계 미적용) 등과 같이 2차원 데이터 모델의 데이터 오류의 정확성을 높이기 위해 확률(Probability) 기반의 3차원 관로 모델 연구가 진행되고 있음을 확인하였다. 또한, 단편적이고 일률적인 3차원 객체 묘사에서 지하시설물을 표준데이터 모델화하고 네트워크화시키는 3차원 데이터 모델 개념(CityGML Utility ADE)을 활용하여 지하시설물 3차원 관리에 적용하고 있다. 이러한 지하 표준데이터

모델은 향후 관로 분석뿐만 아니라 지상 및 지하 객체를 하나로 통합하여 통합적인 시뮬레이션 및 다양한 공간 분석이 가능하도록 한다. 끝으로 GPS, GPR, 클라우드 시스템, AR 등 이기종의 기술들과 융복합한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 융복합 기술들은 지하시설물의 위치 정확성을 한 단계 더 높여주고 있으며 사용자가 복잡한 지하시설물 관로 네트워크를 더욱더 쉽게 이해할 수 있도록 도움을 준다.

연구방법 및 결과

1. 3차원 지하시설물 가공 자동화 기술개발

3차원 관로 생성은 2차원 평면 선분(Horizontal Segment)에서 수직 요소를 생성하거나 수직 요소를 계산하여 표현할 수 있다. 예를 들어, 2차원 평면 선분에서 수직점(Vertical Point)이 추가되어 3차원 모델에서는 해당하는 수직점에 대한 선분 값이 생성되게 된다(Du Y and Zlatanova, 2006). 또한, 관로 심도값은 지형의 높이 노드 값에서 관로의 높이 노드 값을 뺀 값으로 나타낸다(Du Y *et al.* 2006). 모든 관로의 끝점(End Point)은 3차원 객체로 가시화하기 위해 사용된다(Du Y *et al.* 2006). 관로의 심도값은 상대높이 값으로 취득된 관로의 심도높이 값을 절대 높이 값으로 재계산할 필요가 있다. 아울러 3차원 관로 모델 제작에 필수적인 심도값 계산 방법은 관로의 모델링 방식에 따라서 심도 재계산 방식이 결정될 수도 있다(그림 1). 즉 3차원 관로 모델링 시 관로의 맨 위 끝점에서 아래 방향으로 3차원 관로 모델링 방식을 따르게 되면 지형의 높이(H)에서 심도값(d)을 차감하는 계산식을 적용한다(식 1). 만약 3차원 모델을 관로의 중심점에서 생성하는 방식을 고려하면 지표의 높이(H)에서 심도값(d)과 환경(D)의 1/2 값을 차감해야 한다(식 2).

$$Z: H-d \quad (1)$$

$$Z: H-d-D/2 \quad (2)$$

(Z): 심도 재보정 값

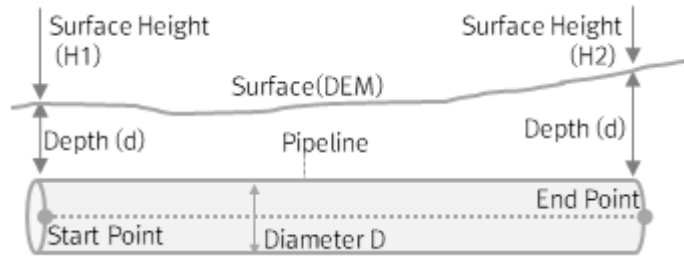


FIGURE 1. Recalculation of pipeline depth applied by DEM altitude value

(H): 지표 높이

(d): 심도

(D): 관경

본 연구에서는 지하공간통합지도 작업규정 (National Law Information Center, 2018)

기반의 심도값과 관경값을 자동산정하는 알고리즘을 적용한 3차원 지하시설물 가공 자동화 프로그램을 구현하여 실제 지하공간상의 관로의 형상을 정확하게 표현하고자 하였다. 3차원 관로 모델은 지하시설물 DB에서 지하시설물 위치 및 평면 구조를 나타내는 2차원 데이터와 상기

TABLE 1. Layer types of 3D utilities

Section	Layer Type	Form
Service Water	Service Water Pipe	Line
	Service Water Manhole	Point
	Variable Flow Facility	Point
	Service Water Pipe Depth	Point
	Wide Area Service Water Pipe	Line
	Wide Area Service Water Manhole	Point
	Wide Area Service Water Variable Flow Facility	Point
Sewage	Wide Area Service Water Pipe Depth	Point
	Sewage Pipe	Line
	Rectangular Sewage Pipe	Point
	Sewage Manhole	Point
Electric Power	Sewage Pipe Depth	Point
	Electric Power Pipe	Line
	Electric Manhole	Point
	Power Distribution Tunnel	Line
Gas	Electric Power Pipe Depth	Point
	Natural Gas Pipe	Line
	Gas Valve	Point
Heating	Gas Pipe Depth	Point
	Heating Pipe	Line
	Heating Manhole	Point
Communication	Heating Pipe Depth	Point
	Telecommunication Pipe	Line
	Telecommunication Manhole	Point
	Telecommunication Pipe Depth	Point

TABLE 2. Average depth value in the absence of undetected area and depth data (Unit: m)

Service Water (Wide Area)	Sewage	Electric Power (Distribution)	Gas	Heating	Communication
1.2 (3.0)	2.0	1.5 (5.0)	1.0	1.7	0.7

시설물이 매설된 깊이를 나타내는 심도 데이터 및 시설물 입체 구조를 정의하는 데 필요한 속성 데이터를 3차원 지하시설물 관로 생성기를 통해서 생성된다. 3차원 관로 생성기(Dynamic Link Library, DLL)는 NET Standard 2.0 기반으로 개발하였고, 개발언어는 C#을 적용하였다. 3차원 지하시설물 모델생성을 위해서는 우선 아래 표 1과 같이 관로별 Shape 파일과 DEM 파일이 필요하다. 원본 데이터에서 메타정보를 읽어 가공처리 환경을 설정한 후 심도값과 DEM 값을 이용하여 관로 높이(Z) 값을 식 1과 같이 재계산한 후 관경, 관종류, 높이 값을 적용한다. 심도·관경 알고리즘 적용 이후에는 가공 대상 관로에 대한 3차원 모델 파일(3DS)과 3차원 모델과 속성정보를 연결한 3차원 Shape 파일을 생성한다.

3차원 관로의 속성 정확성을 향상하기 위해 지하공간통합지도 구축 작업규정의 심도 및 관경 우선순위를 고려하여 심도·관경 자동산정 알고리즘을 개발하였다. 심도의 우선순위는 ① 심도레이어의 심도값 ② 관로레이어의 심도값 ③ 인접 시설물의 심도값 ④ 시설물별 법적 기준 심도값 순(표 2)으로 적용한다. 단, 시설물별 법적 기준 심도값은 지하시설물 별 평균심도를 적용한다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2014).

관경의 우선순위는 ① 관로의 관경이 있는 경우, 관경값 ② 인접관로의 관경이 있는 경우, 인접 관경값 ③ 자치구에서 가장 많은 비중의 관경값 ④ 관용도 속성에 통상적인 관경값이 있는 경우, 관용도 속성값을 적용한다. 그림 2는 지하공간통합지도 구축 작업규정 기반의 심도 우선순위를 고려하여 작성된 심도 보정 알고리즘이다. 먼저 알고리즘은 모든 타입의 관로를 검색하게 된다. 심도 레이어가 있는 경우 심도 레

이어의 심도값 필드의 속성값을 관로 끝점에 입력이 되고, 만약 관로의 타입이 하수관일 경우 하수관로 레이어의 시점 심도와 종점 심도값을 부여하게 된다. 실제 심도값이 없을 경우는 가상 심도값인 인접관로 값 혹은 자치구 평균심도값을 부여한다.

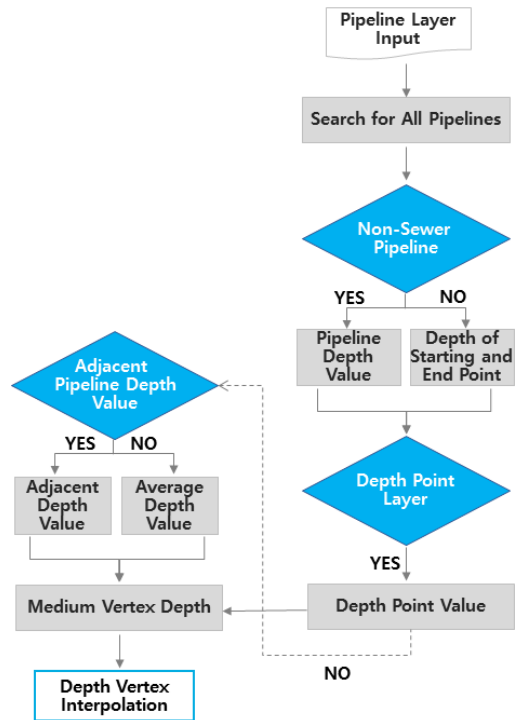


FIGURE 2. Automatic calculation algorithm for pipe depth

그림 3에서는 지하공간통합지도 구축 작업규정 기반의 관경 보정 알고리즘을 나타내고 있다. 관경 보정 알고리즘은 관경 속성값이 0 이거나 단위 적용 입력의 오류 등에 의한 관경 오류가 있을 경우, 관경 속성값을 체크하고 인접

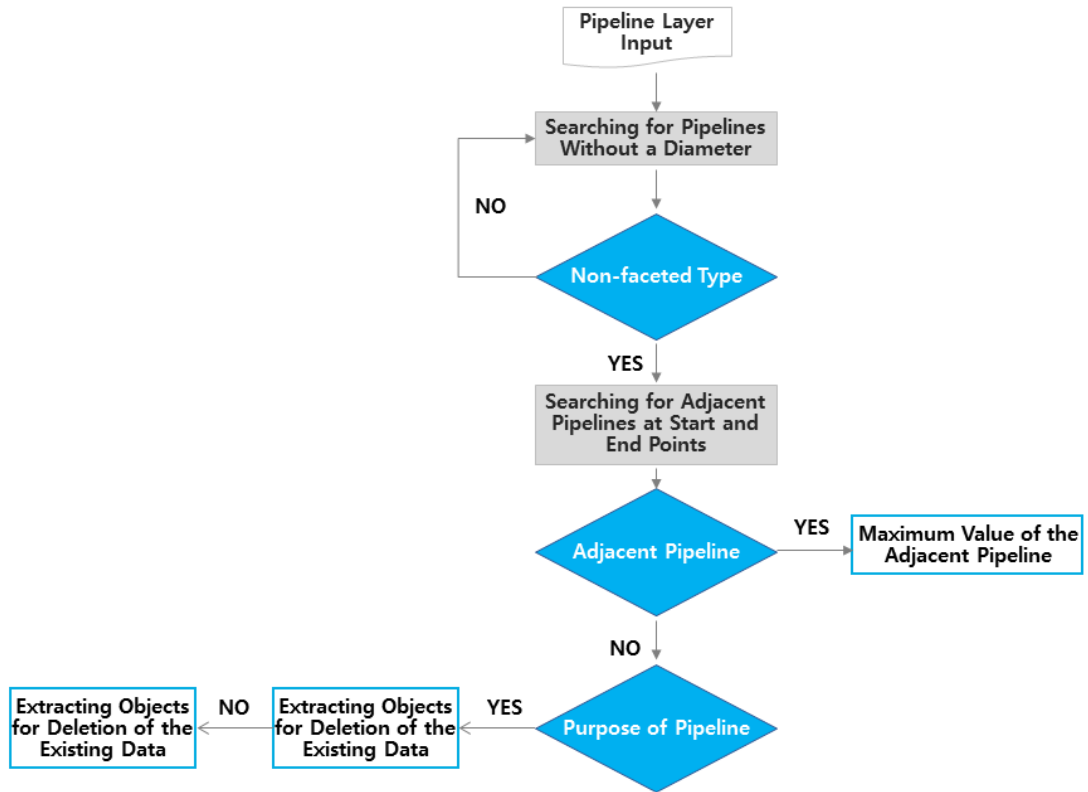


FIGURE 3. Automatic calculation algorithm for pipe diameter

관로 검색 후 공간연산(Intersect)을 통하여 인접관로의 관경을 적용한다. 인접관로의 관경값은 인접관로의 최대값을 부여한다. 만약 인접관로가 없을 때는 자치구의 가장 많은 비율의 관경값 혹은 통상적인 관용도 관경값을 부여한다.

아래 그림 4는 심도 및 관경 보정 알고리즘을 적용하여 3차원 관로 모델을 가시화한 모습이다. 좌측 화면은 관로에 동일한 표준심도가 적용되어 실제 지하시설물의 실세계를 반영하지

못한 모습이며, 우측 화면은 정확한 심도와 관경 값을 보정하여 실세계와 가장 유사한 3차원 지하시설물 관로 모델을 구현하였다.

3차원 지하시설물 가공 자동화 기술개발에서는 2차원 데이터의 심도 및 관경 값의 부재와 오류를 최소화하기 위한 지하공간통합지도구축 작업규정 기반의 심도·관경 자동화 산정 알고리즘을 개발하여 현실 세계와 가장 유사한 3차원 지하시설물 모델을 구현하였다. 하지만 3차

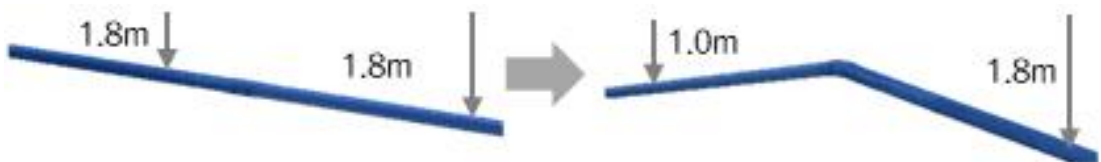


FIGURE 4. 3D underground utility model applied by automatic calculation algorithm for pipe depth and diameter

TABLE 3. Automated partial update SW of 3D underground utility model

Section	Main Functions	Remark
Renewal Data	- Renewal data extracting	
	- Reflect the extracted data to the existing DB system	
	- Save to 2D Shape file and DB system	
3D Processing	- 3D Processing	
	- 3D shape file creation	
	- 3DS file creation	
Depth Interpolation	- Pipe depth interpolation of the connection part	
	- Save to 3D Shape file and DB system	

원 데이터는 기존 2차원 데이터를 가공하여 모델을 생성하기 때문에 2차원 원시데이터가 가지는 오류를 일정 부분 내포하고 있다. 실측 심도 값과 관경 값이 없는 경우 가상 값을 활용해야 하므로 결정론적(Deterministic) 모델 방법론은 한계성을 가질 수밖에 없다. 따라서 이러한 오류들을 확률론적 기반의 3차원 모델로 해결하려는 최근 연구 사례와 방법론도 좋은 대안이 될 수 있다고 판단한다. 또한, 3차원 가공시 발생하는 다양한 위상오류 문제도 향후 극복해야 할 도전이라고 볼 수 있다. 몇 가지 대표적인 예를

들면, 3차원 가공시 관로와 맨홀이 이격되어 생성되는 오류, 관로의 끝점에 연결되지 않고 관로의 변곡점(Vertex)에 연결되는 오류, T자형 분기 관에서 이격이 발생하는 오류, 중복 데이터로 인한 3차원 모델링 중복 오류 등이 있다. 이러한 다양한 3차원 위상오류는 네트워크 분석시 정확도 확보 및 데이터 품질에 악영향을 미친다.

2. 3차원 지하시설물 갱신 자동화 기술개발

본 연구에서 개발된 지하시설물 부분갱신 자

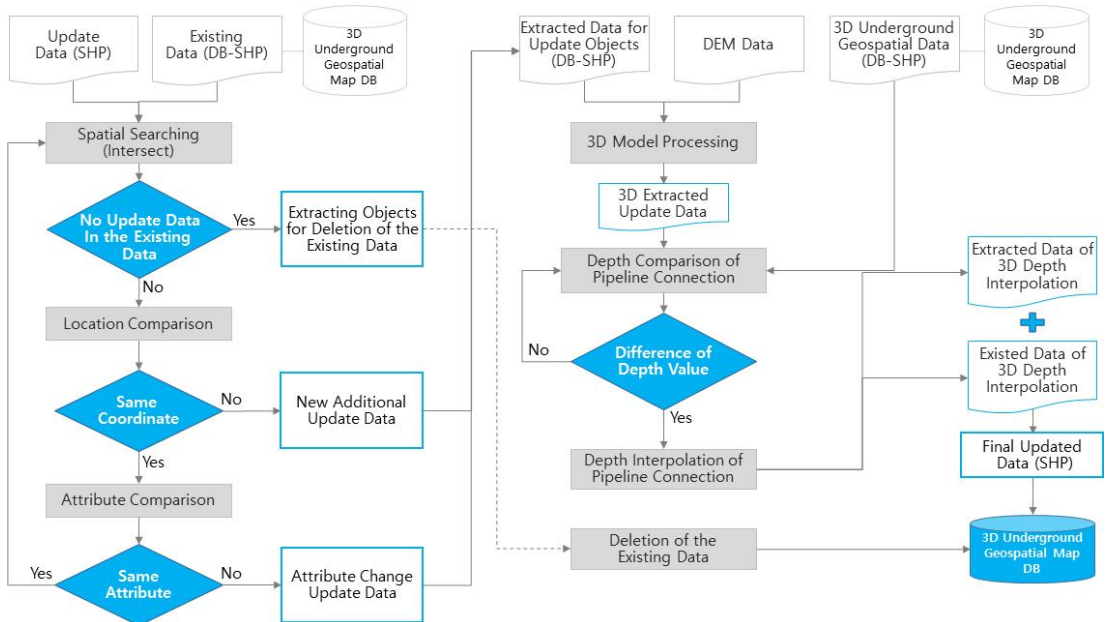


FIGURE 5. Automated process of 3D underground utilities processing and partial update of 3D underground utilities

동화 프로그램은 갱신데이터 탐지·추출 및 3차원 가공·갱신 알고리즘에 의해서 그림 5와 같이 차례대로 실행된다. 3차원 지하시설물 부분 갱신 자동화 프로그램은 갱신데이터 추출기능과 갱신데이터 3차원 가공 및 심도 보간 기능으로 구성되어 있다(표 3). 갱신데이터 추출기능은 기 구축된 데이터와 갱신 도면을 비교하여 갱신 부분을 추출하고 갱신된 관로 및 삭제 대상 관로를 추출하여 DB에 저장하는 기능을 제공한다. 갱신데이터 3차원 가공 및 심도 보간 기능은 추출한 데이터를 3차원 관로 모델 파일을 생성하고 기 구축된 3차원 관로와 새로 갱신된 3차원 관로를 자연스럽게 연결하기 위한 심도 보간 기능을 제공한다.

본 연구에서는 구리시 상수관로 데이터를 샘플 테스트로 선정하여 지하시설물 변화객체 탐지·추출 및 가공·갱신 알고리즘을 테스트하였다. 변화탐지는 공간 교차검색으로 탐지한 갱신 대상의 시·중점 좌표를 취득하여 지하공간통합지도 DB의 기 구축 데이터와 일치하는지를 검사하고, 교차검색 결과 시 두 개 이상의 객체가 나오면 시점 및 중점 위치좌표 비교를 통해서 정확한 갱신 대상을 탐지해 낸다. 변화탐지 알고리즘은 위치좌표 비교뿐만 아니라 기 구축 데이터와 갱신데이터의 속성정보 비교(그림 6)를 통하여 신규 추가 갱신데이터 및 속성 변경 갱신데이터로 구분하게 된다(그림 7). 갱신 대상

데이터는 3차원 모델생성을 위해서 2차원 Shape 파일로 변환된 후 추출된다.

갱신 대상 추출 데이터는 3차원 관로 모델 생성기를 통해서 3차원 모델 파일(3DS)과 심도 값을 포함하는 속성정보를 연결한 3차원 Shape 파일을 생성한다. 이때 아래 그림 8과 같이 갱신 추출 3차원 데이터와 기 구축 3차원 데이터의 심도 차이가 발생한다. 이를 해결하기 위해 기 구축관로의 심도, 갱신대상 관로의 보정전 심도를 평균값으로 계산함으로써 두 데이터의 심도 차이를 보정한다(그림 8). 심도 보간된 데이터는 최종적으로 3차원 Shape 파일로 변환되고 속성정보는 지하공간통합지도 DB에 저장된다.

3차원 지하시설물 가공 및 갱신은 매우 복잡한 업무 프로세스를 가지고 있지만, 본 연구에서 제시된 3차원 지하시설물 갱신체계는 복잡한 지하시설물 네트워크를 보다 효율적으로 구축·관리하는 기반 기술로서 그 의의가 있다고 볼 수 있다. 현행 지하시설물 갱신체계의 취약점을 개선하기 위해 3차원 지하시설물 부분갱신 객체 탐지·추출 및 가공·갱신 알고리즘을 개발하여 지하시설물 객체 변화 시 신속하게 갱신할 수 있는 부분갱신 자동화 기술을 개발하였다. 부분갱신 프로그램에서 나온 결과 역시 원시 데이터와 직접 관련이 있으므로 원시 데이터에 대한 정확성 검증 및 처리 과정이 선행되어야 할 필요가 있다. 또한, 부분갱신 과정에서 오류가 발

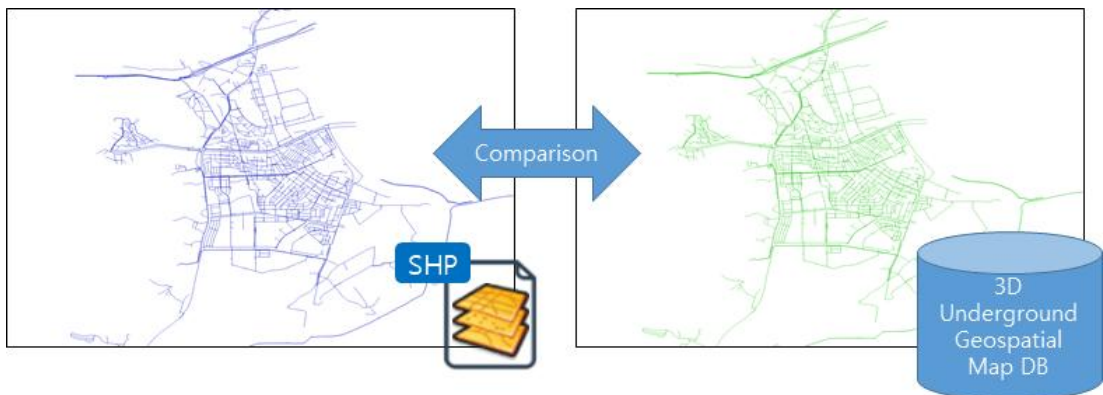


FIGURE 6. Comparison of the partial updated data(left) and the existing data(right) of 3D Underground Geospatial Map



FIGURE 7. Extracted data by comparing the partial update data with the existing data of 3D Underground Geospatial Map

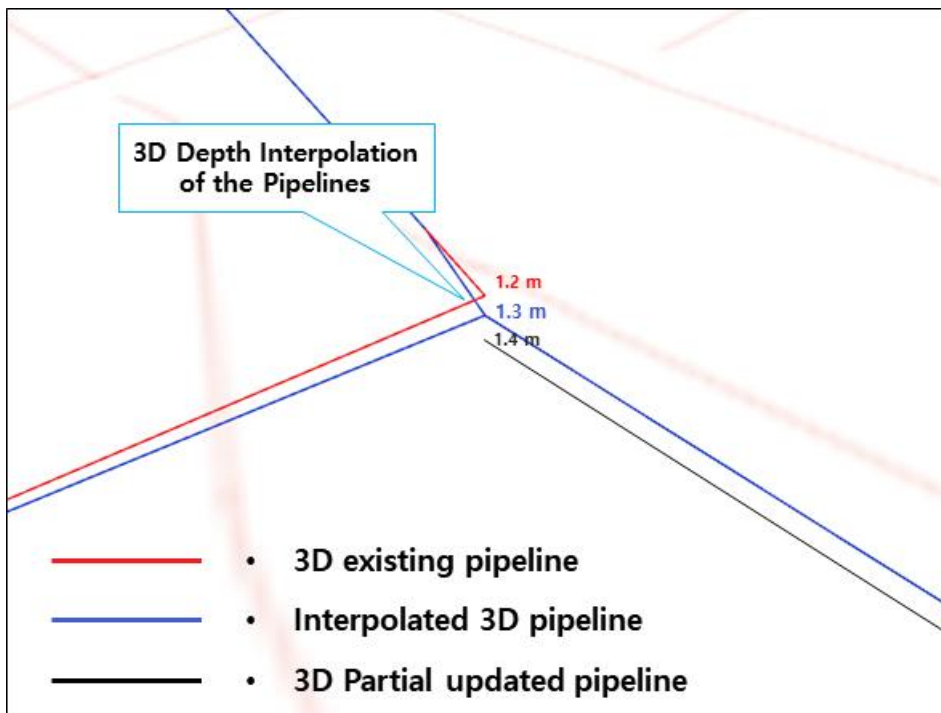


FIGURE 8. Interpolation with the average depth of the exiting and partial updated pipelines, the connection is verified naturally

생하면 처음부터 다시 시작하지 않고 바로 전 단계에서 시작할 수 있는 되돌리기 기능이 구현된다면 보다 효율적으로 부분갱신을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

도시가 확장되면서 새로운 지하개발사업이 활발해지고, 기존 노후 시설물도 점차 증가함에 따라 지하시설물에 의한 지반침하 사고와 각종 안전사고가 증가하고 있다. 특히 2차원 지하시설물 지도는 평면 위치 좌표의 오류, 상이한 데이터 취득 방법 등을 비롯하여 미숙련 현장 작업자가 복잡한 지하시설물 네트워크를 이해하지 못해 굴착공사 시 재산피해는 물론 인명피해 사고까지 이어질 수 있는 위험이 존재한다. 이를 해결하기 위해 2015년부터 3차원 지하공간통합 지도가 구축되어 운영되고 있지만, 수작업 기반의 복잡한 업무 프로세스와 방대한 데이터 처리 물량으로 인해 시간과 비용이 많이 발생하고 있다. 또한, 지하시설물 객체의 부분 변경 시 변경된 부분만 즉시 변경할 수 없으므로 부분갱신 자동화 3차원 지하시설물 구축기술이 요청되고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 3차원 지하시설물 모델 가공 및 갱신 자동화 기술을 개발하였다. 연구결과는 El-Hakim(2008)이 제안한 3차원 모델의 5가지 측면(가시성, 정확성, 자동성, 효율성, 경제성)을 고려하여 3차원 지하시설물 자동 가공 및 갱신 기술의 기여도를 다음과 같이 살펴보고자 한다. 첫째, 최종 생성된 3차원 Shape 파일은 별도의 서비스 파일로 변환하여 지하공간통합지도 제작작업 규정에서 요구하는 3차원 심볼, 관로연결부 처리, 형태구분, 색깔 텍스트 표현이 가능한 지하시설물(관로형) 세밀도 제작 기준 LOD3(Level of Detail)을 충족한다. 그리고 3차원 지하시설물 레이어 객체 형태가 일관성을 가지고 원형관로, 박스형관로 등으로 정확하게 객체를 가지화한다. 둘째, 위치 정확성은 2차원 정보를 3차원 모델과 중첩하여 위치 정확성을 확인할 수 있으며, 관로의 심도가 지하시설물 작업규정 우선순

위 (점, 관로, 인접, 평균)에 따라 반영되었는지 여부, 세계측지계(평면직각좌표, TM)와 같은 일관된 좌표계 적용 여부 등을 통해 정확성을 판단한다. 3차원 지하시설물 가공 프로그램은 세계측지좌표 적용이 가능하고 3차원 지하시설물구축 작업규정 우선순위를 기반한 심도 및 관경 자동산정 알고리즘을 통하여 정확한 3차원 위치 정확성을 제공한다. 셋째, 부분갱신 프로그램은 지하시설물 부분갱신 대상 객체탐지에서 가공 및 부분갱신 그리고 최종 지하공간통합지도 DB로 업데이트하는 전 과정을 98% 이상 자동화를 제공한다. 넷째, 현행 지하시설물 갱신체계는 지자체에서 구축된 상하수도 및 유관기관에서 구축된 가스, 통신, 난방, 전기 등을 연 2회 전체 갱신을 하며 다시 3차원 지하시설물로 전체 갱신하는 체계를 가지고 있다. 부분갱신 자동화 기술을 적용하면 효율화된 업무 프로세스로 인해, 1일 이내의 최신 지하시설물 갱신데이터 서비스가 가능하다. 다섯째, 기존 수작업 환경에서는 관로의 심도 계산 및 관로와 맨홀·벨브의 연결을 위해서는 공간분석 툴을 이용하여 심도 값을 계산하였다. 또한, 관로 간 심도 차이 연결과 인접 관로의 심도·관경 값 적용을 하기 위하여 일일이 심도 차이 연결부와 인접 관로를 찾아서 적용 여부를 확인하고 작업했지만, 심도 및 관경 자동산정 알고리즘과 심도보정 알고리즘을 통하여 수작업 대비(예; 경기도 57만 건물량 작업 시 10명 12개월 소요) 90% 이상 작업시간 단축 효과를 가진다(서버 1대 3.7개월 소요, 서버 10대 1개월 미만 소요).

끝으로 본 논문에서 제기되었던 원시데이터 정확성 문제, 3차원 위상오류, 부분갱신 프로그램 기능 고도화 등은 후속연구에서 심도 있게 논의되어 한층 무결하고 완전한 3차원 모델 생성이 가능한 3차원 지하시설물 모델 구축 연구가 되어야 할 것으로 본다. **KAGIS**

REFERENCES

Ahn, H.S. 1997. The Development of the

- Object-Oriented Data Structure and 3-D Visualization System for the Management of Underground Utilities. Master Thesis of Hanyang University, Seoul, Korea. 51pp (안응식. 1997. 지하시설물의 3차원 관리를 위한 객체지향적 데이터 구조 및 3차원 시각화 시스템 개발. 한양대학교 환경대학원 석사학위논문. 51쪽).
- Balogun, A., Matori, A. and Lawal D. 2011. Developing a framework for the 3D visualization of underground petroleum pipelines. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*. 2(2):135-139.
- Becker, T., Nagel, C. and Kolbe, T.G. 2011. Integrated 3D modeling of multi-utility networks and their interdependencies for critical infrastructure analysis. *Advances in 3D Geo-Information Sciences, Lectures in Geoinformation and Cartography*, Kolbe, T.H., Köning, G. & Nagel, C.(eds), Springer, Berlin Heidelberg, pp.1-20.
- Carlo P. and James H.A. 2014, *Advances in 3D modeling of existing subsurface utilities*. T&DI Congress, ASCE, Orlando, Florida, pp.574-583.
- Du, Y. and Zlatanova, S. 2006. An approach for 3D visualization of pipelines. In: Abdul-Rahman A, Zlatanova S, Coors V (eds) *Innovation in 3D-Geo Information System*, Springer, Berlin, Heidelberg. pp.395-404.
- Du, Y., Zlatanova, S. and Liu, X. 2006. Management and 3D visualisation of pipeline networks using DBMS and AEC software. *Proceedings of the ISPRS Commission IV Symposium on 'Geospatial Databases for Sustainable Development'*. 27-30 September 2006. Edited by: Nayak, S., Pathan, S.K. and Garg, J.K. pp.395-400. Goa, India *Archives of ISPRS* 36, (4A).
- El-Hakim, s. 2008 3-D Data modelling and visualization. *ISPRS Congress Book*, pp.311-322
- Fenais, A., Ariaratnam, S.T., Ayer, S. K. and Smilovsky, N. 2019. Integrating Geographic Information Systems and Augmented Reality for Mapping Underground Utilities. *Infrastructures* 4(4):60.
- Guerrero, J., Zlatanova, S. and Meijers M. 2013. 3D visualisation of underground pipelines: Best strategy for 3D scene creation", *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-2/W1, pp.139-145.
- Kim, K.H., Cho, H.B., Kang, B.J., Kim, M.S. and Kim I.H. 2008. Study on a 3D Visualization of Underground Facilities. *Proceedings of the 2008 Fall Conference of Geographic Information System Association of Korea*. pp.232-237 (김광호, 조홍범, 강병준, 김민석, 김인현. 2008. 지하시설물의 3D 시각화에 관한 연구. 한국 GIS학회 추계학술발표 논문집. 232-237쪽).
- Lee, H.J., Kim, J.S., Seo, H.S. and Cho, Y.S. 2018. Development of location based augmented reality system for public underground facility management. *Journal of Digital Contents Society*. (18)2:237-243 (이효진, 김지성, 서호석, 조영식. 2018. 공공지하시설물 관리를 위한 증강현실 시스템 개발. 디지털콘텐츠학회 논문지. pp.237-243).
- Lee, Y.K., Kim, M.S., Kim, K.H., Cho, H.B. and Kim. I.H. 2008. Study on a web

- services for the 3D information about a feature of underground facilities on open standards. Proceedings of the 2008 Joint Spring Conference of Geographic Information System Association of Korea. pp.327–331 (이영균, 김민석, 김광호, 조홍범, 김인현. 2008. 오픈표준 기반 3차원 지하시설물 객체정보의 웹서비스에 관한 연구. 한국GIS학회 2008년도 공동춘계학술발표 논문집. 327–331쪽).
- Li, S., Cai, H. and Kamat, V.R. 2015. Uncertainty-aware geospatial system for mapping and visualizing underground utilities. *Autom. Constr.* (53):105–119.
- Lyle, S.k. 2017. Damage information reporting tool; Common Ground Alliance: San Diego, CA, USA. (13):3.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2012. Development of urban spatial information platform for urban public facility management based on sensing data. Land Transport and Maritime R&D Report pp.1–2647 (국토교통부. 2012. 센싱데이터 기반 도시 공공시설물 관리 공간정보 플랫폼 기술 개발. 지능형 국토정보기술혁신사업 사업화·실용화 방안 최종요약보고서. 1–2647쪽).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2014. http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95074554. (Accessed August 26, 2020).
- National IT Industry Promotion Agency. 2011. <https://www.itfind.or.kr/WZIN/jugidong/1497/file25672-149701.pdf>. (Accessed August 26, 2020).
- National Law Information Center. 2018. <http://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000165613>. (Accessed August 26, 2020).
- Oh, S., Kang, B.I. and Chong, J.W. 1996. The object-oriented design and implementation of spatial data transformation system for the 3-D representation of underground utilities. Brief report of the 1996 Spring Conference of Geographic Information System Association of Korea. pp.79–109 (오승, 강병익, 정정화. 1996. 지하시설물의 3차원 표현을 위한 공간 데이터 변환 시스템의 객체 지향적 설계 및 구현. 한국GIS학회 춘계학술발표 발표요약문. 79–109쪽).
- Oh, S., Lee, Y. and Kim, I.H. 2000. Design and implementation of web-based 3-D management system for underground utilities. Proceedings of the 2000 Conference of Korea Spatial Information System Society. 3(2):125–136 (오승, 이윤, 김인현. 2000. 웹 기반 3차원 지하시설물 관리 시스템의 설계 및 구현. 2000. 한국공간정보시스템학회 2000년도 학술발표 논문집 3(2):125–136).
- Olde Scholtenhuis, L.L., den Duijn, X. and Zlatanova, S., 2018, Representing Geographical Uncertainties of Utility Location Data in 3D, *Autom. Constr.* 96:483–493.
- Shin, S.H., Ahn, K.W., Ji, H.S. and Lee, H.S. 2002. The application of web three dimensional GIS for efficient management of underground facilities. Proceedings of the 2002 Fall Conference of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography. pp.305–309 (신석효, 안기원, 지학송, 이효성. 2002. 지하시설물의 효율적인 관리를 위한 3차원 웹 GIS 적용. 한국측량학회 2002년도 추계학술발표 논문집 305–309쪽).
- Talmaki, S., Kamat, V.R. and Cai, H., 2013, Geometric modeling of geospatial data for visualization-assisted excavation.

Adv. Eng. Inform 27:283–298.
Yan J., Jaw S.W., Soon K.H., Wieser A. and
Schrotter, G. 2019 Towards an underground

utilities 3D data model for land
administration. Remote Sens. (11):1957.

KAGIS