

영상정보 기반 지하매설관 정밀 위치조사 기술 소개

Introduction to Image Processing Technology for Precise Positioning of Underground Buried Lifelines

유 병 현¹⁾ · 천 장 우²⁾ · 이 철 희¹⁾ · 이 임 평²⁾ · 이 장 근¹⁾ · 강 재 모[†]

Byunghyun Ryu · Jangwoo Cheon · Chulhee Lee · Impyeong Lee · Jangguen Lee · Jaemo Kang

Received: November 4th, 2021; Revised: November 8th, 2021; Accepted: November 19th, 2021

ABSTRACT : Underground lifelines such as water supply/sewer pipe, power cable and gas pipe are indispensable facilities to the life of urban society. These lifelines have been constructed long time ago and buried positioning information is not precisely recorded. Moreover, they have been concentrated on the narrow area and are complicatedly entangled in 3-dimension. In the fourth industrial revolution, a 3-dimensional visualization for underground lifelines is strongly required, and a database (D/B) with precise positioning information should be preceded. In this study, image processing technology for precise positioning of underground buried lifelines is introduced, which is able to build the database more accurately, efficiently and practically.

Keywords : Underground, Buried lifeline, Water supply, Sewerage pipe, Power cable, Image processing, Positioning, Visualization

요 지 : 지하에 묻혀 있는 상·하수도관, 전력시설, 가스관, 통신시설 등의 시설물들은 국민생활에 필수적인 도시기반시설이다. 이러한 시설물들의 위치 정보가 상당히 누락되어 있으며, 시설물들의 종류가 다양하고 좁은 공간에 집중적으로 매설되어 있어 3차원적으로 매우 복잡하게 얽혀있다. 4차 산업혁명과 더불어 지하 매설관의 정확한 위치정보와 속성정보들을 3차원적으로 시각화하여 전달하는 것이 요구되며, 여기에는 정확한 D/B 구축이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 지하매설관의 3차원 시각화를 위한 D/B 구축을 정확하고 경제적이면서 현장 적용이 가능한 기법을 소개하고자 한다.

주요어 : 지하, 매설관, 상수관, 하수관, 전력구, 영상처리, 위치조사, 가시화

1. 서 론

최근 들어 지속적으로 발생되고 있는 도심지 지반함몰 현상은 우리의 안전을 크게 위협하는 요소 중 하나이다. 도시화로 인한 도심개발과 기반시설의 노후화로 인한 도심지 지반함몰 발생은 점차 증가되고 있는 추세이다. 지반함몰 원인으로서는 지반굴착 시 시공불량, 상·하수관로 파손, 불량 되메움재 사용, 다짐불량 등으로 구분할 수 있다(Ryu et al., 2015). 이중 현재 국내에서 발생되고 있는 도심지 지반함몰의 주 원인으로 노후 하수관로의 손상으로 보고되고 있다(Seoul city, 2014).

정부와 지방자치단체에서는 지하공간의 효과적인 관리를 위해 상하수도관, 가스관 등의 매설 정보를 포함하는 GIS(Geographic Information System) 구축 사업을 진행하고 있다. 신규 매설관의 재질, 지름, 깊이, 경로 등에 대한 정보는 토목공학의 측량법으로 체계적으로 관리하고 있다. 그러나 기존에 매설된 관은 관련 정보가 누락되거나 관리정보가

설계와 시공에서 차이가 발생하여 실제 매설 위치와는 상이하다. 노후 상하수도관이 손상된 경우에는 수자원 손실과 환경오염을 비롯하여 심각한 경우에는 도로 하부의 갑작스런 함몰로 인한 싱크홀(sinkhole)의 발생으로 확대되기도 한다. 2014년 대구모 지반함몰 사고를 시작으로 현재까지 지반함몰 사고는 꾸준히 증가하고 있으며 지하 공간 안전을 확보하기 위한 다양한 정책이 제시되었음에도 이를 위한 기술적 해법은 부족한 상황이다.

현재 지하공간통합지도는 시설물 중심이 아닌 지하 공간 관점에서의 안전관리 체계가 마련되어 관리되고 있기 때문에 정보의 신뢰성이 떨어지며 체계적인 안전관리를 위한 활용방안이 미흡하다. 이에 따라 정부에서는 국토교통부를 중심으로 2015년~2020년까지 약 290억 원을 투자하여 전국 85개 지자체의 지하 공간 통합지도를 구축할 예정이며 지하시설물(6종), 지하구조물(6종), 지반(3종) 등 15종을 지하정보 활용시스템(지자체)과 지하정보통합관리시스템(국토부, 지도

1) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

2) Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

† Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (Corresponding Author : jmkang@kict.re.kr)

생산·배포·갱신·관리)으로 나누어 관리할 계획을 가지고 있다(Bae et al., 2020). 그러나 지하 공간 통합지도 구축 정보는 기존 지하매설물의 설치 및 유지관리 과정에서 수집된 기초 정보를 바탕으로 두기 때문에 시설물별 구조적 건전성을 판단하는데 어려움이 있다. 그 예로 2018년 실시한 지하공간통합지도 구축사업 현황 및 시설물 데이터 신뢰성을 분석한 결과에 따르면 데이터 오류율이 18~32%로 확인되어 이에 대한 대책 마련이 시급하다(Park et al., 2018). 하지만 현재 기술로 실시되고 있는 위치조사 방법은 오차가 크고 적용성에 한계가 있는 물리 탐사 기술에 의존하고 있으며 외부에 노출되지 않는 지하매설물의 특성상 시설물 상태를 주기적으로 확인하기 어렵고 확보 데이터 정확도가 낮으며, 지반과 지하수 및 주변 시설물의 영향 등 다양한 외부환경에 대한 고려가 필요해 파손 예측 및 건전성 평가 알고리즘의 신뢰성 확보에 어려움이 있다.

본 연구에서는 일반적으로 매설관 내부 손상 유무를 관측하는데 사용되는 무인 장비를 활용하여 3차원 디지털 정보화가 가능한 기술을 소개하고자 한다. 기존 조사 장비에 추가적으로 위치추적과 3차원 디지털 정보화가 가능한 스테레오 카메라를 탑재하여 경제성과 현장 적용성을 동시에 만족 가능하며, 탑재형 모듈로 다양한 장비에 탈부착이 가능한 장점을 보유하고 있다.

2. 매설관 위치조사 장비

조사 장비의 핵심은 매설관에서 구동이 가능한 소형 조사장비에 카메라를 장착하여 영상기반의 매설관 위치를 계측하는데 목적이 있다. 조사장비는 표준형 관로 촬영조사 로봇인 ROBOCAM1 모델이며, ZED 2 카메라를 설치하여 데이터를 확보하였다.

2.1 상하수관로 CCTV ROBOCAM 1

매설관 위치조사에 사용된 이동체는 ROBOCAM1(L)으로 전방 관측용 카메라(SONY SUPER HAD2 1/3인치 카메라), 스키드 전륜구동방식의 몸체, 전방 영상 관측 및 이동 컨트롤러, 몸체-컨트롤러 유선 드럼으로 크게 구성되어 있다(Fig. 1)(Lee, 2018). Table 1은 ROBOCAM1 조사장비의 상세 제원을 간략히 정리하고 있다.

2.2 정밀 위치조사 탑재 카메라

ROBOCAM 1에 탑재된 카메라의 영상으로는 정밀 위치조사에 한계가 있어 추가로 ZED 2(AI Stereo Camera) 카메라

Table 1. ROBOCAM 1 Technical Data

Division	Specification
Camera head	Dimensions: 69(W)×106(L)×63(D) mm Weight: 1.1 kg Camera: Sony 1.3 megapixel Exmor CMOS color Attached LED 6 units
Crawler	Dimensions: 228(W)×695(L)×205(H) mm Weight: 15.4 kg (excluding camera) Wheels: diameter 85mm, 115mm, 155mm
Controller	Rack's dimensions: 560 (W)×480(D)×1070(H) mm Weight: 55 kg 23U aluminum rack, 220V/60Hz Monitor: 19 inch
Cable and cable drum	Dimensions: 475(W)×555(D)×392(H) mm Weight 19.4 kg, 10P wire insertion configuration coaxial cable Cable diameter 8.5 mm, 150 meters extension (weight: 15 Kg) Traverse type auto-alignment cable drum Distance meter measurement encoder sensor installed (distance error range 0.1%)

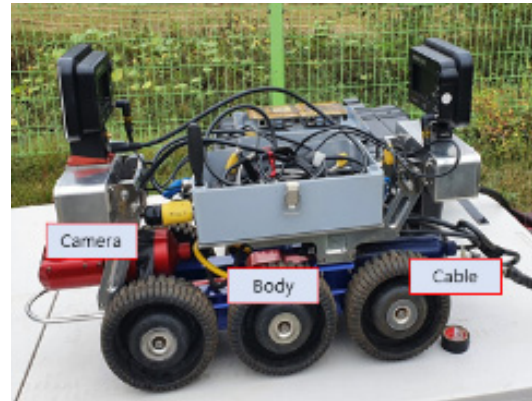


Fig. 1. ROBOCAM 1

를 탑재하였다. 매설관 내부 환경은 지상의 일반적인 환경에 비해 특징점이 적고 프레임 간 변화가 적을 가능성이 높은 환경이다. 위치 추정 기법으로 사용되는 SfM(Structure from Motion)은 특징점 검출이 위치 추정 및 매핑을 하는데 매우 중요한 과정이기 때문에 기존 모노 카메라를 이용하였을 시 이에 대한 어려움이 있다. ZED2 카메라와 같이 스테레오 카메라를 이용하였을 시 두 카메라 간의 간격을 통해서 영상에서의 깊이 정보를 추출할 수 있다. 이러한 깊이 정보는 특징점이 적은 지중 매설관 환경에서 보다 정확하게 위치 추정 및 매핑을 하는데 이용될 수 있다. 또한 ZED2 카메라는 위치 추정 및 매핑에 관한 자체 SDK 및 API를 제공하여 영상 촬영, 깊이 정보 제공, 센서 정보 제공, SLAM을 통한 위치 추정 및 매핑 등 다양한 영상 처리 및 분석 기능을 제공하므로 다른 카메라 장비보다 쉽게 이용할 수 있다.

위와 같은 이유로 ZED2 카메라를 지중 매설관 내부 환경에 적합한 영상 센서로 선정하고 파일럿 테스트에 활용하



Fig. 2. ZED 2 AI Stereo CAMERA

였다. 일반적으로 모든 카메라는 초점과 픽셀 사이지를 통해 카메라 내부 파라미터에 대한 정보를 제공한다. 그러나 ZED2 카메라는 각 해상도에 따라 초점, 주점, 왜곡요소까지 정밀하게 결정된 내부 파라미터 정보를 제공하고 있다.

3. 영상기반 위치추적 기법

촬영조사 로봇에서 취득한 영상정보를 이용하여 3차원 영상으로 복원하는 과정을 통해 매설관의 위치를 계측한다. 이를 위해 카메라 내부 파라미터를 추정하는 카메라 캘리브레이션과 3차원 영상으로 복원하는 SfM 과정을 수행한다.

3.1 스테레오 카메라 캘리브레이션

3차원의 공간상의 점들을 2차원으로 투영하여 생성되는 영상은 내부 파라미터에 영향을 받으며, 다시 3차원으로 복원하기 위해서는 이러한 영향을 제거하여야 한다. 카메라 캘리브레이션은 카메라 내부 파라미터를 결정하기 위한 과정으로 결정하는 내부 파라미터는 초점거리, 주점, 방사왜곡계수, 접선왜곡계수와 스테레오 카메라의 두 카메라 간의 간격이 있다. 본 연구에서는 영상정보만을 사용하여 매설관의 위치를 추정하고 있으므로, 내부 파라미터를 정확하게 결정하는 것은 3차원 영상으로 복원되는 결과의 정확도를 결정하는 중요한 요소이다. 카메라 캘리브레이션을 수행하기 위해서는 체스판과 같이 카메라에서 특징을 잘 확인할 수 있는 캘리브레이션 판이 필요하다. 내부 파라미터 추정을 위해서는 캘리브레이션 판을 촬영한 다수의 관측치가 필요하며, 카메라 축을 기준으로 캘리브레이션 판을 다양한 위치와 방향에서 촬영한 영상을 취득한다. 캘리브레이션 보드의 3차원 공간좌표와 2차원 영상좌표 사이의 변환 관계를 추정하여 내부 파라미터를 계산한다.

3.2 3차원 모델링

SfM은 영상의 움직임으로부터 대상을 다른 관점에서 바라보면서 3차원 영상으로 복원하는 과정이다. 2차원 영상 상에서 관측한 동일한 지점을 매칭한 결과를 공액점이라고 하며, 공액점의 영상 위치, 공액점의 지상 위치, 영상의 위

치를 공선방정식으로 통해 동시에 최적화하는 과정을 번들 조정이라고 한다. 번들조정 과정을 통해 정밀하게 결정되는 3차원 위치를 기반으로 밀도 높은 포인트 클라우드를 구성하고, 3차원 모델을 생성한다. 해당 과정을 통해 영상의 위치와 해당 과정을 통해 매설관 내부에서 취득된 2차원 영상으로부터 매설관의 3차원 형상을 다시 복원하여 매설관의 위치를 추정한다. 3차원으로 복원하는 과정에서 데이터 입력과 처리방법에 따라 크게 두 방법으로 분류할 수 있다. 취득된 모든 데이터를 동시에 추정하는 Global SfM과 취득된 데이터를 순차적으로 복원하는 Incremental SfM이 있다. 본 연구에서는 두 방법을 함께 이용한다. 먼저 매설관에서 취득한 모든 영상을 동시에 최적화하는 Global SfM 방법으로 3차원으로 복원한다. 취득할 때 사용한 스테레오 카메라의 내부 파라미터 추정 결과를 입력으로 하여 해당 과정을 수행한다. 내부 파라미터 중 스테레오 카메라의 간격은 복원되는 3차원 모델의 스케일을 결정하므로 영상기반 위치추적의 중요한 요소이다. 기하학적인 문제로 인해 모든 영상이 동시에 최적화되지 않고 일부의 영상만이 최적화되면, 최적화된 구간을 중심으로 최적화되지 않은 영상을 순차적으로 입력하여 Incremental SfM 방법을 통해 나머지 영상을 최적화한다. 3차원 복원과정을 통해 결정된 카메라의 위치/자세와 생성된 포인트 클라우드를 이용하여 3차원 모델을 생성한다. 생성한 모델로부터 매설관의 형태와 위치를 확인한다.

4. Pilot Test 실험장 구축

4.1 매설관 이동형 조사장비 Pilot Test 실증 실험장

본 연구에서 개발된 위치조사 장비의 성능을 검증하고자



Fig. 3. Preparation for field test (steel, double-wall, con'c from the left)

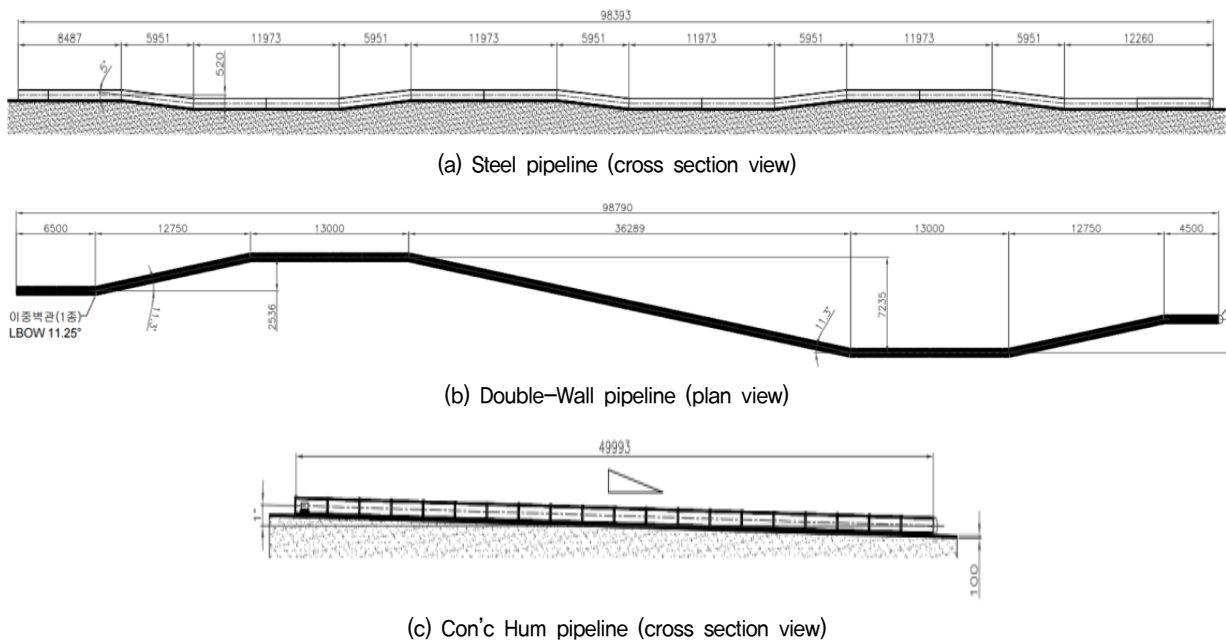


Fig. 4. Pipeline routings for 3 different material types

Table 2. Pipe specifications

Pipe	Length	Diameter	Material	KS
Steel	100m	600mm	Steel	KS D 3507
Double-wall	100m	600mm	PE	KS M 3404
Con'c Hum	50m	600mm	Con'c	KS F 4403

파일럿 테스트 현장을 구축하였다. 테스트 현장은 한국건설기술연구원 안동하천실험센터에 길이 100m, 폭 25m의 부지에 총 3개의 관종(Table 2)에 따른 다양한 선형으로 구성하였다(Fig. 3 and 4).

4.2 관종별 조건

매설관 이동형 조사장비 Pilot Test 실증 실험장은 내경이 600mm의 3종(강관, 이중벽관, 흙관)의 관을 설치하여 무인 이동체 구동시험 및 매설관 위치정보 수집 환경을 조성하였다. 실험부지의 지반의 안정성을 고려하여 원지반 보강 및 잡석을 시공하여 지반 침하에 의한 매설관의 변형이 발생하지 않도록 조치하였다.

강관은 사용압력이 비교적 낮은 증기, 물, 가스, 공기 등의 배관에 사용되는 탄소강 강관 KS D 3507를 사용하였다. 강관은 도금을 하지 않은 흑관이며, 한 분당 길이 6m, 두께 7.9mm이며, 총 길이는 100m로 연장하였다. 매설관 이동형 조사 장비의 등관능력을 평가하기 위하여 파이프의 종단면 경사를 5° 범위에서 높낮이를 조절하였다.

이중벽관은 폴리에틸렌 재질의 중공형 사각파이프를 나선형으로 용융 접합, I-Beam이 일정한 간격으로 형성하여

충격에 강하도록 제조된 관이다. 주로 아파트 및 주택 현장에 우수관으로 사용된다. 실험장 구축에 사용된 이중벽관은 한 분당 길이 6m, 두께 39mm이며, 총 길이는 100m로 연장하였다. 조사장비의 주행성 및 위치 인식을 점검하기 위해 높이 단차를 최소화하고 지표에 S자 형태로 설치하였다.

실험장 구축에 사용된 흙관은 주로 상하수도관에 사용되는 철근콘크리트관으로 조적이 치밀하고 강도가 뛰어나며 외부나 내부의 압력에도 강하다. 조사장비의 성능검증을 위해 일방향 1° 경사구배로 50m를 시공하였다.

5. Pilot Test 실험 결과

5.1 매설관 내부 영상 데이터 취득

매설관 입구에 스테레오 카메라가 전방에 탑재된 로봇을 위치시키고, 매설관 내부 영상을 취득하였다. 로봇의 이동 속도는 약 6m/min으로 유지하며 운용하였으며, 매설관 내부에 빛이 없어 영상 데이터 취득에 어려움이 있으므로 카메라 위에 LED 조명을 함께 탑재하였다. 스테레오 카메라는 30hz로 HD1080 크기의 영상 데이터를 취득하도록 운용하였으며, 취득된 영상은 Fig. 5와 같다. 매설관 내부는 타 환경에 비해 특징이 많지는 않지만, 매설관 중간과 접합부에 영상 매칭이 가능할 정도의 특징이 되는 지점들이 존재하였다. 위치 추정을 위해 사용된 영상은 전체 영상에서 5프레임 간격으로 데이터를 분리하여 사용하였다. 각 매설관에서 취득한 영상 수와 촬영시간은 Table 3과 같다.

Table 3. Data acquisition result

Pipe	# Image	Data acquisition time (sec)
Steel	11546 (5573 * 2)	962
Double-wall	12502 (6251 * 2)	1042
Con`c Hum	6932 (3466 * 2)	578

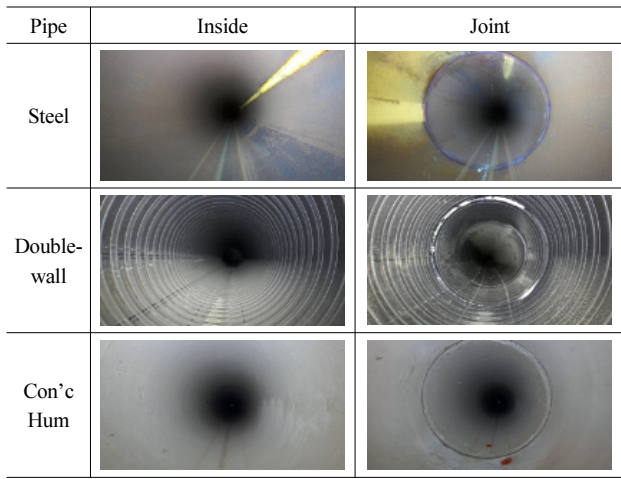


Fig. 5. Pipeline image

5.2 정확도 평가용 데이터 취득 및 처리결과

매설관 위치 추정 결과를 평가하기 위하여 매설관의 정확한 길이를 측정할 수 있도록 드론 영상을 활용하였다. DJI 사의 Phantom 4 드론을 활용하여 데이터를 취득하였으

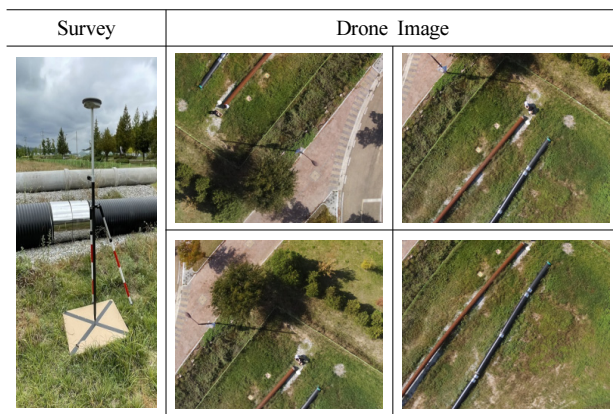


Fig. 6. Survey and drone image



Fig. 7. 3D model in test area

며, 총 99장의 영상과 영상의 위치/자세를 정확하게 추정하기 위한 기준데이터로 지상기준점 20점을 취득하였다. 지상 기준점과 드론 영상을 사진측량 소프트웨어인 Metashape을 이용해 처리하고, 실험지역 3차원 모델을 생성하였다(Fig. 6 and 7). 생성한 3차원 모델로부터 로봇이 이동한 경로를 매설관 상단의 좌표를 측정하여 계산하였으며, 로봇의 이동 거리를 측정한 결과는 97m, 97.5m, 49.2m였다.

5.3 매설관 위치 추정 결과

매설관 위치 추정을 위해 취득한 데이터를 사진측량 프로그램을 이용하여 3차원으로 복원하여 길이를 측정하였다. 3차원 복원을 위해 사용한 스테레오 카메라의 내부 파라미터를 카메라 캘리브레이션을 통해 추정하였다. 스테레오 카메라를 구성하는 2개의 카메라에 대한 초점거리(f), 주점(c_x, c_y), 왜곡계수(p_1, p_2, p_3, k_1, k_2)와 각 카메라 간의 간격(Baseline)도 함께 추정하였다. 카메라 캘리브레이션으로 추정한 결과는 Table 4와 같다.

특징점 기반 매칭으로 영상 간의 관계를 계산하고, 이를 통해 3차원 복원을 수행한다. 3차원 복원을 위해서는 영상 내의 특징점을 찾아 영상 간의 관계를 파악하여야 하며, 특징점의 수가 부족하거나 잘못된 매칭이 수행되는 경우에는 해당 영상의 부분들은 3차원 형상으로 복원되지 않는다. 본 실험장소에 설치된 강관과 흙관 내부에는 특징으로 추출될 수 있는 지점이 다수 존재하여 Fig. 8과 같이 프레임 간의 공역점의 수가 500개 이상 존재하였다.

이중벽관의 경우에는 타 관에 비해 특징이 되는 지점이 적고, 영상마다 반복되는 특징이 존재하여 공역점의 수가 다른 관에 비해 적은 수로 생성되었다. Global SfM을 수행하였을 때에도 전체 영상 중 10% 정도만 수행되었으며, 나머지 영상은 Incremental SfM 방법을 통해서 3차원 형상으로 복원하였다.

Table 4. Camera calibration result

Parameter	Camera	
	Left	Right
f	1057.54	1055.82
c_x	61.53	83.27
c_y	-8.57	-27.93
k_1	-0.0416	-0.0037
k_2	0.0092	0.0027
k_3	-0.0045	-0.0045
p_1	-0.0007	-0.0007
p_2	-0.0002	-0.0002
Baseline	120.0550 (mm)	

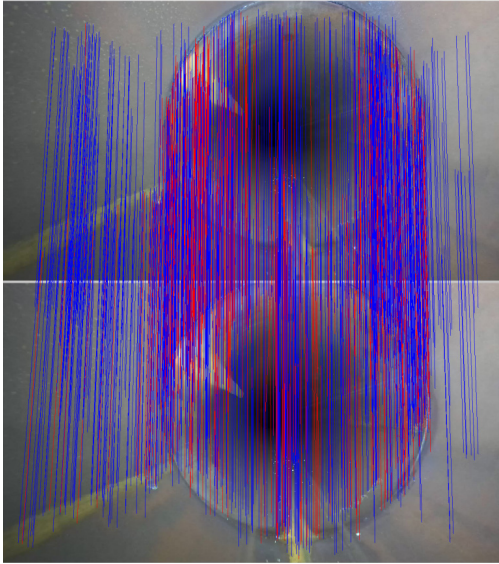


Fig. 8. Image matching result (Steel pipe)

3차원 복원을 통해 생성된 매설관 3차원 모델 결과(Fig. 9)에서 확인할 수 있으며, 입력한 모든 영상을 이용하여 3차원 형상으로 복원하였다. 생성된 결과로부터 매설관 상단의 좌표를 측정하여 길이를 측정하였으며, 길이 오차는 1.63~3.59% 범위로 확인되었다(Table 5). 흙관을 대상으로 Sfm 결과와 드론 영상으로 생성한 모델 결과를 비교하였을 때의 오차는 80cm 차이가 있었으며, 실제 길이 대비 약 1.63%의 차이를 보였다. 흙관의 약 2배의 길이를 갖는 강관과 이중벽관에서

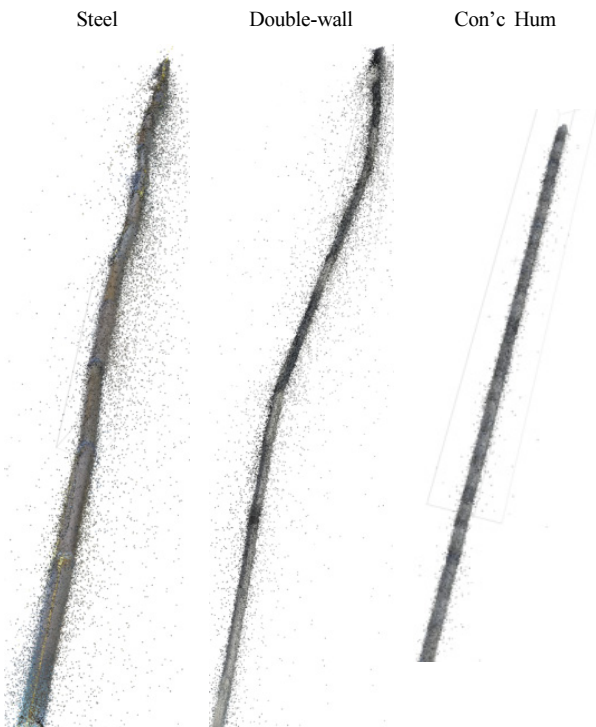


Fig. 9. Pipeline 3D model

Table 5. Pipe mapping result

Pipe	Length		Error (%)
	Truth (m)	Estimation (m)	
Steel	97	93.6	3.51
Double-wall	97.5	94	3.59
Con'c Hum	49.2	48.4	1.63

측정된 결과에서 오차율은 각각 3.51%, 3.59%였으며, 길이가 증가함에 따라 누적되는 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 외부에 노출되지 않는 지하매설물의 특성 상 시설물 상태를 주기적으로 확인하고, 영상정보를 이용하여 3차원 형상을 생성하여 매설관의 위치를 측정하는 연구를 수행하였다. 매설관 내부 손상 유무를 관측하는데 사용되는 무인 장비를 활용하여 매설관의 3차원 위치 정보를 생성할 수 있는 기술을 소개하고 실제 길이와의 비교를 통해 정확도를 확인하였다.

본 연구에서 개발된 위치조사 장비의 성능을 검증하고자 파일럿 테스트 현장을 구축하였으며, 3의 관중으로 다양한 선형으로 설치하였다. 구축된 테스트 현장에서 스테레오 카메라가 전방에 탑재된 로봇을 운용하여 매설관 내부의 영상을 취득하였다. 스테레오 카메라의 캘리브레이션 정보와 영상 정보를 이용하여 SfM 방법을 통해 3차원 형상으로 복원하여 매설관의 3차원 모델을 생성하였다. 생성된 모델에서 측정된 길이와 실제 길이를 비교하여 정확도를 평가하였으며, 약 100m 길이를 갖는 강관과 이중벽관에서는 3.5%의 오차율을 보였으며, 약 50m 길이를 갖는 흙관에서는 1.63%의 오차율을 보였다.

길이가 길어질수록 누적되는 오차를 제거하는 연구가 필요한 것으로 판단되며, 추후 연구를 통해 매설관 입구, 출구에 영상정보를 보정할 수 있는 추가적인 정보를 설정하여 누적되는 오차를 제거하는 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “지하 공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발(20210205-001)” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Bae, J. W., Bae, S. G. and Hong, S. E. (2020), A study on accuracy analysis of the underground facility data for 3D cadastre, Journal of the Korean society of cadastre, Vol. 36, No. 2, pp. 213~223 (in Korean with English abstract).
2. Lee, D. H., Jang (2018), Analysis of sewer pipe defect and ground subsidence risk by using CCTV and GPR monitoring results, JGeosynthetics Society, Vol. 17, No. 3, pp. 47~55.
3. Park, D. H., Jang, Y. G. and Choi, H. S. (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, Vol. 21, No.1, pp. 23~34.
4. Ryu, Y. S., Han, J. G., Chae, W. R., Koo, J. S. and Lee, D. Y. (2015), "Development of rapid hardening backfill material for reducing ground subsidence", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 14, No. 3, pp. 13~20.
5. Seoul city (2014), Investigation of cause for road sinkage in Seoul city, Seoul, Korea.