

TECHNICAL EXCELLENCE

November 2020 Vol. 7

노후화되고 위험한 열수송관, 첨단 손상감지 시스템 개발

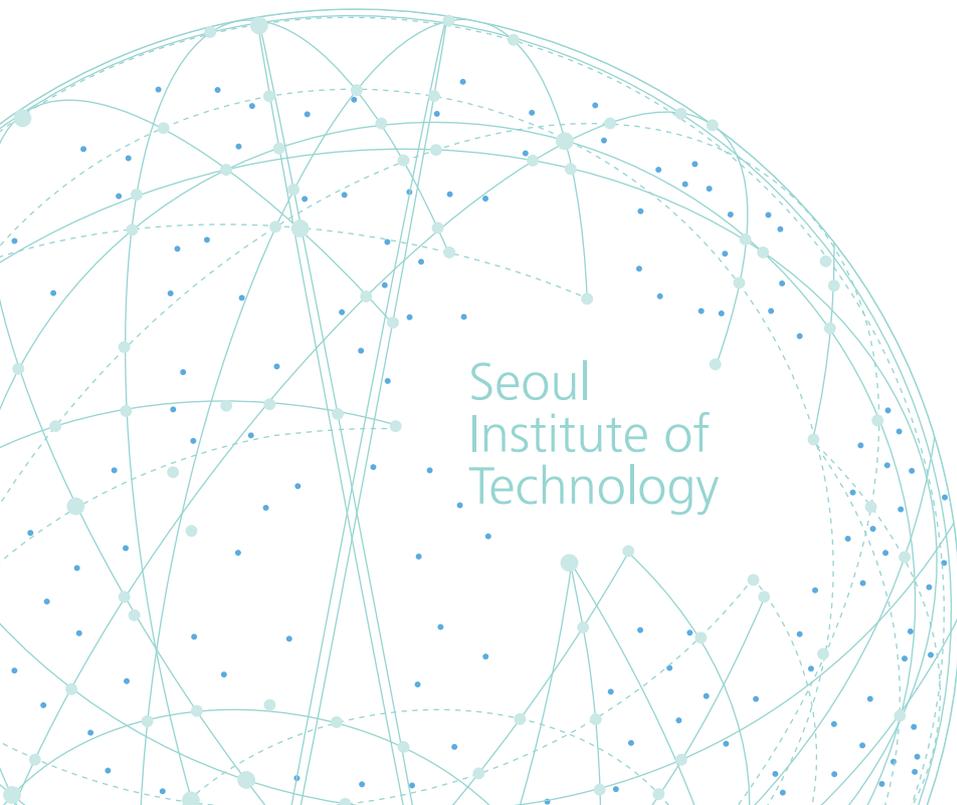
- 01 고위험 시설물로 인식되는 열수송관,
기존 기술로는 손상감지 불가능
- 02 땅 속에 매설된 열수송관,
분포형 TDR센싱 기술로 손상 감지
- 03 광역적으로 매설된 열수송 배관망,
무선센서 네트워크 기술로 땅속 감시망 구축
- 04 인공지능과 지리정보시스템 연계,
스마트 유지관리 시스템 구축 필요

박민철
김정환
이영석

Seoul
Institute of
Technology

노후화되고 위험한 열수송관, 첨단 손상감지 시스템 개발

- 01 고위험 시설물로 인식되는 열수송관, 기존 기술로는 손상감지 불가능
- 02 땅 속에 매설된 열수송관, 분포형 TDR센싱 기술로 손상 감지
- 03 광역적으로 매설된 열수송 배관망, 무선센서 네트워크 기술로 땅속 감시망 구축
- 04 인공지능과 지리정보시스템 연계, 스마트 유지관리 시스템 구축 필요



박민철 수석연구원 김정환 연구위원 이영석 전임연구원
 mcpark@sit.re.kr kim@sit.re.kr ianlee@sit.re.kr

노후화되고 위험한 열수송관, 첨단 손상감지 시스템 개발

최근 발생한 파열사고들로 열수송관은 고위험 시설물로 인식되고 있지만, 누수감지선과 열화상 카메라로는 손상을 즉시 감지할 수 없다. 첨단 손상감지 시스템은 분포형 센싱과 무선센서 네트워크 기술로 구성되어, 손상 정보와 위치를 실시간으로 감지하고 IoT 센싱망을 통해 관리자에게 즉시 전달한다. 이 시스템은 기존 육안 점검을 통한 사후 유지관리에서 첨단 기술을 활용한 선제적 유지관리로 패러다임을 전환시킬 수 있다.

❑ 고위험 시설물로 인식되는 열수송관, 기존 기술로는 손상감지 불가능

전국 4,278km의 열수송관 중에서 20년 이상 사용한 배관은 26%나 차지하며, 열배관 감시시스템과 열화상 카메라로 정기 점검하고 있다. 하지만, 감시시스템에서 이상신호가 발생해도 '미감시' 구간으로 분류해 점검을 중단하고 있다. 이외에 열화상·전자파·음향을 이용한 점검 기술들도 활용되고 있지만, 정확도가 떨어지고 기술적 한계로 실용화되지 못했다.

❑ 땅 속에 매설된 열수송관, 분포형 TDR센싱 기술로 손상 감지

손상감지를 위한 분포형 센서(계측선)은 물(길이 100m) 형태로 제작되어 현장 설치와 연결이 쉽고 피복되어 내구성이 높다. TDR계측기기는 전기회로 개선 및 디지털화로 성능을 개선하여 10cm간격 최대 1km까지의 손상감지가 가능하고 획득된 정보는 IoT센싱망에 전달된다.

❑ 광역적으로 매설된 열수송 배관망, 무선센서 네트워크 기술로 땅속 감시망 구축

무선센서 네트워크는 손상정보를 획득 및 전송하는 IoT 센싱망을 구축하며 노드, 중계기, 베이스를 자체 설계 및 제작해 저비용·고효율의 보급형 기기로 개발했으며, 전력량과 운영 상태까지 제어 관리되며, 메쉬 토폴로지를 구성해 데이터의 전송효율까지 개선했다.

❑ 인공지능과 지리정보시스템 연계, 스마트 유지관리 시스템 구축 필요

첨단 손상감지 시스템은 머신러닝 등의 인공지능 기술과 지리정보시스템까지 연계하여 열수송관의 스마트 유지관리를 실현한다. 손상여부를 실시간 감지하고 상황발생시 관리자는 전자 표준행동요령에 따라 즉시 대응하며, 지리정보시스템에서 파손위치를 즉시 알려준다.

※ 이 기술리포트는 연구보고서 「첨단 IoT 기술 기반 열수송관 유지관리 기술 연구」를 근거로 작성되었습니다.

※ 이 기술리포트의 내용은 서울특별시 정책과 다를 수 있습니다.

01

고위험 시설물로 인식되는 열수송관, 기존 기술로는 손상감지 불가능

전국 4,278km의
 열수송관 중에서
 20년 이상 사용한
 배관은 26%를 차지

지역난방은 열생산시설(열병합발전소, 열전용보일러, 자원회수시설 등)에서 생산된 열에너지를 열수송관으로 주거·상업지역 등의 다수 사용자에게 일괄적으로 공급하는 난방 방법으로써, 2017년 기준 국내 총주택수의 16.4%가 이용하고 있다(그림 1). 열수송관은 현재 전국에 총 4,278km x 2열(공급관, 회수관)이 매설 되어 있으며, 이 중 20년 이상 사용한 배관은 26%로 한국지역 난방공사 등 7개 사업자가 유지·관리하고 있다. 열수송관은 배관 누수·파열 등이 빈번히 발생 하는데도 인명피해를 유발하지 않아 가스관 등에 비해 저위험 시설물로 인식·관리되어왔으나, 2018년 12월 고양 열수송관 파열사고(23명 사상)를 계기로 고위험 시설물로 인식되고 있다.

열수송관은 열손실을
 최소화한 이중 보온관을
 사용하고 감시시스템과
 비파괴 검사로 점검 수행

열수송관은 열생산시설에서 열사용시설까지 열에너지인 온수를 수송·분배 하기 위한 배관으로 공급 중 발생할 수 있는 열손실을 최소화하기 위하여 다른 지하관로와 달리 이중 보온관(내관-보온재-외관)을 사용하고 있다(그림 2). 열수송관은 사용 전과 정기검사에서 「열공급시설의 검사기준」에 따라 누설 검사 항목 등에 대한 합격 여부를 판정하고 있으며, 운영 중에는 열수송관의 설치상태, 누설 및 보온재 손상 여부 등을 열배관 감시시스템과 비파괴 검사 등을 이용해 정기점검하고 있다.

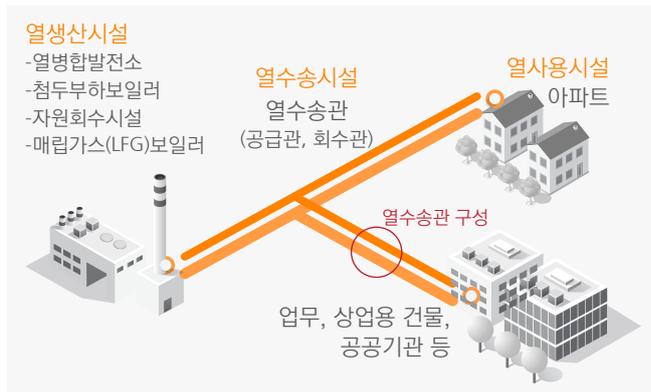


그림 1 | 열공급 계통도

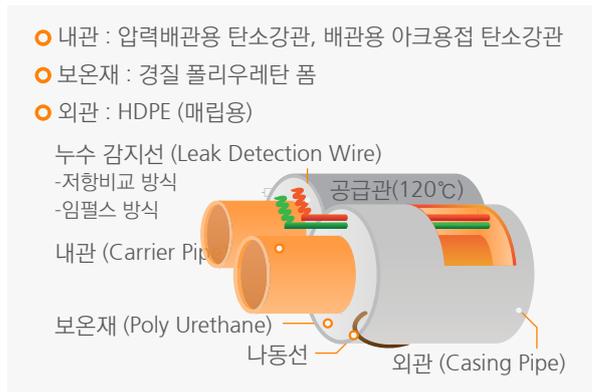


그림 2 | 열수송관 구성

**배관 감시시스템에서
 이상신호가 발생되면
 방치했다가 미감시
 구간으로만 단순 분류**

누수 감지선을 이용한 열배관 감시시스템은 운영 중에 이상신호가 발생하여도 손상 관로 등을 복구하지 않고 방치했다가, 해당 구간의 감시시스템에 작동하지 않으면 '미감시'구간으로 분류해 감시를 중단했던 것으로 나타났다. 2019년 3월 기준으로 8,623개 구간 중 2,245개(26%)가 감시시스템을 통해 감시할 수 없는 '미감시' 구간으로 분류됐고, 1993년 이전에 열수송관이 설치된 지역은 49%나 조사됐다.

**전자파, 음향, 열화상
 정보를 이용한 점검
 기술들은 정확도가
 떨어지고 실시간 감지가
 불가능**

최근 열수송관의 파열사고의 증가로 많은 손상감지 기술들이 개발되고 있는데, 대표적으로 전자파를 이용한 지표투과레이더(GPR, Ground Penetration Radar)가 있다. 이 기법은 지표면에 전자파를 방사시킨 후 반사체에서 되돌아온 반사파를 이용한 탐사법이나, 지표투과 레이더로 측정된 이미지만으로는 지하관로의 파손과 누수 여부를 판단하기 어렵다. 최근에는 열화상 카메라를 차량이나 드론에 탑재하여 점검하고 있지만, 땅속에 매설된 열수송관 주변 흙의 온도 변화로 손상여부를 파악하기 어렵다. 이외에도 음향을 이용한 방법이 있지만 주변 소음이나 차량주행에 민감하여 실용화되지는 않았다. 이러한 기술적 한계 외에도 점검자가 직접 열수송관 전체를 하나하나 점검해야 하므로 시·공간적 한계가 존재한다(서울기술연구원, 2019).

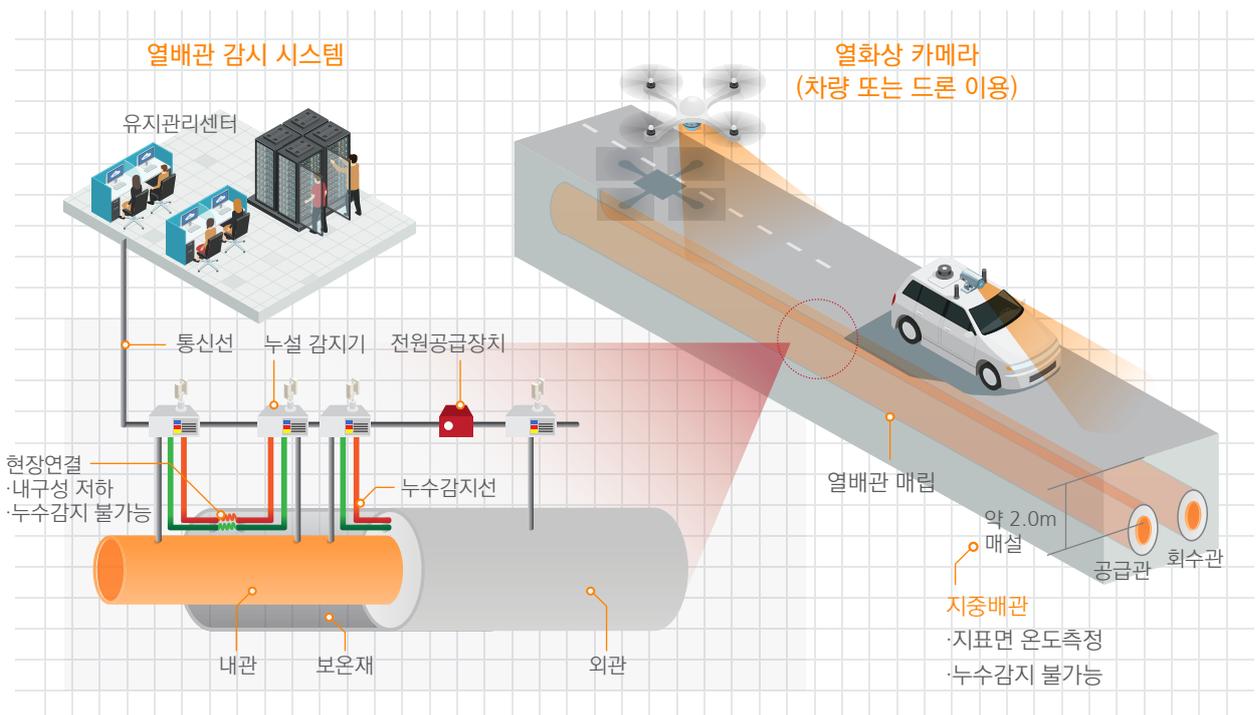


그림 31 현재 사용 중인 열수송관 손상감지 기술

기존 점검 기술의 한계를 혁신적으로 개선한 첨단 손상감지 시스템 개발

기존 손상감지 시스템의 여러 한계를 혁신적으로 개선한 것이 그림 4에 제시된 첨단 손상감지 시스템이다. 이 시스템은 첨단 센싱과 무선센서 네트워크 기술로 구성되어 있으며, 열수송관의 손상 정보와 위치를 즉시 파악하고, 이 정보를 IoT 센싱망을 통해 관리자에게 전달한다. 이 기술로 열수송관 파열 사고를 사전에 예방하고, 기존의 육안 점검을 통한 사후 유지관리에서 첨단 기술을 활용한 선제적 유지관리로 패러다임을 전환시킬 수 있다.

센싱과 네트워크 기술의 전자기기부터 분석기술까지 손상감지에 최적화

첨단 센싱 기술은 땅속에 매설되는 분포형 센서(계측선)와 TDR계측기기, 무선센서 네트워크 기술의 경우 IoT 센싱망을 구성하는 네트워크 기기(노드, 중계기, 베이스)와 네트워크 토폴로지 기술로 각각 구성된다. TDR 계측기기는 전선에 전기펄스(Step pulse)를 주사한 후 반사된 값을 측정하여 끊어진 위치를 찾는 시간반사영역법(TDR, Time Domain Reflectometry)을 이용한 장비이다. 네트워크 토폴로지 기술은 네트워크 기기를 공간적인 배치형태를 의미하며, IoT 센싱망을 구성하는 것으로써 선(Line), 트리(Tree), 메쉬(Mesh) 등의 형태가 있다. 각 전자기기들에서 분석기술까지 열수송관의 손상 감지에 최적화하여 연계개발했다.

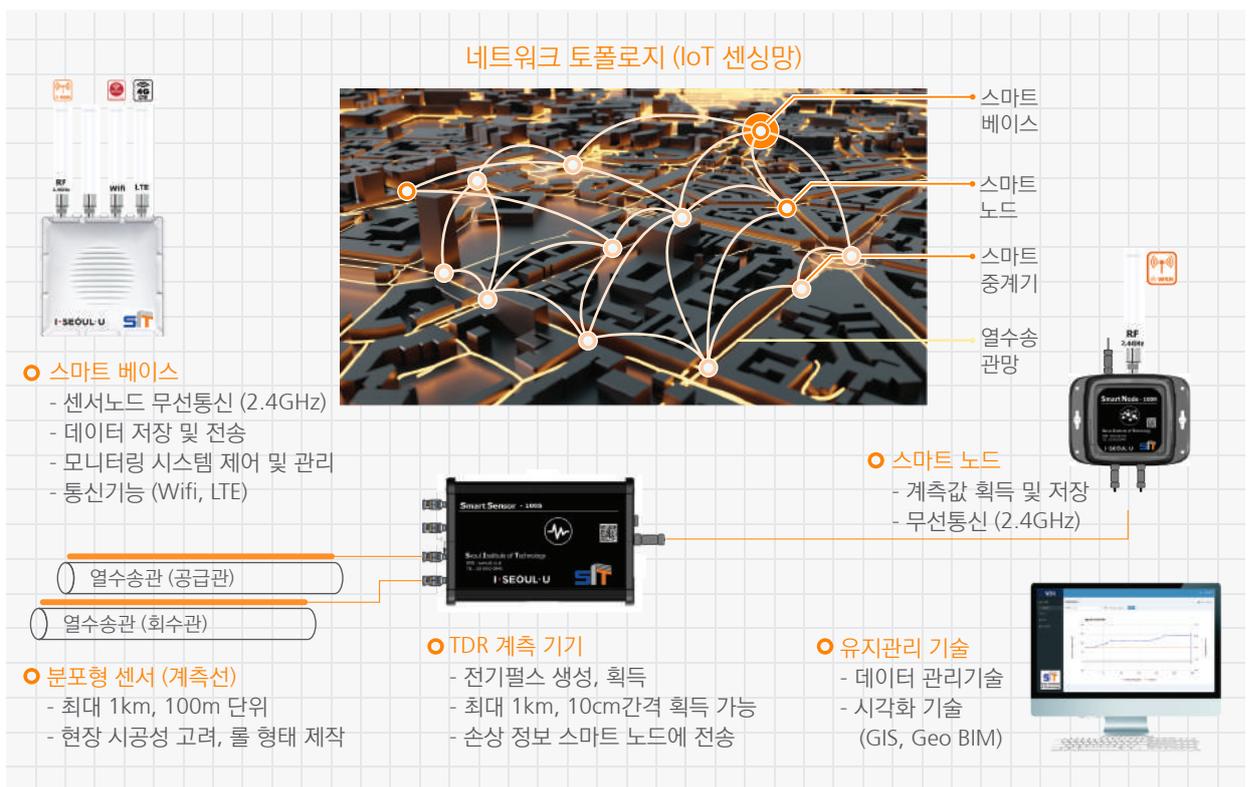


그림 4 | 열수송관 첨단 손상감지 시스템 개념도

02

땅속에 매설된 열수송관, 분포형 TDR센싱 기술로 손상 감지

수십 km 배관망의 손상 정보와 위치를 감지할 수 있는 분포형 센싱 기술 필요

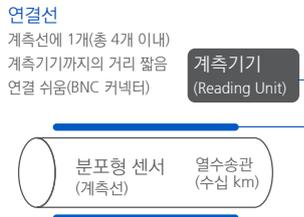
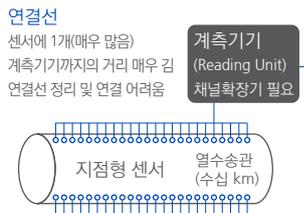


그림 5 | 지점형과 분포형 센서 비교

길이가 수십 km에 달하는 열수송관의 손상 감지는 일반적인 지점형 센서(Point Sensor)가 아닌 분포형 센서(Sensing Cable)가 적합하다(그림 5). 분포형 센서는 전송선(전력선 또는 통신선)에 빛 또는 전기 신호를 흘려서 반사되어온 신호의 변화를 감지하는 시간반사영역법(TDR)을 이용한다. 빛을 이용하는 방식은 계측선으로 광케이블(유리)을 이용하므로 내구성이 낮고 경제성이 매우 떨어지는 반면, 전기 신호를 이용하는 방식은 도체인 금속을 이용하여 사용자가 원하는 데로 계측선을 제작 및 피복할 수 있어 내구성과 경제성을 높일 수 있다. 또한, 물과 전기 특성간에 직접적인 상관관계(유전율)가 있어 해석에 유리한 장점이 있다.

이 TDR기술은 1970년대부터 케이블 단선 감지기로 활용되다가, 1980년대에 토목 및 농업분야에서 탐침봉(Probe) 형태로 토양수분 및 다짐도 측정에 활용되었다. 하지만 이 탐침봉(Probe) 형태의 기존 센서는 그림 6과 같이 지점형이라 한 지점의 정보(흙의 수분함량)만 획득해 긴 지하관로의 손상을 감지할 수 없으며, 강제로 된 탐침봉은 피복되지 않아 부식된다는 것이 단점이다.

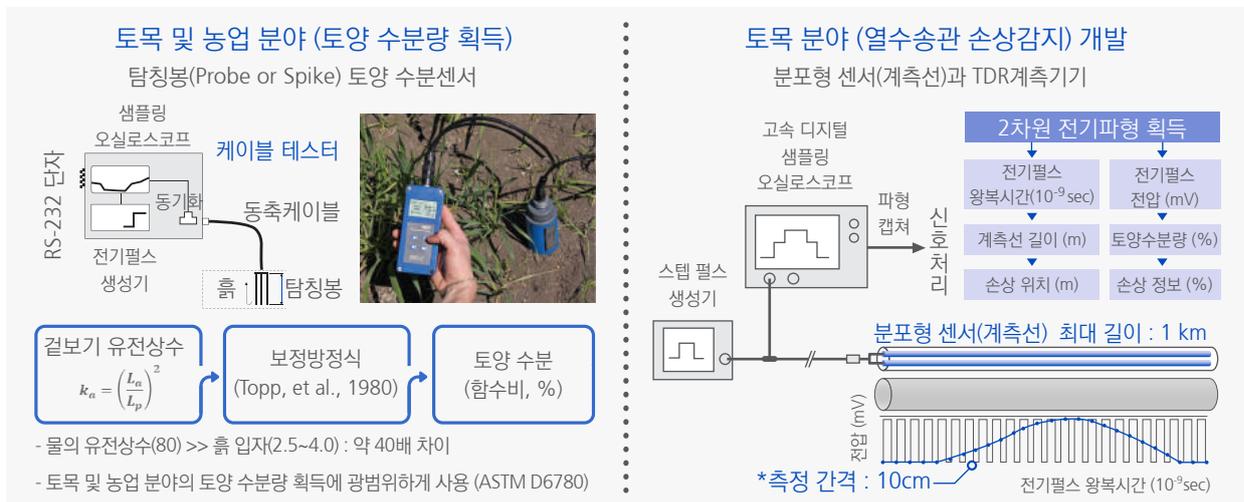


그림 6 | 기존 토양 수분센서와 열수송관 손상감지용 분포형 센서 비교

최대 1km 까지, 10cm 간격으로 열수송관의 손상 감지

땅속에 매설된 열수송관의 손상은 TDR기술을 이용한다. 이 기술은 분포형 센서(계측선)과 TDR계측기기로 구성되며, 최대 1km까지 10cm 간격으로 감지가 가능하다. 계측선은 열수송관 주변 지반에 매설하고 동축케이블로 도로의 보도구간에 설치된 TDR계측기와 연결된다. 측정 방식은 TDR 계측기에서 전기펄스를 발생시키고 분포형 센서(계측선)을 따라 이동하며 반사된 전기펄스를 감지하게 되며, 획득된 전기파형을 스마트 노드에 전송한다.

분포형 센서는 내구성이 높고 설치가 간편하며 현장 접합이 쉬움

분포형 센서(계측선)는 그림 6과 같이 전기펄스가 이동하는 평각선(스테인리스 스틸)에 PVC(Poly Vinyl Chloride)로 피복된 계측선(Line)으로 내구성이 높고 경제적이다. 또한, 100m 단위의 롤(Roll) 형태로 제작되어 현장에서 운반 및 설치가 간편하고, 함께 개발된 연결 키트(Kit)로 10분 내로 쉽고 빠르게 접합할 수 있다.

TDR계측기기는 고속 스위칭 소자를 적용해 손상위치 감지에 대한 정확도를 2배 개선

기존 TDR계측기기는 지점형 센서의 전기펄스 변화량으로 흙의 수분 함량(함수비)을 측정한다. 그러므로 분포형 센서에 적용하기에는 감지거리(최대 200m)와 감지간격(20cm)이 떨어지며 USB로 컴퓨터에 연결해야만 사용이 가능했다. 새로운 TDR계측기기는 전기펄스(Step pulse)의 생성부를 고속 스위칭 소자를 적용해 거리 탐지에 대한 정확도를 2배 개선하였다. 또한 PCB(Printed Circuit Board)의 아날로그 회로를 디지털화해 최대 1km 감지 거리에 10cm(최대 6.7cm) 간격(분해능)을 확보했다. RS-485 통신 인터페이스를 구현해 IoT 센싱망의 스마트 노드와도 연동된다.



- | | | | |
|---|--|---|--|
| <p>기존</p> <ul style="list-style-type: none"> - 지점형 센서 : 탐침봉(Probe) 형태 - 한 지점의 손상정보만 획득 - 긴 지하관로의 손상감지 불가능 - 탐침봉 부식 문제 발생 | <p>개선</p> <ul style="list-style-type: none"> - 분포형 센서 : 전선(Line) 형태 - 최대 1km까지 손상정보 획득 - 계측선 : 지하관로 감지 적합 - PVC 피복 : 내구성 증대 - 롤 형태(100m) : 시공 용이 | <p>기존</p> <ul style="list-style-type: none"> - 최대 200m 감지, 20cm 분해능 - 최대 1채널 연결 가능 - 데스크탑 또는 랩탑 연결 사용 - 유지관리 시스템 적용 불가 | <p>개선</p> <ul style="list-style-type: none"> - 스텝펄스 생성부 기능 개선 : 고속 스위칭 소자 적용 - 아날로그 회로를 디지털화 - 최대 1km 감지, 10cm 분해능 - 최대 4채널 연결 가능 - 무선센서 네트워크 연동 - 유지관리 시스템 적용 가능 |
|---|--|---|--|

분포형 센서(계측선)

그림 71 첨단 센싱기술의 장점 비교표

2차원 전기파형, 손상정보로 변환하는 보정기법 개발

분포형 센서에 전기펄스를 흘려 측정된 2차원의 전기파형 정보를 온도, 누수량(함수비) 등 원하는 정보로 실시간 변환(필터링/보정)하는 기법도 새롭게 개발했다. 실내 검증을 거쳐 모니터링 기기에 프로그램으로 탑재했다. 실시간으로 자동 분석이 가능해지고, 정확한 손상 정보만 관리자에게 전달된다. 분포형 센서의 검증과 보정방정식의 개발을 위해, 실내 실험장비를 구축하고 열수송관 손상에 의한 2차원 전기파형을 측정하였다. 그리고, 손상 전후 전기파형의 변화가 발생하는 것을 검증하였다(그림 8).

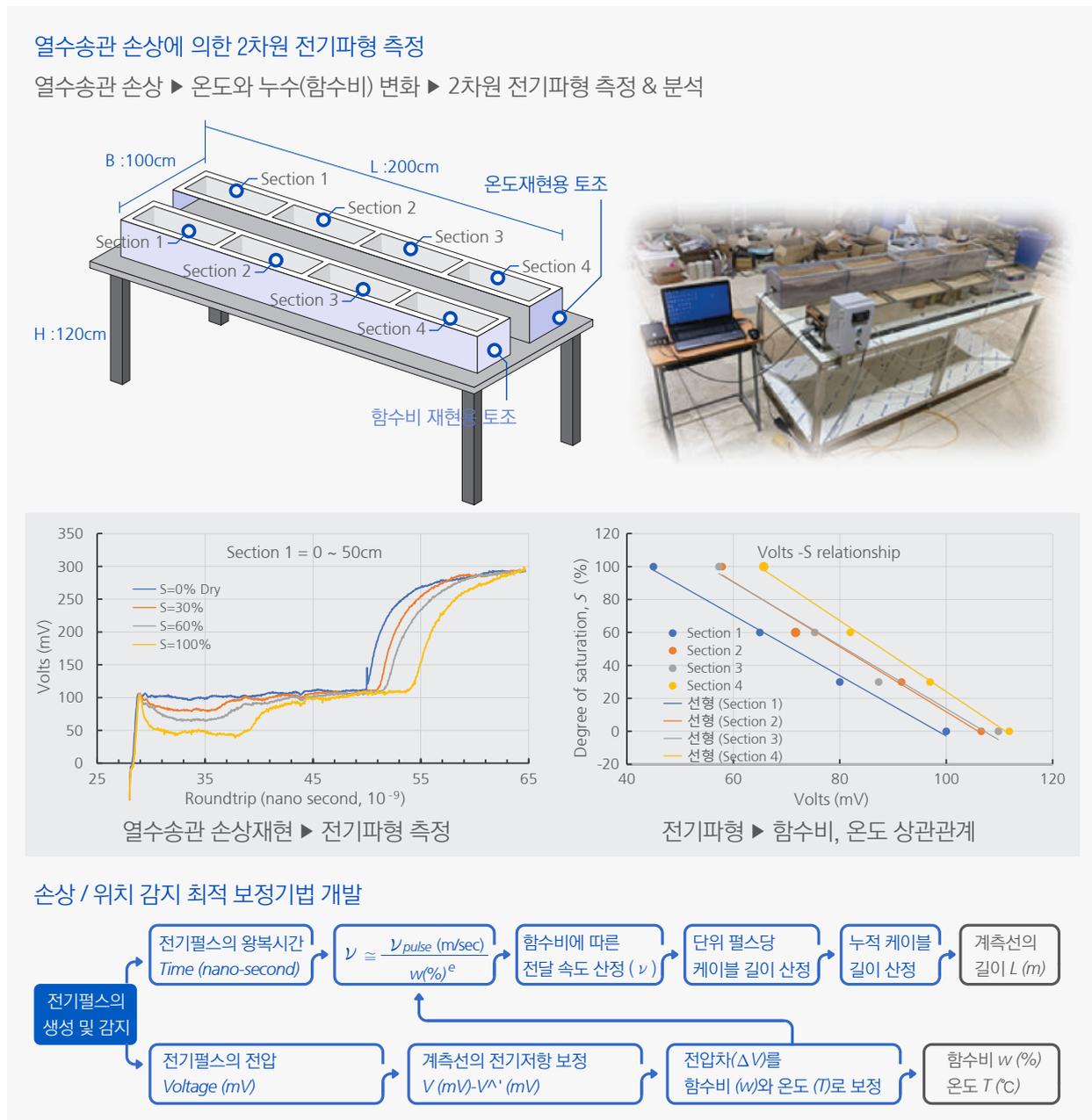


그림 8 | 2차원 전기파형의 보정기법

03

광역적으로 매설된 열수송 배관망, 무선센서 네트워크 기술로 땅속 감시망 구축

수십 km 열수송 배관망,
 효율적인 모니터링 기술
 개발 필요

일반적인 모니터링 시스템은 하나의 구조물 또는 현장에 단일 개별 통신망을 구축하고, 측정된 정보를 송수신하는데, 광역적으로 매설된 열수송관로를 모니터링하기 위해서는 대형 모니터링 시스템의 구축과 유지에 비용이 크게 필요하여 효율이 떨어진다. 따라서, 열수송관로의 손상 감지를 위해서는 저전력·고효율의 데이터 획득과 통신 기술도 센싱 기술과 함께 개발이 필요하다.

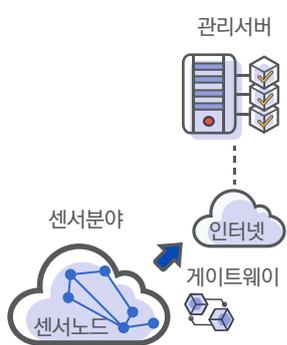


그림 9 | 무선센서 네트워크 기술의 개념도

센서가 장착된 수많은 센서 노드로 구성된 무선센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)는 유선 통신과 비교했을 때, 기기 배치가 쉽고 장치의 유연성이 개선되기에 IoT(Internet of Things)의 핵심 기술로 여겨진다(IEC, 2016). 무선센서 네트워크의 노드들은 센서 노드, 중계기 노드, 베이스(게이트웨이), 클라이언트를 포함하며, 모니터링 영역 내부 또는 주변의 수많은 센서 노드의 자동 구성 기능을 통해 네트워크 망을 형성하고, 센서 노드에서 수집된 데이터는 호핑을 통해 다른 센서 노드로 전송된다. 전송되는 동안 다른 센서 노드에서 수집된 데이터도 멀티호핑 후 베이스(게이트웨이)에 도달하게 되며, 마지막으로 서버와의 통신으로 데이터를 최종 전송한다.

- 다양한 센서들의 지원 용이성 확보 : 포팅가능한 프레임워크
- 센서 데이터 보안성 확보
- 저전력 운영성 : 전력 레벨 상시 점검 가능
- 센서 운영성 : 센서 장치 자동 인식 및 다양한 센서(분포형 센서) 호환 구조
- 데이터 수집 및 시 연계 : 시기반의 데이터 분석 기능 연계

스마트 노드

- 계측값 획득 및 저장
- 무선통신 (2.4GHz)

스마트 전력

- 필요시, 보조전력 제공

스마트 중계기

- 노드-베이스 데이터 중계
- 무선통신 (2.4GHz)

스마트 베이스

- 센서노드 무선통신 (2.4GHz)
- 데이터 저장 및 전송
- 모니터링시스템 제어 및 관리
- 통신기능 (Wifi, LTE)

배치방식

그림 10 | 무선센서 네트워크 기술의 구성

무선센서 네트워크 기술을 이용한 저비용·고효율의 IoT 센싱망

무선센서 네트워크를 구성하는 스마트 노드, 중계기, 베이스는 자체 설계 및 제작을 통해 저비용·고효율의 보급형 기기로 개발했다. TDR계측기기 외에도 다양한 센서들과 연결되고 제어관리가 가능하고 손상정보가 노드간 전달되어 데이터 정확성과 일관성을 보증한다. 네트워크 기기들 또한 전력량과 운영 상태까지 제어 관리하는 저비용·저전력·고효율 장비들이다. 네트워크 토폴로지는 각 기기들의 공간적 배치로 IoT 센싱망을 구축하는 것으로서, 배치 방식을 메쉬(Mesh)로 구성해 데이터의 전송 효율까지 개선하였다.

IoT 센싱망은 도시인프라 유지관리를 위한 거버넌스 구성

무선센서 네트워크 기술을 이용한 IoT 센싱망은 도시인프라 유지관리를 위한 거버넌스를 구성한다. 이 네트워크 기술은 열수송관 외에도 상하수도, 교량, 도로 등의 도시인프라 시설물에 필요한 다양한 센서들을 모두 지원하므로 유지관리를 위한 거버넌스를 효율적으로 구성한다. 그리고, 흙막이 공사장의 안전확보나 제설 작업 개선 등의 특수한 목적에도 범용적으로 적용할 수 있다.

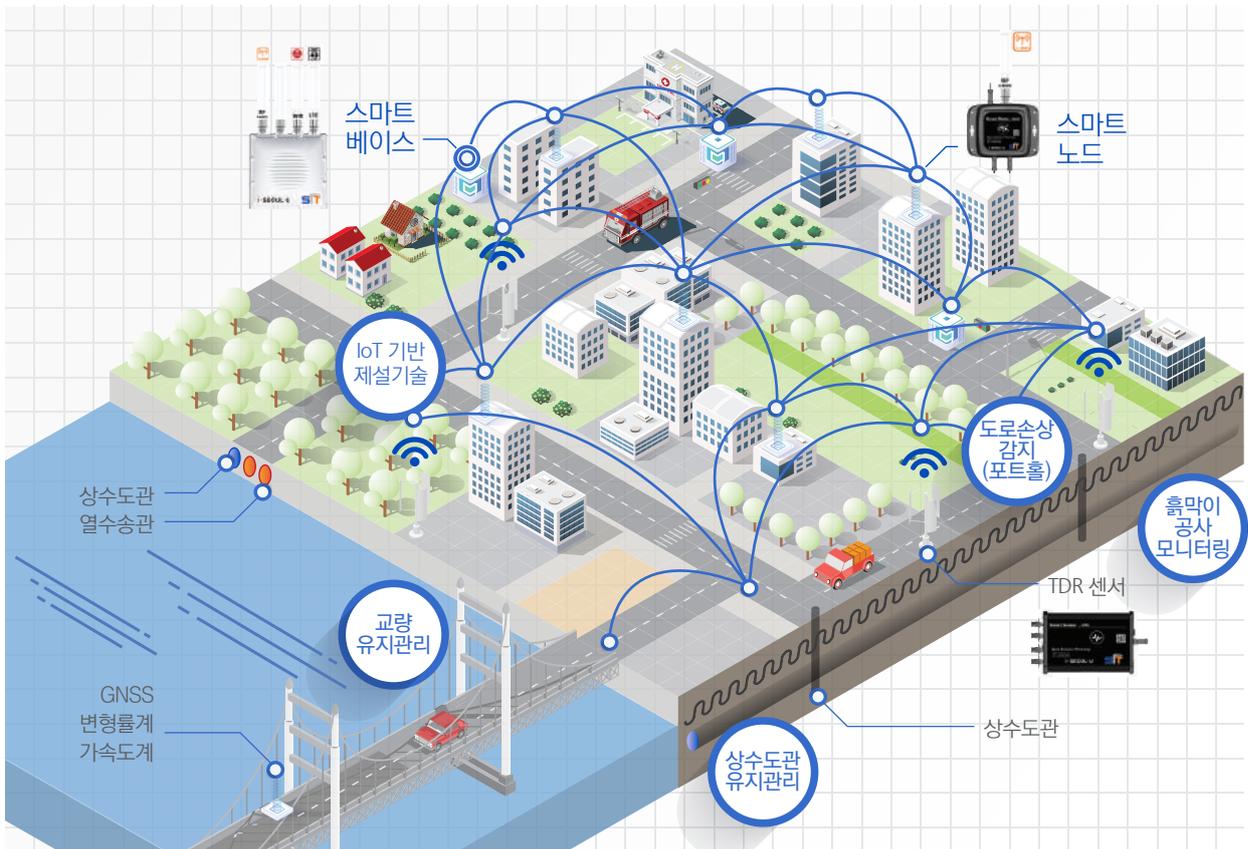


그림 11 | IoT 센싱망을 이용한 시설물 유지관리의 거버넌스 개념도

04

인공지능과 지리정보시스템 연계, 스마트 유지관리 시스템 구축 필요

누수 재현장치를 이용한 첨단 손상감지 시스템 검증

첨단 손상감지 시스템은 그림 12와 같이 누수 재현장비를 통해 검증했다. 누수 재현장비는 PVC 모형 토조에 모형 열수송관과 누수 재현 밸브를 설치하고, 열수송관 아래에 2.0m의 분포형 센서(계측선)과 검증용 토양 수분계(EC-5)를 함께 설치하였다. TDR계측기기는 모형 맨홀 내에 설치하고, 스마트 노드와 스마트 전력은 모형장비 외부에 설치하였다. TDR계측기에서 전기펄스를 생성하여 계측선에 주사하고 반사되어온 전기파형을 획득한 후 스마트 노드에 전송하면 노드에서 스마트 베이스(게이트웨이)로 무선 통신하여 최종 데이터를 전송한다.

누수가 재현된 후 무선센서 네트워크 기기에서 서버로 전송한 손상정보는 웹페이지에서 명확하게 변화를 감지할 수 있었다. 그림 12의 우측에 TDR 계측데이터를 나타낸 것이다. 표의 가로축에서 분포형 계측선의 길이(2.0m)를 나타내고 세로축에서 전압의 변화를 감지하는데, 초기에는 약 80mV로 일정하다가 누수 이후 약 70mV로 감소되는 변화되어 열수송관의 누수 여부와 위치를 정확히 감지하였다.

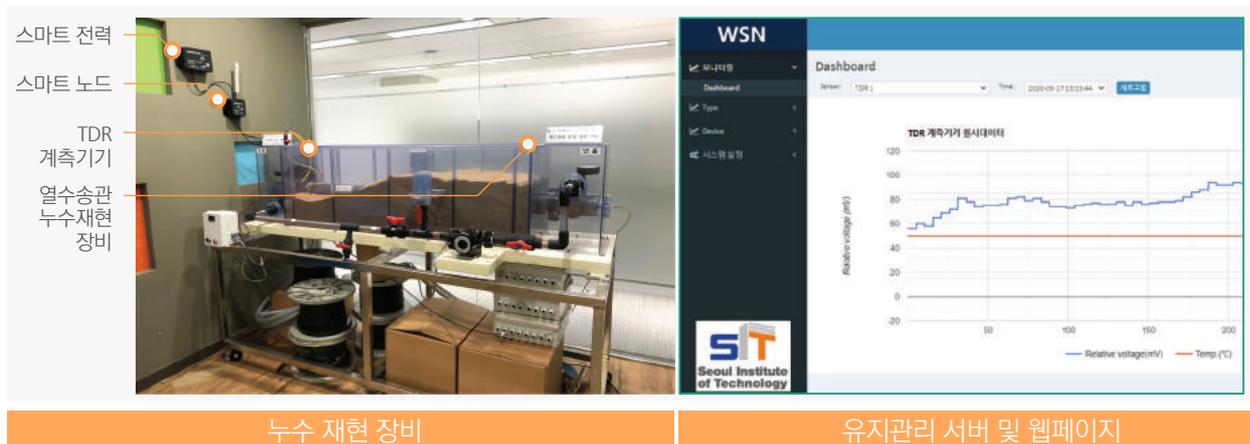
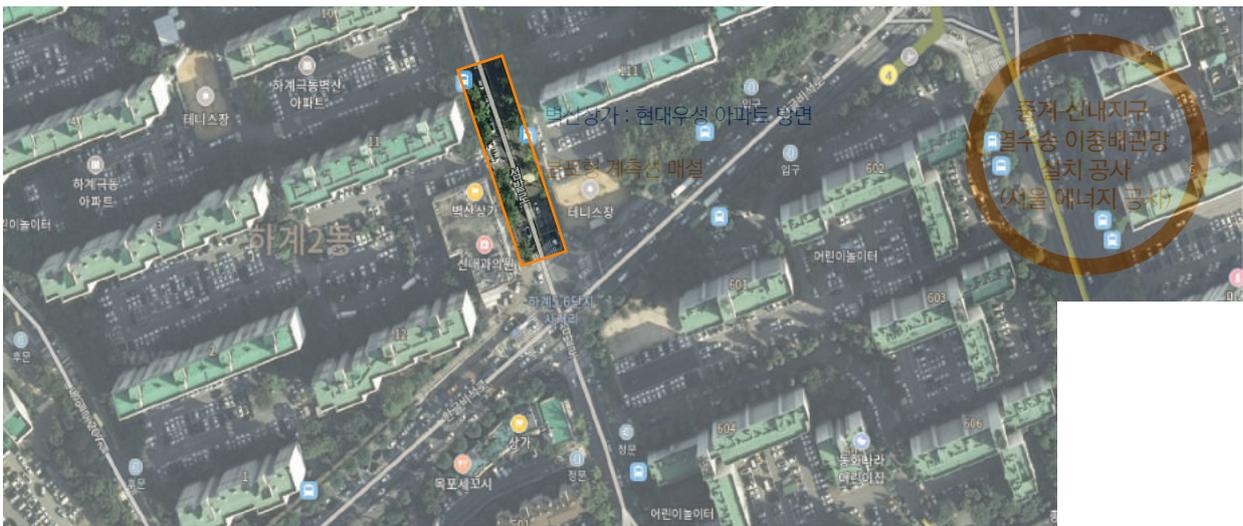


그림 12 | 누수재현 장치를 이용한 첨단 손상감지 시스템의 검증

**시범구축과 현장실증을
 거쳐 설계·시공
 매뉴얼 발간**

이 기술은 서울에너지공사의 “중계-신내지구 열수송 이중배관망 설치공사”에 시범구축되었다. 분포형 센서(계측선)는 시범구간으로 선정된 80m 열수송관(공급관과 회수관)의 상부와 하부에 총 6개를 시범구축했다. 무선센서 네트워크는 도로의 보도 구간에 TDR계측기와 스마트노드, 스마트베이스를 배치해 구성했다. 시범운영기간 동안 신설된 열수송관에 누수는 발생하지 않았고 자연상태의 토양 수분만 측정되었다.

기술의 개발과 실증뿐만 아니라, 확산을 위한 매뉴얼까지 발간했다. 열수송관은 계획·설계·시공·유지관리 단계별로 관리주체, 설계자, 시공자들이 다르며, 각 단계의 담당자들이 쉽게 기술을 이해하고 활용할 수 있어야 한다. 시범구축을 바탕으로 첨단 손상감지 시스템의 설계·시공 매뉴얼을 제작하였다.



분포형 계측선 매설 과정

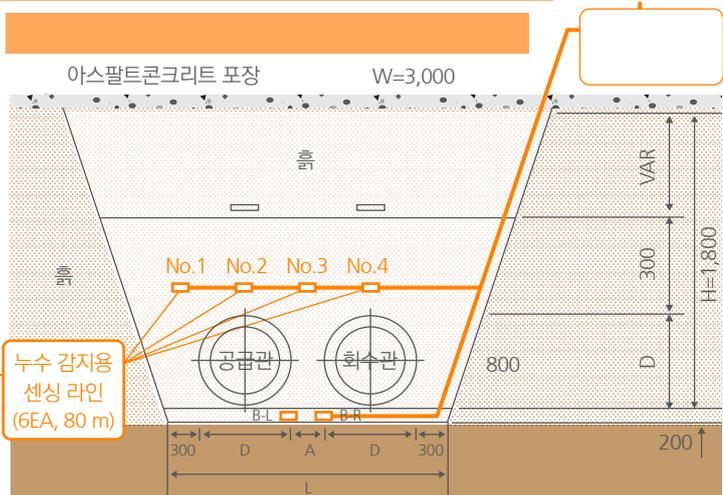
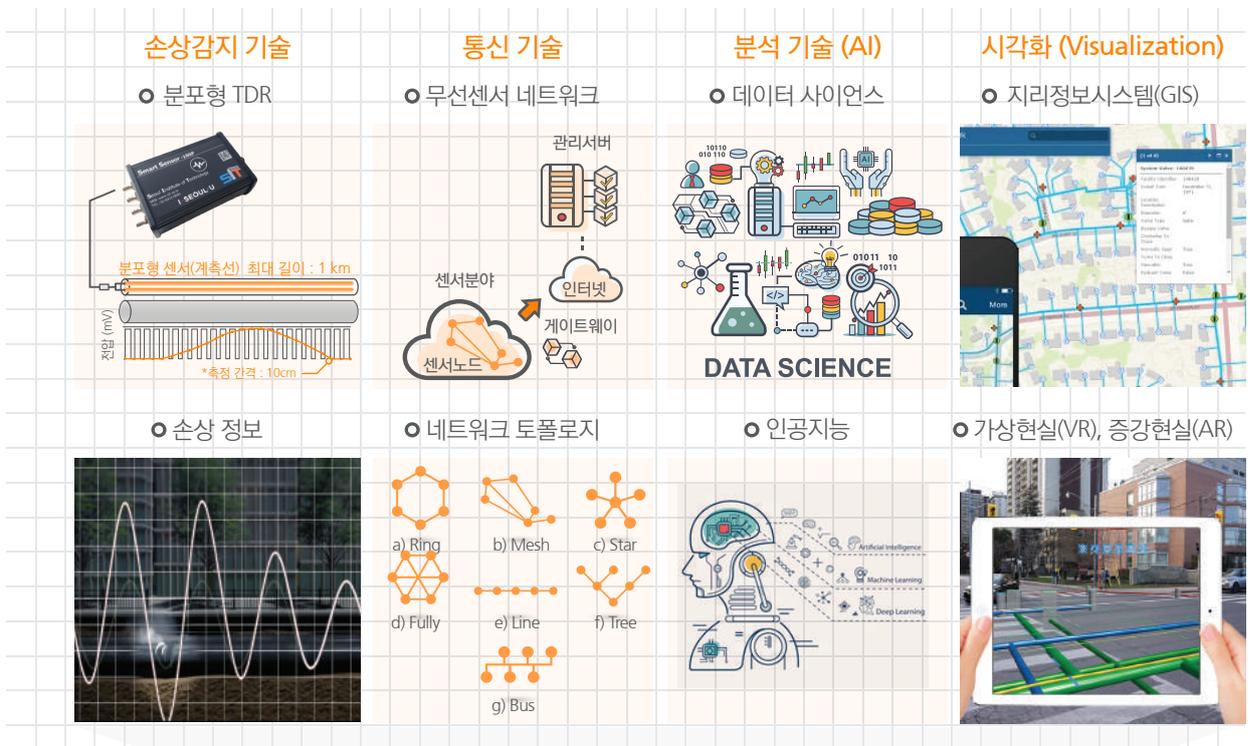


그림 13 | 첨단 손상감지 시스템 시범구축과 현장실증

**인공지능과
 지리정보시스템까지
 연계하여 스마트
 유지관리 시스템 구축**

열수송관의 스마트 유지관리 시스템을 구축하기 위해서는 그림 14와 같이 손상감지 기술, 통신 기술, 분석기술, 시각화 기술이 통합되어야 한다. 첨단 손상감지 시스템은 스마트 유지관리에 핵심적인 손상감지와 통신 기술이며, 획득된 손상정보는 인공지능 기술로 분석되고 그 결과는 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System), 가상현실(VR, Virtual Reality), 증강현실(Augmented Reality) 등의 시각화 기술로 표출된다.

머신러닝과 빅데이터 등의 인공지능 기술을 이용한 관리기준은 관리자의 정확한 상황 판단을 지원하고, 전자 표준행동절차(SOP, Standard Operation Procedure)는 상황 발생시 신속한 대응을 가능케한다. 손상정보와 상황대응 단계는 지리 정보 시스템(GIS, Geographic Information System)에 표출되어 관리자가 직관적으로 손상 여부와 위치를 파악한다. 가상현실(VR)은 현장에서 관로 현황과 손상 위치를 현실 세계와 결합하여 확인시켜준다. **E**



스마트 유지관리 실현
 · 지하안전 확보 (사고 예방)
 · 선제적 유지관리

그림 14 | 첨단 기술을 활용한 스마트 유지관리 시스템의 구성

참고문헌

- 1) 감사원 (2019), "감사보고서 : 열수송관 안전관리 실태"
- 2) 서울기술연구원 (2019), "GNSS 기술현황과 활용성 검토에 관한 연구"
- 3) 한국지역난방공사 홈페이지, <https://www.kdhc.co.kr>
- 4) ISO/IEC 29182-1, 2013, 「Information Technology – Sensor Networks: Sensor Network Reference Architecture(SNRA), Part 1: General Overview and Requirements」 .
- 5) ISO/IEC 29182-3, 2014, 「Information Technology - Sensor Networks: Sensor Network Reference Architecture (SNRA), Part 3: Reference Architecture Views」 .
- 6) 경향신문, "열수송관 구간 26%가 누설 등을 감시할 수 없는 구간으로 분류",
http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?art_id=201907021400001#csidxab7bb87d7d30c75b954937688945876
- 7) Beugnot, J.-C., et al. (2014). "Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwave length-diameter optical fibre." Nature Communications 5(1): 5242.
- 8) Annamdas, V. G. M., Bhalla, S., & Soh, C. K. (2017). Applications of structural health monitoring technology in Asia. Structural Health Monitoring, 16(3), 324-346.

제 7호 노후화되고 위험한 열수송관,
첨단 손상감지 시스템 개발

발행인 고인석

편집인 편집위원회

발행처 서울기술연구원
03909 서울특별시 마포구 매봉산로37(상암동)
www.sit.re.kr

발행일 2020년 11월 25일

SIT 서울기술연구원
Seoul Institute of Technology Research



08

9 772733 750002

ISSN 2733-7502