

지하시설물 탐사의 정확도 향상을 위한 다중센서 융합 기술 적용 사례 분석

송병진¹, 신승욱², 고유건³, 김정태⁴, 김준성⁵

¹ 한국폴리텍대학 원주 캠퍼스 의료공학과 교수

² 한국폴리텍대학 원주 캠퍼스 의료공학과 학부생

³ 한국폴리텍대학 원주 캠퍼스 의료공학과 학부생

⁴ 한국폴리텍대학 원주 캠퍼스 의료공학과 학부생

⁵ 한국폴리텍대학 원주 캠퍼스 의료공학과 학부생

bjsong@kopo.ac.kr, wwhe5400@naver.com, rhdbjrs246@naver.com, rudxo0613@gmail.com, casnuj88@gmail.com

A Case-Based Analysis of Multi-Sensor Fusion Technology for Improving the Accuracy of Underground Utility Detection

Byung-Jin Song¹, Seung-Wook Shin², Yu-Geon Koh³, Gyeong-Tae Kim⁴, Jun-Seong Kim⁵

¹Dept. of Medical Engineering, KOREA POLYTECHNICS

²Dept. of Medical Engineering, KOREA POLYTECHNICS

³Dept. of Medical Engineering, KOREA POLYTECHNICS

⁴Dept. of Medical Engineering, KOREA POLYTECHNICS

⁵Dept. of Medical Engineering, KOREA POLYTECHNICS

요 약

본 연구는 기존 지하시설물 탐사 기술의 한계를 극복하기 위해 GPR, EML, Sonde, vLoc, AML 등 5종의 탐사 장비를 융합한 복합 탐사 방식(Tetra Solution)을 제안하였다. 세종시 조치원 지역 하수도 정비사업에 본 솔루션을 적용한 결과, 비금속 관 불탐률 감소, 위치 정확도 향상, 작업 시간 단축 등 실질적인 개선 효과를 확인하였다. 향후에는 AI 기반 신호 분석 기술 및 AR/VR 실시간 시각화 플랫폼과의 융합을 통해 탐사 자동화와 작업자 시야 기반 안내 기능이 강화될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

오늘날 도시 인프라의 복잡화와 노후화는 도시 안전성과 직결되는 문제로 부각되고 있다. 특히 지하시설물은 도시기반시설의 핵심 요소임에도 불구하고, 해당 시설물의 위치나 상태에 대한 정보가 불완전하거나 부정확한 경우가 많아, 도시침수, 공사 중 파손 사고, 지반침하 등의 다양한 위험을 야기하고 있다.

국토교통부의 「지하시설물 관리지침」 [1]을 기반으로, 한국공간정보품질관리원에서 제시한 공간정보 품질기준[2]에 따르면, 최근 기후변화로 인한 국지성 집중호우의 증가와 도시 불투수면적의 확대에 의해 도시 침수 피해가 빈번히 발생하고 있으며, 이에 따라 하수도 등 지하시설물의 안전한 관리와 정밀한 위치정보 확보의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 하지만 기존의 단일 탐사 장비(GPR, EML 등)만으로는 다양한 재질과 심도를 갖는 지하시설물을 모두 정확히 탐지하는

데 한계가 있다. 특히 비금속 관로(PVC, PE 등)의 경우 불탐률이 매우 높아, 시설물 파손 및 안전사고의 주요 원인이 되어왔다. 또한 Zayed 등의 연구에 따르면, 다중센서 융합은 기존 단일 탐사기술의 한계를 보완할 수 있다 [3].

이에 본 연구는 GPR, EML, Sonde, vLoc, AML 등 다양한 탐사장비를 조합하여 복합적으로 운용하는 다중센서 융합 탐사 기술(Tetra Solution)을 적용하고, 이를 통해 지하시설물 탐사의 정확도 향상을 도모하고자 한다. 특히, 세종특별자치시 조치원 배수구역 하수도 GIS DB 구축사업 사례를 중심으로 실질적인 적용 효과와 정밀도 개선 방안을 분석함으로써, 공공 기반시설의 스마트한 유지관리를 위한 기술적 대안을 제시하고자 한다.

1-1 연구의 필요성

도시 인프라의 핵심을 이루는 지하시설물(상·하수도, 통신, 전력, 가스 등)은 도시 기능 유지에 필수적

인 요소이다. 그러나 다수의 지하시설물은 노후화되었거나, 위치 정보가 부정확하게 관리되고 있어, 굴착 공사 중 파손, 도시 침수, 지반침하 등의 도시 안전 위협 요소로 작용하고 있다.

특히 최근에는 국지성 집중호우 증가 및 불투수면적 확장으로 도시침수 피해가 반복적으로 발생하고 있으며, 이에 따라 정확한 지하시설물 탐지 및 관리 체계 구축의 필요성이 절실히 제기되고 있다.

본 연구는 이러한 문제 해결을 위해, 세종특별자치시 조치원 배수구역 도시침수예방사업을 기반으로 한 실제 적용 사례를 분석하였다 [4]. 또한 본 연구에 적용된 검증 프로세스는 Pressman 의 소프트웨어 공학 모델을 기반으로 하여 탐사 결과의 신뢰성 확보를 강화하였다 [5].

1-2 기존 탐사기술의 한계

현재 사용되고 있는 지하시설물 탐지 장비인 GPR(지표투과 레이더), EML(전자기 유도 방식) 등은 다음과 같은 기술적 제약이 존재한다:

GPR 은 토양 습도나 지층 구성에 따라 탐지 능력이 급격히 저하됨.

EML 은 비금속 관로(PVC, PE 등)에 대해 탐지가 불가능함

장비별 탐지 한계 외에도 작업자 숙련도, 주변 간섭, 신호 왜곡 등의 문제로 오탐·불탐률이 높게 나타남. 결과적으로, 특히 비금속 관로의 불탐률이 매우 높아, 사고 위험과 행정적 낭비를 초래하는 주요 원인이 되고 있음

1-3 복합 탐사 기술(Tetra Solution)의 도입 필요성

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 GPR, Sonde, vLoc, EML, AML 등 5 종의 탐사장비를 복합적으로 운용하는 Tetra Solution 방식을 제안한다.

- 장비별 강점을 조합하여 탐지 사각지대를 최소화하고,
- 관로 재질, 심도, 간섭 환경에 따라 최적 장비를 분할 적용함으로써
- 지하시설물 위치 정보의 정밀도 향상 및 공공 안전 확보에 기여할 수 있다

1-4 연구 대상 지역:세종특별자치시 조치원읍 일원

- 사업명: 도시침수예방을 위한 GIS DB 구축사업
- 적용 구간: 약 5.77km 의 하수도 관로
- 현장 특성: 비금속 관로의 비율이 높고, 기존 DB 와 실측 간 오차가 빈번

2. 다중 탐사장비 기술 개요 및 비교

2-1 다중 센서 기반 복합 탐사 개요

단일 장비의 탐사 방식으로는 다양한 재질, 심도, 지층 조건을 지닌 지하시설물을 정확하게 탐지하는

데 한계가 존재한다.

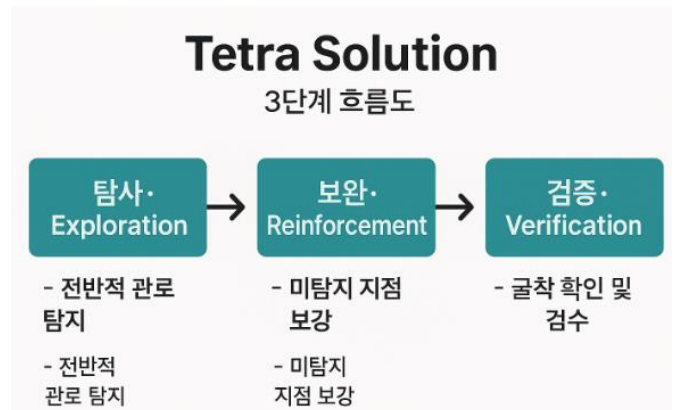
이에 본 연구에서는 <표 1> 과 같이 다음과 같은 다섯 가지 탐사 장비를 융합하여, 각각의 강점을 조합한 정확도 중심의 복합 탐사 기술(Tetra Solution)을 제안한다.

2-2 주요 장비별 개요 및 특성

장비명, 탐지 대상, 원리, 장점, 단점은 첨부된 <표 1> 과 같다.

2-3 Tetra Solution 구조 및 원리

Tetra Solution 은 지하시설물의 재질, 심도, 탐사 환경에 따라 장비를 맞춤 적용하며, 기존 탐사 정확도의 한계를 보완한다. 각 장비의 특성과 탐지 성능을 기반으로 다음과 같은 융합 운용이 가능하



(그림 1) 테트라(혼합) 솔루션 3 단계 흐름도

: 1 차 탐지: GPR 로 비금속 포함 전반적 탐지

2 차 보완: EML 또는 AML 로 금속 관 정밀 추적

3 차 정밀화: Sonde 또는 vLoc 로 신호 보강 및 오차 확인

(그림 1) Tetra Solution 3 단계 탐사 흐름도와 같이 각 장비의 기능을 단계별로 구성하여 보완 정확도를 향상시킴.

장비명	탐지 대상	원리	장점	단점
GPR (Ground Penetrating Radar)	금속 및 비금속관	지표투과형 레이더	고해상도, 비금속 가능	습한 지반에서 감쇠, 해석 난이도
EML (Electromagnetic Locator)	금속 관로	전자기 유도 방식	신속한 탐지, 널리 활용	비금속 불탐, 간섭에 민감
Sonde	비금속관 내부	발신기 삽입 방식	비금속 대응, 정확도 높음	관 내부 진입 필요
vLoc	금속 관로	전위차 기반	다주파, GPS 통합 가능	비금속 불탐, 장비 고가
AML (Acoustic Magnetic Locator)	금속성 구조물	자기장 기반	조작 간편, 탐색 범위 넓음	주변 금속 간섭에 민감

<표 1> 장비별 특징

2-4 3 단계 필터링 탐사 체계

본 연구에서는 <표 2> 와 같은 3 단계 필터링 구조를 적용하여 탐사 신뢰도와 오차 검증 체계를 강화하였다.

단계	탐사 장비	목적	기대 효과
1단계	GPR, EML	초기 위치 탐지	비/금속 여부 파악, 오탐 선제 차단
2단계	Sonde, AML, vLoc	신호 정밀화	중첩구간 해소, 불탐 영역 보완
3단계	육안 검수, 드론, 굴착 확인	최종 검증	좌표 보정, 공간 DB의 신뢰도 향상

<표 2> 3 단계 탐사 프로세스 및 기능

각 단계는 GPR→Sonde→굴착 확인의 순으로 정밀도를 점차 보완하는 구조로 설계됨.

3. 조치원 사업 적용 사례 분석

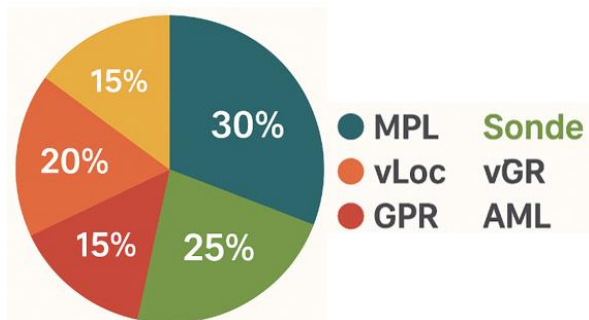
3-1. 대상 지역 개요

본 연구의 실제 적용 사례는 세종특별자치시 조치원읍 일원의 하수도 정비 사업에 기반을 두고 있으며, 해당 구간은 총 5.77km의 하수관로가 대상이다. 이 지역은 도시 침수 피해가 반복적으로 발생한 지역으로, 기존 DB와 실측 간의 오차가 빈번하였고, 비금속 관로의 비율이 높아 기존 탐사 장비로는 정확한 탐지가 어려웠던 현상이었다.

3-2. 적용 장비 조합 및 탐사 전략

본 사업에서는 다중 탐사장비를 단계별로 융합 운영하는 Tetra Solution이 적용되었다. 탐사 전략은 다음과 같다:

- 1차 탐지: GPR과 EML을 통해 금속 및 비금속 관로를 광역 탐지
- 2차 보완: AML, Sonde, vLoc를 통해 미탐지 및 중첩 구간을 정밀 보완
- 3차 검증: 굴착 확인 및 영상기록 기반의 최종 성과 검수



(그림 2) 테트라(혼합)솔루션 장비별 역할 분포도

이러한 단계별 필터링은 각 장비의 한계를 상호 보완하고, 실제 시설물과의 좌표 오차를 최소화하는데 기여하였다. (그림 2)는 장비별 역할 분포도를 표시하였다.

3-3. 탐사 정확도 개선 성과

본 사업의 Tetra Solution 적용 결과, <표 3>과 같이 기존 탐사 방식 대비 탐지 정확도와 DB 정합률이

대폭 향상되었으며, 비금속 관 불탐률 감소 및 탐사 시간 단축 등 실질적 성과를 확인할 수 있었다.

구분	기존 방식	Tetra(혼합) 적용 결과	개선 효과
비금속 관 불탐률	88%	10%	▲78.3% 감소
평균 위치 오차(XY)	±1.5m	±0.3m	▲80% 정밀화
DB 정합률	72%	96%	▲24.3% 향상
평균 탐사 소요시간	4시간	2.3시간	▼42.5% 단축

<표 3> 탐사 정확도 개선 성과표

Tetra(혼합) Solution 적용 시 탐사 정합률 및 효율성에서 전반적 개선이 확인되었음.

4. 결론 및 정책 기술 제언

4-1. 연구 요약 : 다중센서 융합의 기술적 장점

본 연구는 지하시설물 탐사의 정확도 향상을 위해 GPR, EML, Sonde, vLoc, AML 등 다양한 센서를 융합한 복합 탐사기술인 Tetra Solution을 제안하고, 실제 현장에 적용하여 그 효과를 <표 4>와 같이 검증하였다.

단일 장비 사용 시 발생하던 비금속 관로의 불탐, 정확도 편차, 작업자 숙련도 의존성 등의 문제를 다중센서 운용을 통해 단계별 교차검증 구조로 보완하였다. 이를 통해 탐사의 신뢰성과 공간 정합성이 동시에 확보되었으며, 시설물 GIS DB의 품질을 정량적으로 향상시키는 데 성공하였다.

4-2. 정확도 향상 효과 요약(정량적 수치 포함)

- 다양한 지반 및 시설물 재질 조건에 따른 장비별 최적 조합 알고리즘 개발 필요

평가항목	기존 방식	Tetra(혼합) 적용 결과	개선 효과
비금속 관 불탐률	약 88%	10% 이하	-78%p
평균 위치 오차 (XY)	±1.5m 이상	±0.3m 이하	-80% 이상 정밀화
DB 정합률	약 72%	96% 이상	+24%p 향상
탐사 작업시간	평균 4시간 이상	평균 2.3시간	약 40% 단축

<표 4> 정확도 향상 효과표

Tetra Solution의 적용으로 탐지 정합률, 오차 보정률, 작업 효율성 등에서 전반적인 개선 효과가 도출되었음. 이와 같은 정량적 결과는 특히 도시침수 예방사업 등과 같은 공공 프로젝트에서 실질적인 비용 절감 및 안전성 확보 효과로 이어질 수 있다.

4-3. 향후 적용 확장 가능성

본 연구를 통해 제시된 Tetra Solution 기반의 다중센서 융합 탐사 기술은 기존 탐사 방식의 한계를 극복하고, 정밀도 중심의 지하시설물 관리 체계로 나아가기 위한 실질적 해법을 제시하고 있습니다. 향후 본 기술은 다음과 같은 방향으로 확장 적용될 수 있을 것으로 기대됩니다.

우선, 기술적 측면에서는 AI 기반 신호 자동 분석

기술과 장비 간 융합 데이터를 실시간으로 처리할 수 있는 플랫폼 기술의 접목이 추진될 수 있으며, AR·VR 기술과 연계한 실시간 현장 시각화 시스템 구축을 통해 작업자 중심의 사용자 인터페이스 고도화도 가능할 것입니다.

정책 및 제도적 측면에서는 다중 탐사 기반 탐지 기술의 활용이 공공 인프라 구축사업 설계지침 및 관련 법령에 표준화되어 반영됨으로써, 국가기반시설물 DB의 품질 확보에 기여할 수 있습니다. 특히 정밀도 기준을 포함한 공공사업 발주 조건의 명문화는 기술 확산의 중요한 전환점이 될 것입니다.

적용 분야 측면에서는 하수도 외에도 가스, 통신, 전력 등 민간 설비 탐사 영역으로의 확대가 가능하며, 도시재생 및 재난 대응 사업, 그리고 스마트시티 인프라 구축 등 국토 전반의 공공기반사업에도 폭넓게 활용될 수 있을 것입니다.

4.4. 향후 연구 방향

본 연구를 통해 제안한 Tetra Solution 기반 복합 탐사 기술은 지하시설물 탐사의 정확도를 높이고, 실질적 현장 적용 가능성을 입증하였다. 그러나 이 기술의 범용성과 완성도를 높이기 위해서는 다음과 같은 다각도의 후속 연구가 필요하다.

1) 기술 고도화를 위한 연구

장비 간의 신호 융합 알고리즘 정교화: 각 장비의 탐지 데이터를 실시간으로 통합·보정할 수 있는 AI 기반 신호 융합 기술 개발이 필요하다.

탐지 정확도 자동 평가 시스템 개발: 현장 결과에 대한 즉각적인 검증과 경고 기능을 갖춘 정량적 정확도 판단 기준이 요구된다.

GPR, Sonde 등에서 수집된 신호의 3차원 시각화 자동화 기술 역시 향후 사용자 편의성과 해석 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다.

2) AR/VR 기반 현장 지원 시스템 연계

SiteVision 등과 같은 AR 플랫폼과의 직접 연계 기술 개발을 통해, 탐사 결과를 실시간으로 시각화하고 시공 전 위험 요소를 사전에 파악할 수 있는 시스템 연구가 필요하다.

나아가 혼합현실(MR) 기반의 탐사 예측 시뮬레이션 시스템 구축을 통해, 작업자의 오판을 줄이고 현장 효율성을 제고할 수 있다.

3) 제도 및 사업 확산 모델 연구

도시 및 지자체 단위의 지하시설물 정보의 정합성과 관리 기준은 향후 법제화가 필요하다. [1]

Tetra Solution을 중심으로 한 국가단위 기반시설 DB 표준 구축 모델에 대한 타당성 분석이 필요하다.

또한 다중 탐사 장비를 활용한 유지관리 사업의 LCC(Life Cycle Cost) 기반 효과성 분석도 추가적으로 진행될 수 있다.

이처럼 향후 연구는 단순 기술 확장에 그치지 않고, 시스템화, 자동화, 제도화의 세 축을 중심으로 이루어질 때, Tetra Solution은 전국 단위의 도시 인프라 관리 체계로 확산 가능한 스마트 탐사 기술로 자리매김할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 소다시스템(주)의 기술 협력과 세종특별자치시 조치원 배수구역 도시침수에방사업 사례 제공을 통해 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 모든 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 국토교통부, 「지하시설물 관리지침」, 2023.
- [2] 한국공간정보품질관리원, 「공간정보 품질관리 표준」, 2021.
- [3] I. Zayed et al., “Multi-sensor data fusion for underground utility mapping”, Automation in Construction, Vol. 132, 2021.
- [4] SODA SYSTEM 제안서, 세종시 조치원 하수도 정비사업, 2024.
- [5] Pressman, R.S., Software Engineering: A Practitioner's Approach, McGraw-Hill, 1997.