

TECHNICAL EXCELLENCE

Nov 2021 Vol. 12

GNSS와 AI를 이용한 도시기반시설 변위 모니터링 기술 개발

- 01 도시기반시설의 선제적 유지관리를 위한 고정밀 GNSS 변위 모니터링 기술 필요
- 02 고정밀·저비용·저전력 GNSS 임베디드 장비 개발 및 성능 검증
- 03 시계열 변위 데이터의 관리 및 AI 기반 분석 기술 구현
- 04 변위 모니터링을 통한 도시기반시설의 유지관리 방안 제시

박민철
김정환
이영석

Seoul
Institute of
Technology

GNSS와 AI를 이용한 도시기반시설 변위 모니터링 기술 개발

- 01 도시기반시설의 선제적 유지관리를 위한 고정밀 GNSS 변위 모니터링 기술 필요
- 02 고정밀·저비용·저전력 GNSS 임베디드 장비 개발 및 성능 검증
- 03 시계열 변위 데이터의 관리 및 AI 기반 분석 기술 구현
- 04 변위 모니터링을 통한 도시기반시설의 유지관리 방안 제시



Seoul
Institute of
Technology

박민철 수석연구원
mcpark@sit.re.kr

김정환 연구위원
kim@sit.re.kr

이영석 전임연구원
ianlee@sit.re.kr

GNSS와 AI를 이용한 도시기반시설 변위 모니터링 기술 개발

GNSS 변위 모니터링을 통해 도시기반시설들을 유지관리할 수 있지만, 정밀도와 비용 문제로 국가 중요시설물에만 제한적으로 적용되어왔다. 그리고 획득된 시설물의 변위 정보는 관리자가 주관적으로만 판단하고 있어서 이상징후나 위험여부를 판단하기 어려웠다. 개발된 고정밀 GNSS 임베디드 장비는 고정밀·저비용·저전력 장비이며, 상시 모니터링을 위한 서버와 AI 기반 분석 기술까지 연계 개발하였다. 관리자들이 빠르고 직관적으로 시설물의 상태를 판단할 수 있는 실험성 있는 변위 모니터링 기술로 개발하였다.

II 도시기반시설의 선제적 유지관리를 위한 고정밀 GNSS 변위 모니터링 기술

시설물 노후화로 인한 위험에 대비하기 위해, 단기적인 유지보수와 사후관리 위주의 유지 관리에서 미래를 대비한 선제적 대응 방식으로 전환이 필요하다. 측지 분야의 고가 장비로는 변위 모니터링을 위한 초기 및 운영 비용이 크고 사용자화가 어려운 한계가 있다.

II 고정밀·저비용·저전력 GNSS 임베디드 장비 개발 및 성능 검증

GNSS 임베디드 장비는 위성신호 분석을 저비용·고성능 신호처리장치에서 필터 알고리즘을 통해 1.0 mm 정밀도를 만족하며 성능 검증을 완료하였다. 저비용·고성능 안테나와 수신기로 가격이 저렴하고 정제된 정보만을 서버에 전송하므로 통신 비용까지 절감하였다.

II 시계열 변위 데이터의 관리 및 AI 기반 분석 기술 구현

시계열 변위 데이터를 관리하는 서버와 AI 기반 분석 기술도 함께 구현했으며, 시계열 변위 정보를 분해하여 시설물의 특성을 파악하고, 이상감지를 통해 이상거동 유무를 파악할 수 있고, 마지막으로 예측을 통해 위험상황을 사전 파악·대응할 수 있다.

II 변위 모니터링을 통한 도시기반시설의 유지관리 방안 제시

구조물 건전도 모니터링(SHM, Structural Health Monitoring)은 변위 모니터링을 통한 유지관리의 대표적 기법이다. 건축물과 교량 외에도 비탈면과 옹벽과 같은 토류 구조물에서 변위 정보로 안전도 평가할 수 있는 기법까지 함께 제시하였다.

※ 이 기술리포트는 연구보고서 「GNSS와 AI를 이용한 도시기반시설 변위 모니터링 기술 개발」을 근거로 작성되었습니다.

※ 이 기술리포트의 내용은 서울특별시 정책과 다를 수 있습니다.

01

도시기반시설의 선제적 유지관리를 위한 고정밀 GNSS 변위 모니터링 기술 필요

노후 도시기반시설
사후관리 위주에서
선제적 대응 방식으로
전환 필요

도시기반시설은 1995년에 제정된 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(2018. 8. 14., 일부개정)」에 따라 안전점검 및 정밀안전진단으로 유지관리된다. 이 법에 따라 도시기반시설들은 점검 위주의 유지관리를 수행하고 있으며, 성능 및 상태평가는 시설물의 손상현황과 재료 시험 결과를 토대로 판단하고 있다. 하지만, 점검을 통한 단기적인 사후 유지보수만으로는 노후화된 도시기반시설의 선제적 유지관리가 어렵다.

서울시는 도시기반시설의 노후화로 인한 시민의 안전 위협과 미래의 재정적 압박에 선제적으로 대비하기 위해, 2017년부터 「서울 인프라 다음 100년 프로젝트」를 시작하였다. 이 프로젝트를 통해 시설물의 '단기적인 유지보수와 사후관리 위주'의 유지관리에서 '미래를 대비한 중장기적이고 선제적 대응 방식'으로 전환하고자 한다.

고가의 GNSS 장비와
모니터링 시스템의
구축 및 운영 비용으로
인해 중요 기반시설에만
제한적으로 활용

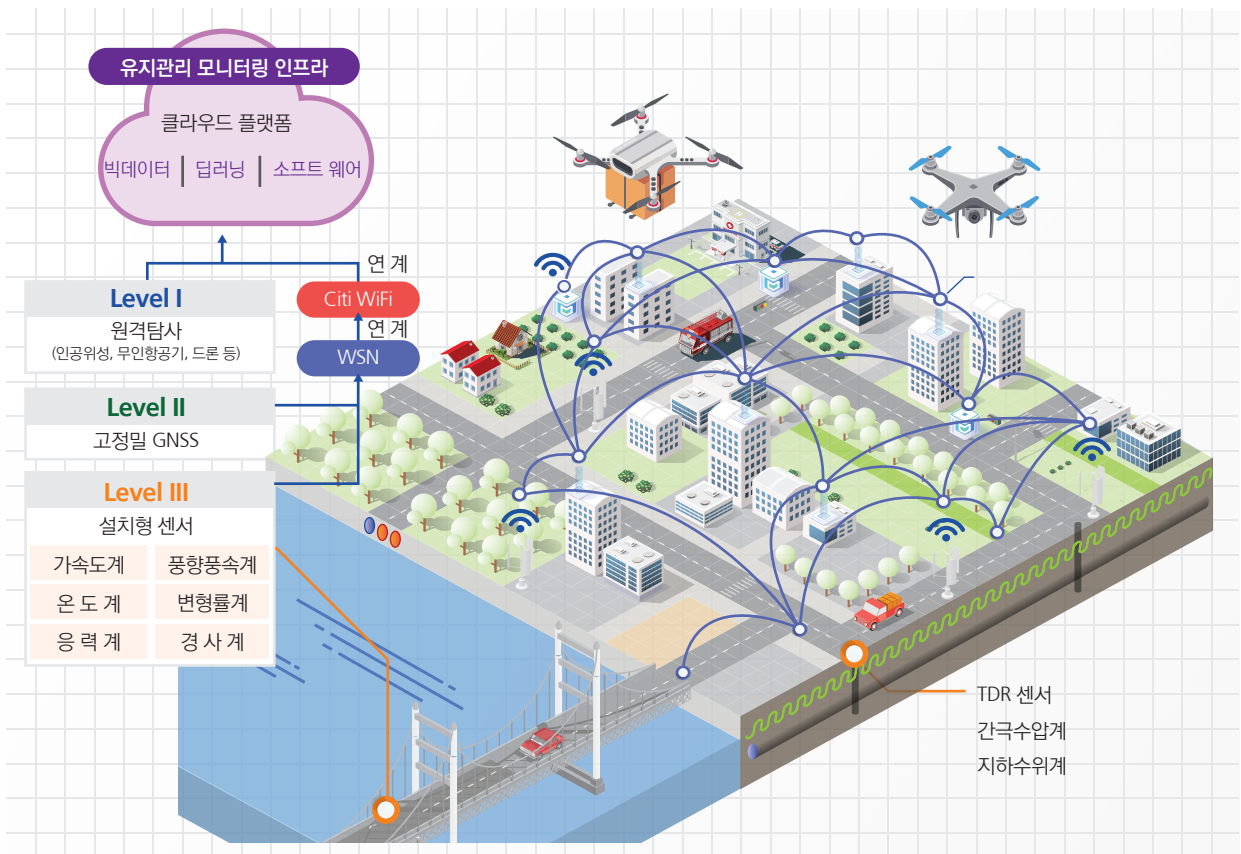
서울시의 정책에 발맞춰 서울기술연구원에서는 도시기반시설의 선제적 유지관리를 위해 첨단 기술을 활용한 서울시 도시기반시설의 유지관리단계를 제시하였다. 1단계 수준(Level I)은 원격탐사를 수행하고, 2단계 수준(Level II)에서는 고정밀 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 이용한 변위 모니터링, 3단계 수준(Level III)의 설치형 센서로 시설물에 작용되는 외력과 응답 및 손상 정보를 획득한다(서울기술연구원, 2019).

하지만, 기존의 시설물 변위 모니터링에는 측량 및 지형공간정보 분야에서 사용되는 고가의 상용화된 GNSS 장비를 사용하여 초기 구축 및 운영·유지 비용이 컸다. 그리고, 시설물 관리자가 사용하는 유지관리 시스템에 사용자화 및 최적화가 어려웠으며, 획득된 변위 정보를 활용할 수 있는 기법도 시스템과 연동되지 않았다. 이러한 문제들로 인해 변위 모니터링은 일부 국가 중요 구조물에만 선별적으로 적용되고 있으며, 토목분야에서의 인식도 매우 부정적이었다.

**고정밀·저전력·저비용
 GNSS 임베디드 장비와
 분석기술, 유지관리
 서버까지 연계 개발 필요**

고정밀 GNSS는 도시기반시설의 위치와 변동 정보를 획득할 수 있기 때문에 시설물의 유지관리와 변위 모니터링에서 가장 중요한 기술이다(정준연 등, 2018; Calvi et al., 1995; Crowley et al., 2004; Wang et al., 2011). 서울기술연구원(2019)에서는 고정밀 GNSS 기술현황 및 수준을 검토하였고, 시설물 유지관리에 적합한 mm 수준의 정밀도를 확보하고 있어 동특성 파악이 가능한 20Hz 이상의 측정이 가능하였다. 또한 비탈면과 제방, 댐 등의 토류 구조물의 거동 특성을 규명하기 위한 1년 이상의 장기 거동 측정에도 정확도를 유지하는 것으로 나타났다.

하지만 고정밀 GNSS는 고가의 하드웨어와 소프트웨어로 모니터링 시스템이 구축되므로 수많은 도시기반시설에 범용적으로 활용하기에는 한계가 있다(Chen, et al., 2018). 또한 단일 시설물별로 개별적인 통신 및 데이터관리 시스템이 운영되고 있었다. 따라서 저전력, 저가형(또는 보급형)의 고정밀 GNSS 기술이 개발돼야 하고, 통합 관리할 수 있는 모니터링시스템과 연계되어야 하는 것으로 나타났다.



[그림 1] 첨단 기술을 활용한 서울시 도시인프라의 유지관리단계(서울기술연구원, 2019)

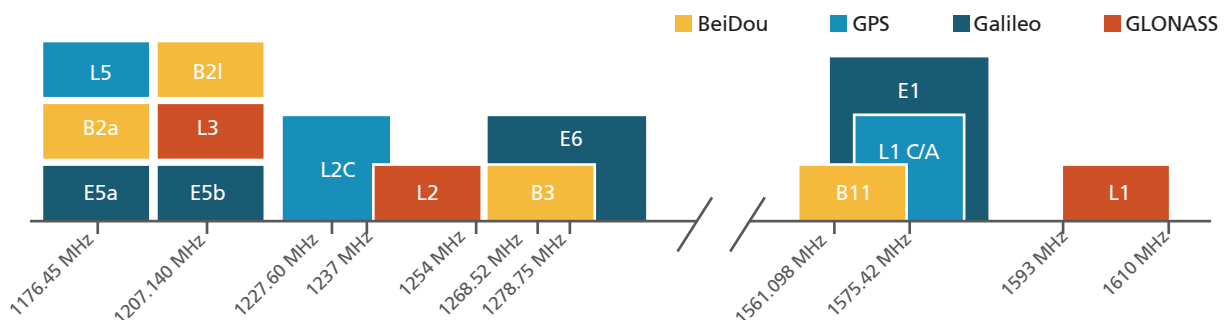
02

고정밀·저비용·저전력 GNSS 임베디드 장비 개발 및 성능 검증

누구나 사용 중인 GNSS 기술을 도시기반시설의 고정밀 변위 모니터링 목적으로 활용

GNSS는 전 지구를 대상으로 현재 작동 중인 항법위성시스템을 통칭하는 것으로, 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 Galileo 및 중국의 BeiDou를 포함한다. GNSS는 기본적으로 PNT정보를 제공하는데 P는 위치 정보(Positioning), N은 항법(Navigation), T는 시간정보(Timing)을 의미한다. 최근에는 사람이 사용하는 다양한 전자장비의 위치정보를 제공해주는 LBS(Location-Based Service)가 GNSS 시장에서 많은 부분을 차지하고 있다.

GNSS 시스템의 하드웨어 관점에서 고정밀 GNSS 변위 정보 획득이 가능하려면, 고품질의 GNSS 관측값이 GNSS 수신기에서 생성되어야 한다. 일반적으로 차량이나 스마트폰 등의 소형 전자장비에서 사용되고 있는 항법용 안테나와 수신기로는 고정밀 GNSS 변위 정보를 획득하기 어렵다. 따라서 시설물 변위 모니터링에는 전통적인 측지·측량용 GNSS 안테나/수신기를 사용되었으며, 이들 장비는 매우 고가이다. 측지·측량용 GNSS 안테나/수신기는 매우 비싸며 장치가 크고 전력 소비량도 크기 때문에 고정밀 GNSS를 이용한 변위 모니터링은 일부분야에 국한되어 사용되거나, 다목적담과 초장대 교량 등 국가 중요시설물에만 선별적으로 사용되었다. 반대로 GNSS의 글로벌 시장에서 이러한 시설물 변위 모니터링 분야는 약 3.7%로 매우 작은 부분만 차지하고 있어서, 대형 완성품 제조사들이 이러한 분야에 투자나 개발 그리고 서비스를 제공하지 않고 있다.



[그림 2] GNSS 공통 주파수 대역 (출처: GNSS User Technology Report : Issue 1(GSA, 2016))

RTK부터 PPP까지 오차 보정기술의 지속적 발달

cm에서 mm 정밀도의 위치정보를 제공하기 위한 주요기술들은 측지·측량 분야에서 개발되어왔으며, 대표적으로 RTK(Real-Time Kinematic)와 PPP(Precise Point Positioning)가 있다. 고정밀 GNSS 기술은 안테나와 수신기 등의 하드웨어 기술과 함께 RTK와 PPP 기술들이 실용화되면서 비약적인 발전을 이루고 있다.

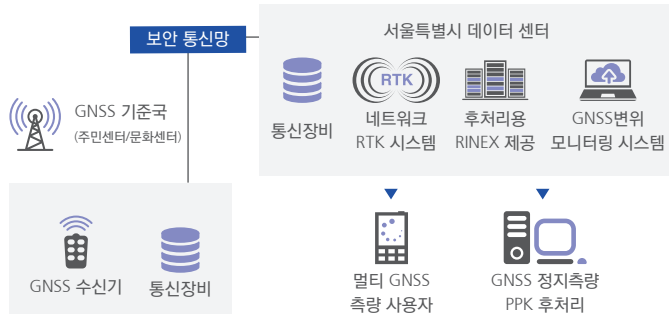
GNSS를 도시 인프라시설의 유지 관리에 사용하기 위해서는 수 mm 내지는 cm의 측위 정확도가 필수적이기 때문에 앞서 소개된 GNSS 응용기술들 중에서 이에 적합한 것으로는 현재 RTK와 PPP뿐이다. 두 기법이 기반하고 있는 인프라의 측면에서 보면, RTK는 지상 기준국의 관점에서 오차 보정정보를 생성하고 이를 이동국에 전송하여 제거하는 방법이다. 이에 반해 PPP는 개별 위성의 관점에서 오차 보정정보를 생성하고 이를 이동국에 전송하여 제거하는 방법이다.

[표 1] GNSS 관측값 오차의 제거 기법 비교표(GSA, 2020)

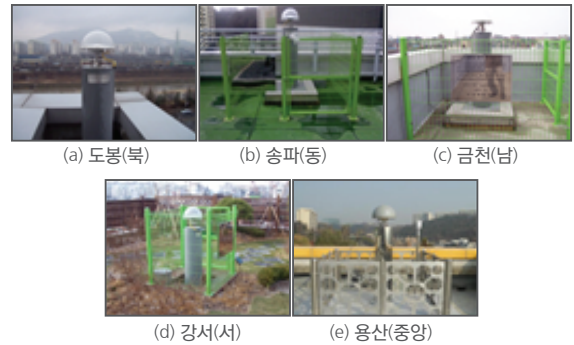
Method	SPP	DGNSS	SBAS	RTK	PPP-RTK	PPP
Observable	Code	Code	Code	Carrier	Carrier	Code/Carrier
Positioning	Absolute (in the GNSS reference frame)	Relative	Relative	Relative	Absolute (in the tracking network reference frame)	Absolute (in the tracking network reference frame)
Comm Link	No	Yes	Yes (GNSS like)	Yes	Yes	Yes
Single Frequency (SF) Dual Frequency	SF or DF	SF	SF current DF planned	Mostly DF	(SF) DF or TF	(SF) DF or TF
Triple Frequency Time To First Fix (TTFF)	Rx TTFF	As SPP + time to receive corrections	As DGNSS	As DGNSS + time to resolve ambiguities	Faster than PPP, but slower than RTK	As RTK, but time to significantly higher (more unknowns)
Horizontal Accuracy	5-10 m DF 15-30 m SF	< 1 m to < 5 m	< 1 m	1 cm+ 1 ppm baseline	< 10 cm	< 10 cm to < 1 m
Coverage	Worldwide	Up to 100's km	Up to 1000's km	Up to 10's km	Regional	Worldwide

서울특별시 멀티 GNSS 네트워크 RTK서비스를 활용한 고정밀 변위 정보 획득

「서울특별시 멀티 GNSS 네트워크 RTK 서비스」는 GPS 및 GLONASS의 현대화, Galileo, Beidou, QZSS 위성이 본격 운영됨에 따라 서울시 토지관리과에서는 2019년 하반기 '네트워크 RTK 시스템 고도화 사업'을 통해, 2020년 1월부터 국내 최초로 '멀티 GNSS 네트워크 RTK 데이터 서비스'를 제공하고 있다(서울특별시, 2019). 이를 통하여 GNSS 위성 측위가 불안정한 도심지역, 음영지역 등에서도 1인 GNSS 측량의 가용성이 확대되어 GNSS 측량 사용자뿐만 아니라, 자율주행, 드론, 연구 등 다양한 고정밀 GNSS 측위 수요자에게, 서울특별시와 인접 지역의 멀티 GNSS 네트워크 측위 솔루션을 제공하고 있다.



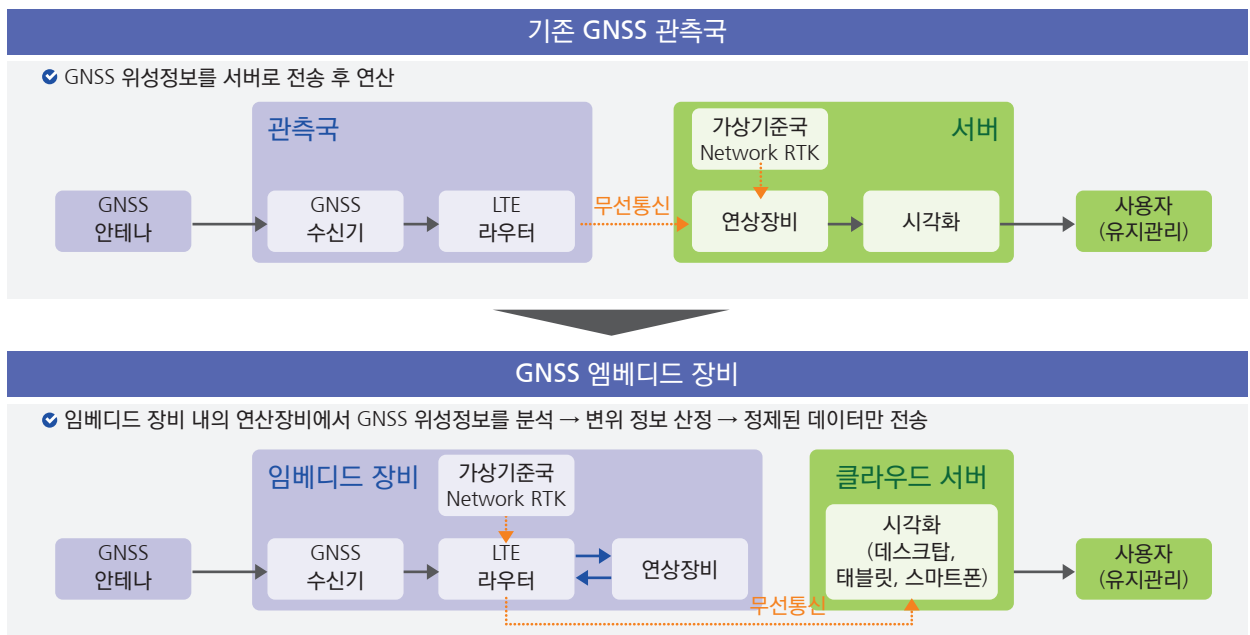
[그림 3] 서울시 멀티 GNSS 네트워크 RTK 데이터 서비스 개념도



[그림 4] 서울시 고정 기준국 현황 (출처: gnss.eseoul.go.kr)

GNSS 위성신호를
 임베디드 장비에서
 분석하여 변위 모니터링
 시스템의 효율성과
 활용성을 개선

그림 5는 기존 GNSS 관측국(Monitored Station)의 구성 및 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 구조물에 설치되는 GNSS 관측국은 GNSS 안테나와 GNSS 수신기, LTE 라우터로 구성된다. 서버에는 신호처리장치와 시각화 그리고 네트워크 RTK의 신호를 수신하기 위한 LTE 라우터로 구성된다. 서버 또는 개인 컴퓨터에서 위성신호의 분석과 시각화 기능을 모두 수행한다. 구조물에 설치된 GNSS 관측국은 GNSS 안테나와 수신기에서 위성신호를 수신하고 LTE 라우터를 통해 서버에 있는 신호처리장치에 전달하여 분석을 수행한다. 이 시스템은 GNSS 관측국의 LTE 라우터의 통신비용을 증가시키고, 신호 분석을 위한 샘플링 속도(Sampling Rate)가 통신 속도에 지배되는 단점이 있다. 또한 하나의 서버의 구축과 유지에 많은 소스가 필요하다.

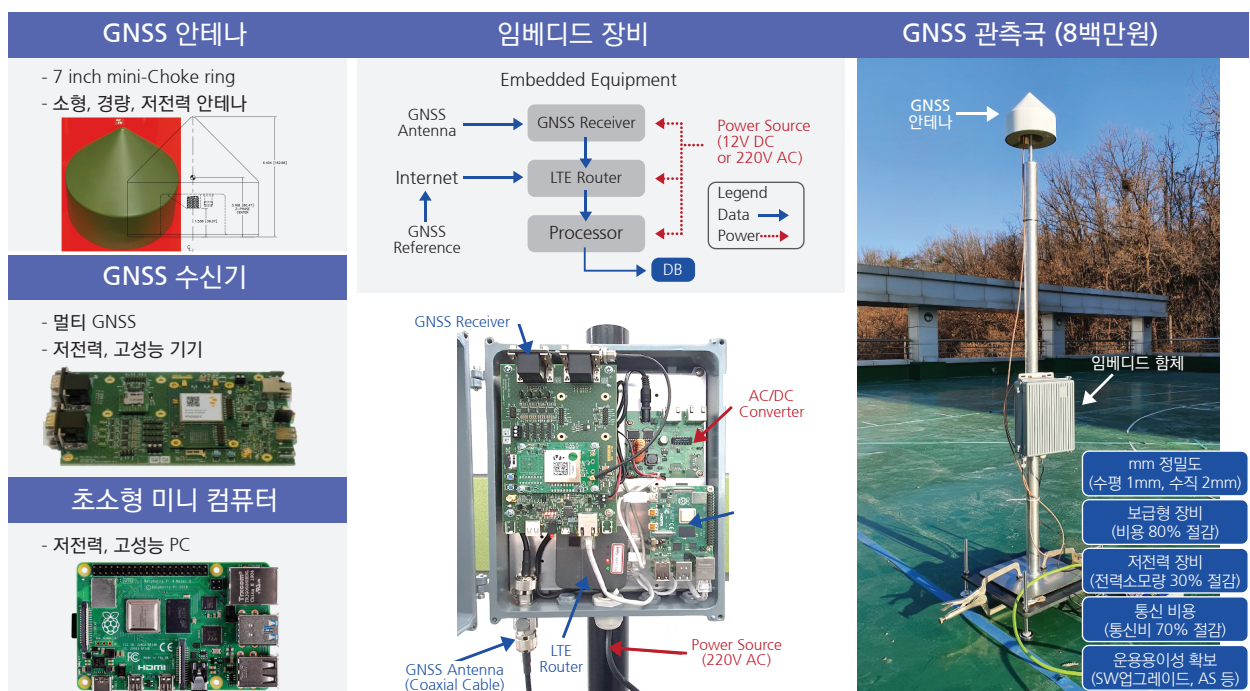


[그림 5] 기존 GNSS 관측국의 구성 및 블록 다이어그램

**고정밀·저전력·저비용
 GNSS 임베디드 장비
 개발**

그림 6은 본 연구에서 개발된 GNSS 임베디드 장비의 구성 및 블록 다이어그램이다. 구조물에 설치되는 GNSS 관측국에 신호처리장치를 배치하고 임베디드 장비로써, 위성신호와 네트워크 RTK의 신호를 모두 수신하여 변위 정보를 연산하도록 시스템이 구성된다. GNSS 임베디드 장비 내의 LTE 라우터를 통해 연산된 변위 정보만 정제하여 클라우드 서버로 전송하고 이 값들을 WAS(Web Application Server)로 다양한 단말기(데스크톱, 랩톱, 태블릿, 스마트폰 등)에 정보를 표출하게 된다. 엔드유저(End-user)인 구조물의 관리자는 쉽게 구조물의 변위정보를 확인할 수 있다.

GNSS 임베디드 장비는 신호처리장치 내에 위성신호를 분석하는 알고리즘과 Measurement Filter(이하 MF 필터)를 구현하여, 수평 1mm와 수직 2mm의 고정밀 위치정보를 제공한다. 그리고 기존 완성품 제조사들의 GNSS 관측국 대비하여 비용을 약 80% 절감하였다. 그리고 구성품들을 모두 저전력·고성능 기기들로 구성해서, 전력소모량을 약 30% 절감하였다. 그리고 변환 및 정제된 3축 위치 또는 변위 정보만을 클라우드 서버에 제공하므로, 통신비용을 약 70% 정도 절감하였다. 그리고 개발된 GNSS 임베디드 장비는 스마트 유지 관리의 목적으로 개발되었으며, 데이터관리시스템과 분석시스템까지 연동되므로, 시설물의 변위 모니터링에 적합하며 운영용이성을 확보하였다.



[그림 6] 개발된 GNSS 임베디드 장비의 구성 및 블록 다이어그램

그림 7은 GNSS 임베디드 장비의 안정성 검증 시험을 나타낸 것이다. 앞서 GNSS 안테나와 수신기들을 바꿔가며 성능을 검토하였으며, 최종 선정된 GNSS 안테나와 수신기의 위성신호 수신 및 안정성을 검증하였다. 2020년 11월 7일부터 2021년 1월 22일까지 총 77일간 일반 건축물 옥상에서 시험을 진행하였으며, 당시 겨울철의 눈이 내리는 날씨에서 GNSS 임베디드 장비는 정상 작동되었으며 내구성에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 포지셔너를 이용한 야외 검증 사진을 나타낸 것이다. 수평과 수직 방향으로 각 50mm만큼 포지셔너를 이동하였으며, 이동 전후의 GNSS 데이터를 분석하여 정밀도와 응답시간을 검증하였다.



(a) 전경

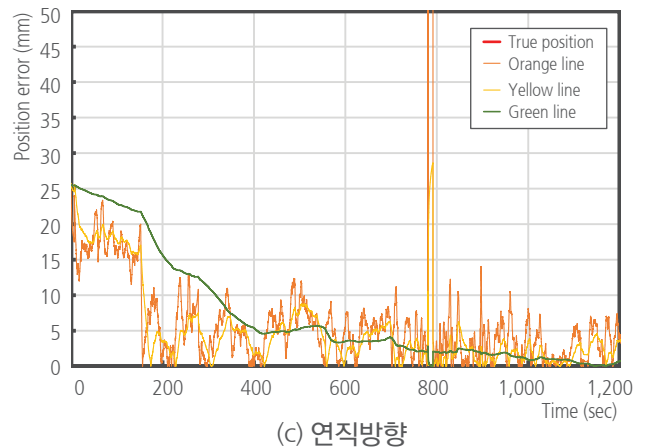
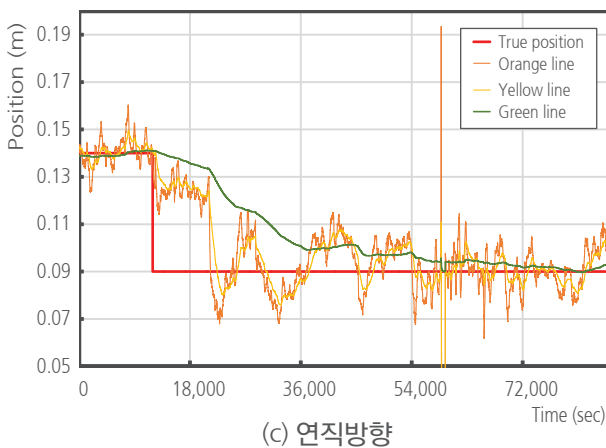
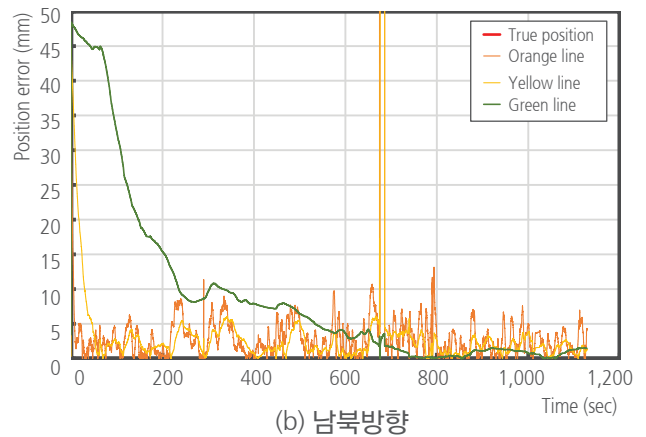
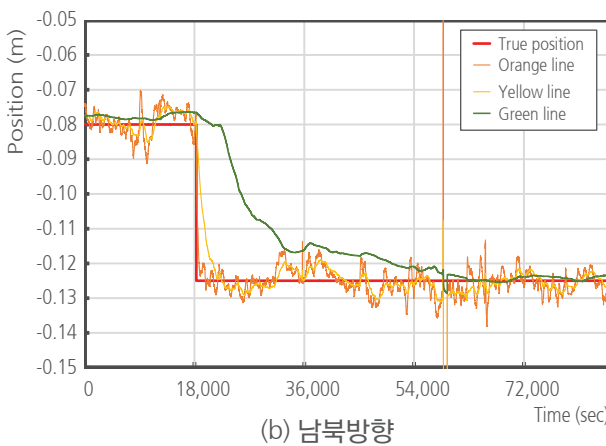
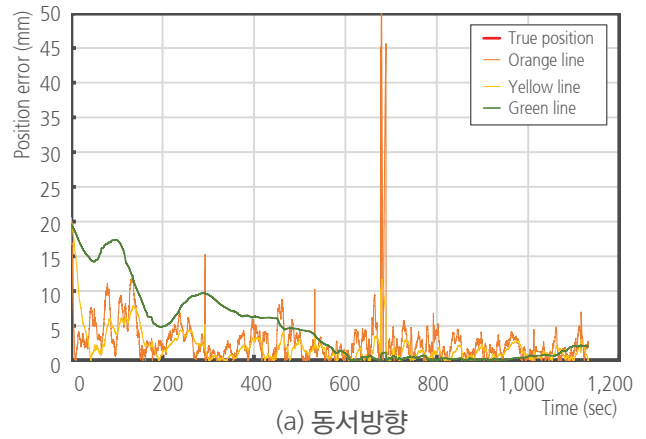
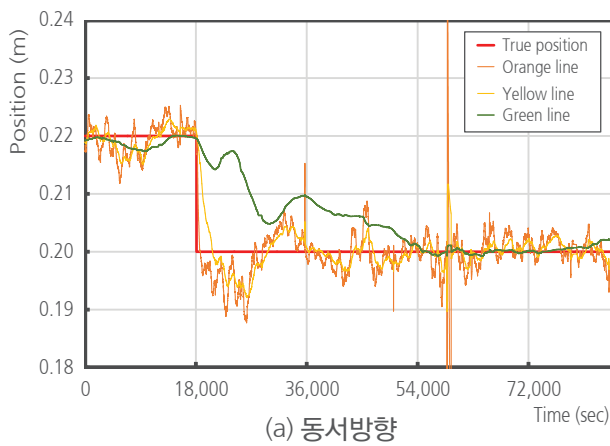
(b) 수평과 수직 이동량

[그림 7] 포지셔너를 이용한 야외 검증 전경

수평 1mm와
수직 2mm의
정밀도 검증 완료

그림 8은 고정밀 GNSS 임베디드 장비에서 획득된 시계열 변위 정보이며, 그림 9는 위치 오차에 대한 수렴곡선이다. 그림에서 주황색선(Orange Line)과 노란색선(Yellow Line) 그리고 녹색선(Green Line)은 구현된 위성신호 분석 필터의 엔진 설정(Engine Settings)에서의 특성값을 LPF1(Fast)과 LPF2(Medium), LPF3(Slow)으로 각각 30초와 5분, 1시간으로 설정한 것이며, 간단히

신호처리에 대한 필터값이다. 두 시계열 변위 정보 모두 실제 위치(True Position)를 따라가며 수렴하는 것으로 나타났다. 그림 9의 위치 오차에 대한 수렴 곡선을 보면, 약 10시간 이내에 모두 1.0mm 이내의 정밀도를 만족하는 것으로 나타났다.



[그림 8] 시계열 변위 그래프

[그림 9] 위치 오차에 대한 수렴 곡선

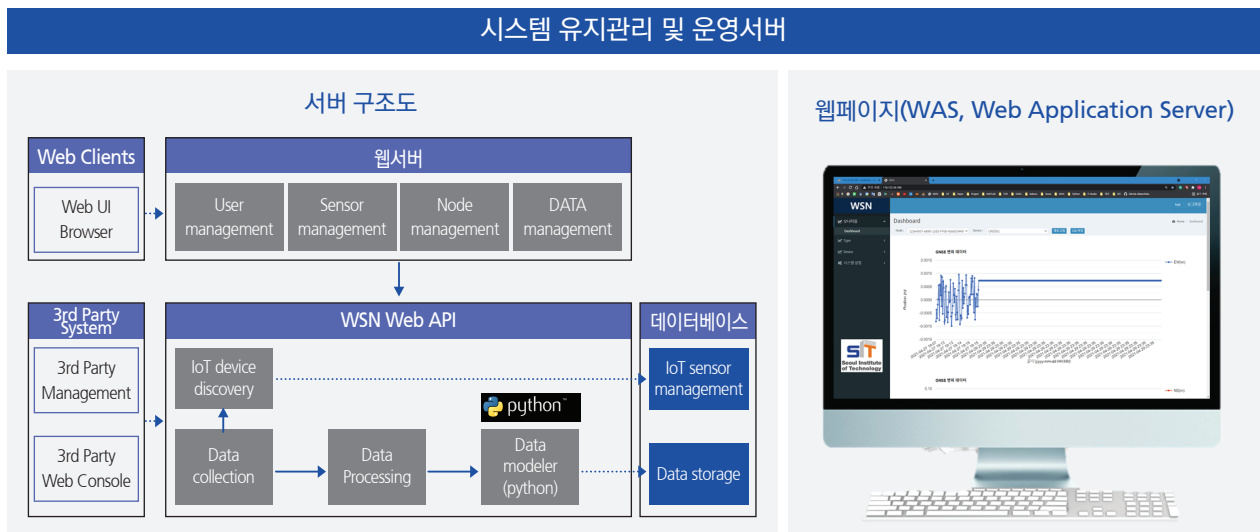
03

시계열 변위 데이터의 관리 및 AI 기반 분석 기술 구현

시계열 변위 정보의 효율적 관리를 위한 서버 구현

고정밀 변위 모니터링 기술은 GNSS 변위 정보와 이 시계열 변위 데이터의 분석 기술을 유지관리 서버에서 관리 및 운영하는 것이다. 데이터베이스와 웹서버를 포함한 서버와 웹 페이지로 크게 구성된다. 데이터베이스는 그림 1의 유지관리 2단계의 GNSS 변위 정보와 3단계의 설치형 센서 정보를 관리하게 되며, 웹서버에서는 사용자, 센서, 노드, 데이터에 대한 관리를 수행하게 된다. 그리고 웹 API에서 데이터 수집과 분석을 수행하며, 시계열 데이터 분석 등을 위한 파이썬 스크립트는 데이터 모델러(Data Modeler)로 구동되도록 하였다.

최근 개발된 수변구조물 통합플랫폼(WINS+)에서 실시간 통합 안전도평가 시스템(RSEE, Real-time Safety Evaluation System)은 시계열 데이터의 분석 외에도 다양한 구조물의 분석 기술들이 포함되어, 미들웨어 컴포넌트로 구성하고 운영체제에 의존하지 않는 JAVA 개발환경을 채택하였다. 하지만 시설물 변위 모니터링에서는 시계열 데이터의 획득과 분석에 초점을 맞춰 아키텍처를 설계하였다.

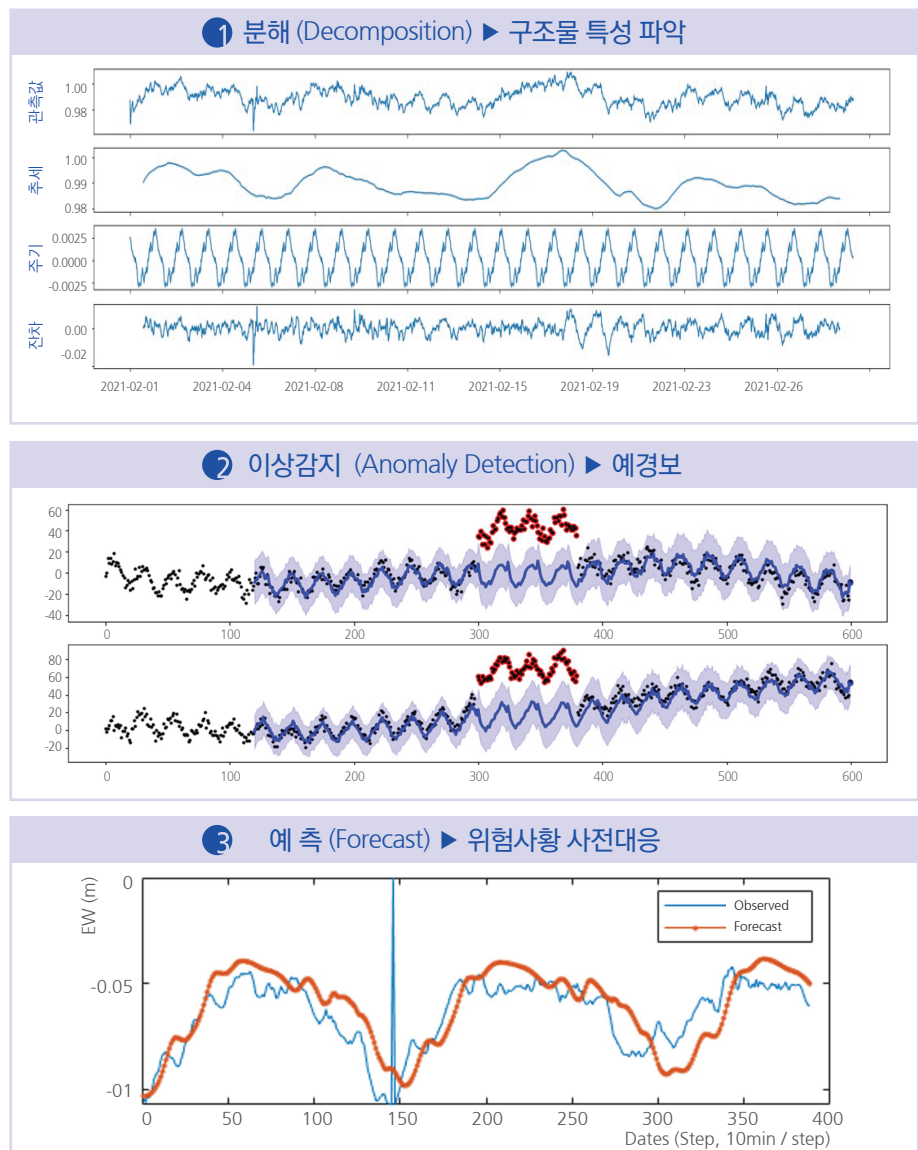


[그림 10] 고정밀 변위 모니터링 기술

**시계열 변위 정보로
 시설물의 특성, 이상
 감지, 거동 예측을
 수행하는 AI 분석 기술
 구현**

시설물의 유지관리를 위해 획득된 변위 정보의 AI 기반 시계열 데이터 분석 기법(Time Series Data Analysis)까지 함께 구현했다. 시계열 변위 정보를 분해(Decomposition)하면 추세 성분(Trend), 계절적 성분(Seasonal), 잔차 성분(Residual)으로 구분되는데 이것으로 시설물의 특성을 파악할 수 있다. 이상감지(Abnormality Detection)를 통해 변위 정보만으로 이상거동 유무를 파악할 수 있고, 마지막으로 예측(Forecast)을 통해 위험상황에 대한 선제적 대응이 가능하다.

개발된 AI 분석 기법은 모니터링 운영 서버에서 엔진으로 탑재 및 구동되어 효율이 좋고 지속적으로 빅데이터가 쌓이면 이상감지 정확도를 높일 수 있다.



[그림 11] 고정밀 변위 모니터링 기술

변위 모니터링을 통한 도시기반시설의 유지관리 방안 제시

고정밀·저전력·저비용
GNSS 변위모니터링
기술은 도시기반시설의
유지관리에 범용적으로
활용가능

서울시 18종 시설물의 주요하중과 재해 및 측정인자를 나타낸 것이다 (서울기술연구원, 2019). 18종 시설물마다 작용되는 외력과 손상 요인이 다르며, 주요 재해 인자는 지진, 풍수해이다. 따라서 측정인자는 시설물에 작용되는 외력을 측정하는 가속도나 토압, 수압, 지하수위 등이며, 이에 대한 시설물의 응답으로 변위와 기울기, 누수 등이 있다. 본 연구에서 개발된 시설물 변위 모니터링 기술은 도로시설물인 교량, 옹벽, 절토사면와 하천시설물인 하구둑, 수문, 제방, 배수 펌프장 그리고 건축물에 범용적으로 적용하여 선제적 유지관리를 실현할 수 있다.

현재, 도시기반시설은 점점 기반으로 유지관리 되고 있지만 최근 첨단기술들이 발달되면서 모니터링 기반의 유지관리로 전환이 가능하다. 도시기반시설 중 대부분의 토목건축 구조물은 태풍과 지진 등과 같은 급격한 외적환경 변화에 의해 구조적인 손상이 발생할 수 있고, 노후화에 의한 열화 현상으로 성능이 저하될 수 있다. 그러나 구조물은 스스로 구조 안전연부를 진단하고 보수보강을 실시할 수




[그림 12] 고정밀 GNSS를 이용한 변위 모니터링 적용가능 도시기반시설

※ 출처: <https://www.furuno.com/en/systems/terrain-monitoring>

변위모니터링에서 획득된 데이터의 분석기법까지 연동

없기 때문에 변위 모니터링을 통해 대처방안을 제시할 수 있다. 이러한 대표적 기법인 구조물 건전도 모니터링(SHM, Structural Health Monitoring)이다.

본 연구에서 개발된 변위 모니터링은 구조물의 건전도를 판단하는데 제일 중요한 물리적 계측치이다(Wang, et al., 2011). 교량, 고층빌딩 등과 같은 대형 구조물의 변위를 계측하는 대표적인 센서는 LVDT(linear variable differential transformer), LDV(laser doppler vibrometer) 그리고 RTK-GNSS(real-time kinematic global navigation satellite system) 등이 있지만, 계측 정확도 또는 실제 구조물への 적용성 측면에서 한계가 있다(정연준 등, 2018). 본 연구에서 개발된 고정밀 GNSS 임베디드 장비와 이를 이용한 변위 모니터링 시스템은 LVDT, LDV의 적용성 측면을 개선하였으며, RTK-GNSS의 단점을 개선한 실효성있는 기술이다.

교량의 스마트 유지관리를 위해서는 다양한 점검 기술과 모니터링 기술이 필요하다. 본 연구에서 개발된 GNSS 변위 모니터링 기술은 고정밀·저전력·저비용 장비로써 모니터링 기반의 유지관리에 그 활용가치가 매우 높다. 이외의 모니터링 기반 시설물 유지관리에 GNSS 장비와 시계열 데이터의 분석기법은 범용적으로 활용이 가능하다. 

참고문헌

- 1) 서울기술연구원 (2019), "GNSS 기술현황과 활용성 검토에 관한 연구"
- 2) 서울기술연구원 (2021), "GNSS와 AI를 이용한 도시기반시설 변위 모니터링 기술과 활용방안"
- 3) 서울특별시 (2017), "서울인프라 다음 100년 프로젝트" 보도자료.
- 4) 서울특별시 (2019), "GNSS 네트워크 RTK 시스템 고도화 사업".
- 5) GSA (2020). GNSS User Technology Report : Issue 3.
- 6) Wang, N., O'Malley, C., Ellingwood, B.R., and Zureick, A.-H. (2011), Bridge Rating using System Reliability Assessment. I: Assessment and Verification by Load Testing, Journal of Bridge Engineering, 16, pp.854-862.
- 7) 정연준, 최재묵, 김기영, 손훈 (2018), "이단계 칼만필터를 활용한 사회기반 구조물의 3자유도 동적변위 계측시스템", 한국전산구조공학회 논문집, 제31권 제3호, pp.141-145.
- 8) Chen, Q., Jiang, W., Meng, X., Jiang, P., Wang, K., Xie, Y., and Ye, J. (2018), "Vertical deformation monitoring of the suspension bridge tower Using GNSS: A Case Study of the Forth Road Bridge in the UK." Remote Sensing, 10(3), 364p.
- 9) Calvi, G.M. and Kingsley, G.R. (1995), "Displacement-based seismic design of multi-degree- of-freedom bridge structures", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 24(9), pp.1247-1266.
- 10) Crowley, H., Pinho, R., and Bommer, J.J. (2004), A Probabilistic Displacement-based Vulnerability Assessment Procedure for Earthquake Loss Estimation, Bulletin of Earthquake Engineering, 2, pp.173-219.

제 12호 GNSS와 시를 이용한 도시기반시설 변위
모니터링 기술 개발

발행인 박진순(원장 직무대행)

편집인 홍보팀 Tel. 02-6910-9810

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

발행일 2021년 11월 25일



9 772733 750002 08

ISSN 2733-7502