

# 위성 SAR 자료를 활용한 도심지 지하 교통 인프라 건설에 따른 지표 변위 모니터링 적용성 연구

김우석<sup>1</sup> · 황성필<sup>1\*</sup> · 유완규<sup>1</sup> · Norikazu Shimizu<sup>2</sup> · 김창용<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원, <sup>2</sup>야마구치대학 창성과학연구과 명예교수,

<sup>3</sup>한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원

## A Study on Monitoring Surface Displacement Using SAR Data from Satellite to Aid Underground Construction in Urban Areas

Woo-Seok Kim<sup>1</sup> · Sung-Pil Hwang<sup>1\*</sup> · Wan-Kyu Yoo<sup>1</sup> · Norikazu Shimizu<sup>2</sup> · Chang-Yong Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Emeritus Professor, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University

<sup>3</sup>Senior Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

### Abstract

The construction of underground infrastructure is garnering growing increasing research attention owing to population concentration and infrastructure overcrowding in urban areas. An important associated task is establishing a monitoring system to evaluate stability during infrastructure construction and operation, which relies on developing techniques for ground investigation that can evaluate ground stability, verify design validity, predict risk, facilitate safe operation management, and reduce construction costs. The method proposed here uses satellite imaging in a cost-effective and accurate ground investigation technique that can be applied over a wide area during the construction and operation of infrastructure. In this study, analysis was performed using Synthetic Aperture Radar (SAR) data with the time-series radar interferometric technique to observe surface displacement during the construction of urban underground roads. As a result, it was confirmed that continuous surface displacement was occurring at some locations. In the future, comparing and analyzing on-site measurement data with the points of interest would aid in confirming whether displacement occurs due to tunnel excavation and assist in estimating the extent of excavation impact zones.

**Keywords:** SAR, surface displacement, time series, underground transportation infrastructure

### 초 록

최근 도심지의 인구 집중 및 인프라 과밀현상에 따라 인프라 시설의 지하화 건설이 새롭게 부각되고 있으며, 기반 시설의 건설 및 운영 과정에서 안정성을 평가하기 위한 모니터링 시스템 구축은 중요한 부분이다. 이러한 모니터링 중 지반의 안정성을 평가하고 설계의 타당성을 확인, 위험 예측, 안전한 운영 관리, 건설 비용 절감에도 유용한 방법으로 건설 및 운영 중까지 사용 가능한 광역적 지역 대상으로 비용과 정확성을 고려한 지반조사 기법에 관한 연구가 필요한 부분이다. 이에 본 연구에서는 도심부 지하도로

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Sung-Pil Hwang  
E-mail: hsp@kict.re.kr

Received: 14 February, 2024

Revised: 5 March, 2024

Accepted: 7 March, 2024

© 2024 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

건설 시 주변 지표 변위 관찰을 위해 SAR 자료를 이용하여 시계열 레이더 간섭기법을 통한 분석을 수행하였다. 그 결과, 일부 지점에서는 지속적인 지표 변위가 일어나고 있음을 확인할 수 있었으며, 추후, 주요 관심 지점 등에 대해서는 현장 실측한 계측자료와의 비교·분석을 한다면 터널 굴착 영향에 따른 변위 발생 여부 확인 및 굴착 영향 범위 산정에 도움이 될 것으로 판단된다.

**주요어:** 합성개구레이더, 지표 변위, 시계열, 지하 교통 인프라

## 서론

수도권 및 도심지 인구 집중과 인프라 과밀현상으로 도시 지역 교통 정체 현상이 지속적으로 문제가 되고 있다. 이러한 도시 문제 해결을 위해 국가에서는 교통인프라 시설의 지하화를 추진하고 있으며, 수도권의 경우 광역도시철도인 GTX(Great Train Express) 및 지하 고속도로가 시공 및 계획 중이다. 부산지역의 경우 도시의 동서를 연결하는 지하도로를 추진하고 있으며, 만덕-센텀 지하도로가 시공 중이며 사상-해운대 지하 고속도로가 계획 중이다.

이러한 교통인프라의 지하화는 시민들이 거주하는 지상 공간의 안정성에 영향을 미칠 수 있고 특히 지반침하 등을 유발할 수 있는 위험을 동반하게 된다. 이러한 문제점들을 예방하기 위하여 설계 및 시공 중 다양한 공법들이 적용되며, 문제 발생에 대응하기 위해 다양한 계측 기법들이 적용 중이다. 하지만 도시 지역에 건설되고 있는 지하 교통인프라의 경우 연장이 길고, 주택 등 다양한 구조물들이 존재하고 있어서 정밀한 계측에 어려움이 있다. 또한 지상에 다양한 구조물들이 존재하고 있어 지반조사 및 계측의 위치를 선정하기도 어려운 측면이 존재한다. 또한 넓은 범위의 계측을 위해서는 큰 비용이 발생할 수 있다. 이에 사회 기반 시설 건설 및 운영에 대한 모니터링 시스템에 중요한 요건은 광범위한 지역의 지반 거동을 고도의 정확도로 모니터링할 수 있어야 한다는 것이며, 이에 더하여 비용은 낮추고 시스템은 손쉽게 다룰 수 있어야 하는 부분이다.

지하 교통 인프라의 계획 시 불안정한 지반 또는 광범위한 범위의 조사가 요구되는 지역을 사전에 확인하기 위한 하나의 기법으로 인공위성 자료를 활용할 수 있다. 특히 최근 다양하게 활용되고 있는 영상 레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR) 또는 레이더 간섭기법(Interferometric SAR, InSAR)을 활용하면 기상 조건이나 주간 및 야간에 관계없이 고품질의 지표 영상을 확보할 수 있어, 넓은 지역의 변위 관측이 가능하여 기존 계측장비가 가지고 있는 한계를 극복할 수 있다(Hanssen, 2001).

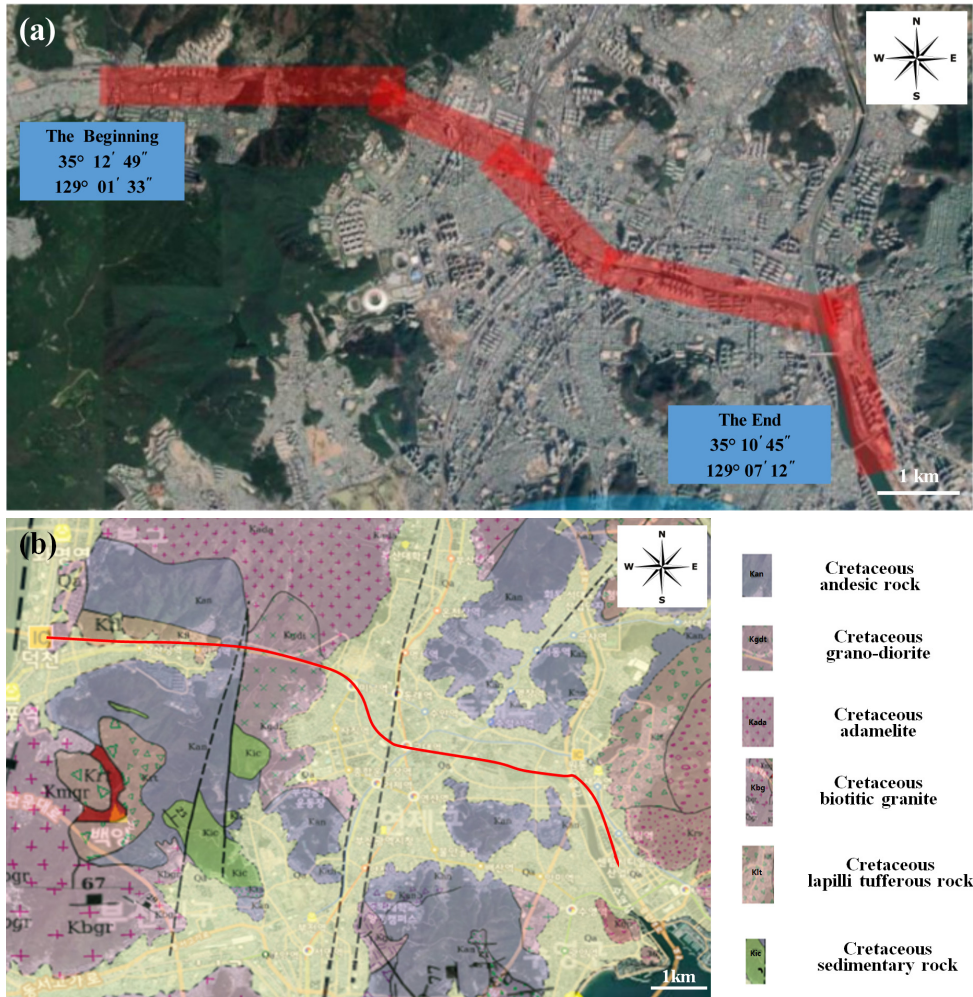
두 개의 SAR 영상을 활용한 단일 InSAR는 간섭 상의 공간 기선 거리 및 시간 기선 거리에 따라 긴밀도가 달라질 수 있으며, 지형고도 자료의 부정확성이나 위성 궤도 정보의 부정확성 등으로 인한 변위 관측 오차를 보정하기 어렵다(Kim et al., 2023a). 따라서 본 연구에서는 정밀도를 향상시키고 지반의 변위를 시간 흐름에 따라 확인할 수 있는 다수의 SAR 자료를 활용하는 시계열 레이더 간섭기법을 활용하였다. 시계열 레이더 간섭기법은 지반침하와 같은 장기적인 지반 변위 모니터링 분야에 널리 이용되고 있다(Yastika et al., 2018; Hussain et al., 2022; Kim and Han, 2022; Kim et al., 2022a, 2022b, 2023a, 2023b).

본 연구에서는 시계열 레이더 간섭기법을 활용하여 부산광역시 동서축을 연결하는 만덕-센텀 간 지하도로 건설 현장을 대상으로 2015년 5월부터 2021년 1월까지의 SAR 영상을 사용하여 분석하였고, 이를 통해 SAR 영상의 지하 교통인프라 현장에서의 적용 가능성을 확인하였다.

## 연구 지역

본 연구 지역은 부산지역(북구 만덕동~해운대구 재송동)의 산악 통과 구간과 도심 하부 통과 지역을 대상으로 하였다

(Fig. 1a). 해당 지역의 지질 특성은 중생대 백악기에 형성된 안산암 및 화강섬록암의 경암 또는 중경암으로 분포된 것으로 파악되었으며, 도심부는 일반적인 층적층으로 분포하고 있다(Fig. 1b). 백악기 말부터 발달한 연구 지역의 서쪽부(양산 단층) 및 중심부(동래 단층)에 위치한 단층들은 대부분 북북동-남남서 방향으로 분포하고 있다. 또한, SAR 분석 결과 도출이 어려운 일부 산악부 외 대부분 도시부의 층적층에 위치하고 있어 대부분 구간에서 자료 분석 및 결과 도출에 어려움이 없을 것으로 판단되었다.



**Fig. 1.** (a) Location of the study area. The red band is the underground tunnel construction site. (b) Geological map of the study area. Solid and dotted lines show faults and probable faults or geological boundaries. Alluvial layers are shown in yellow. The red solid line represents the underground tunnel construction route.

### 활용 자료 및 분석 방법

본 연구는 Sentinel 1 A/B 위성의 SAR 자료를 활용하여 다중시기 분석을 위하여 SBAS(Small BAseline Subset) 및 PSInSAR(Permanent Scatterer InSAR) 기법을 사용하여 시계열 분석을 진행하였다. 이는 지표 변위 모니터링에 널리 사용되는 레이더 간섭기법 중 두 가지 주요 기법이다. SBAS는 주로 작은 베이스라인(base line) 하위 집합을 사용하여 연속적 측정에 효과적으로, 이 기법은 넓은 영역에서 지표 변위를 분석하는 데 유용하다. PSInSAR 기법은 특정 지점에서 지속

적인 레이더 반사체를 식별하고 이를 사용하여 지형 변화를 감지하는 기법으로 특정 위치나 구조물에 대해 연속적인 변위를 관찰하는 데 적합하다. 이러한 기법들은 도심부에서의 지표 변화가 빈번한 지역에서 유용하게 사용될 수 있다. 분석된 SAR 자료 수는 궤도 경로 61을 사용하여 유축 하강으로 촬영한 165개 이미지를 사용하였다. 자료 취득 기간은 2015년 5월 25일부터 2021년 1월 11일로 모든 Sentinel-1 A/B SAR 자료는 유럽 우주 항공국(European Satellite Agency, ESA)에서 무료로 제공받아 사용하였다. 간섭도에서 지형 요소를 제거하기 위해 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 사용하였으며, 30미터 공간 분해능과 함께 ALOS-3WG DEM을 이용한 DEM은 일본 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)에서 무료로 제공받아 활용하였다.

### SBAS DInSAR 설정

SAR 자료는 노이즈(Noise)에 의해 심각한 영향을 받는 경우가 있으며, DInSAR 결과의 정확도를 높이기 위해 SBAS 방법이 제안되었다(Berardino et al., 2002). 이 방법은 특정 지역에서 일련의 SAR 이미지를 분석하고 다중 시간적 DInSAR 처리를 수행하여 공간-시간 LOS 변위 분포를 생성하는 것으로 광역적 변위 관찰보다는 국부적인 변위 분석에 유용하다고 볼 수 있다(Lanari et al., 2007). SBAS 방법의 주요 기능은 다수의 간섭도에서 모든 위상 잡음과 오류를 줄이는 것이다. 이에 장시간 동안 지속되는 지형 및 지표 변화, 지진 및 화산 활동 등을 모니터링 하는데 유용하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 SAR 자료를 Envi-SARscape 5.6(Harris Geospatial Solutions, Inc.)를 활용하여 SBAS DInSAR 방법을 사용하여 분석하였으며, 165개 이미지를 이용하여 705개 간섭도 분석을 하였다. SBAS 분석에 사용되는 매개변수는 Table 1과 같으며, Fig. 2에서는 SAR 자료의 시간-위치를 나타내고 있다. 녹색 다이아몬드는 SAR 자료, 황색 다이아몬드는 슈퍼 마스터(super master), 청색선은 간섭도 분석을 위한 SAR 자료 쌍 연결을 의미한다.

일부 간섭도는 대기 교란이나 궤도 오류 등과 같이 다양한 오류의 영향을 받으며, 이 같은 오류를 줄이기 위해 리플래팅(reflattening)이나 정제(refinement)하는 과정을 수행하여야 한다. 대상 지역에서 멀리 떨어진 68개 지상 제어점(Ground Control Point, GCP)이 안정적이라고 가정하였고, 해당 제어점을 선택하고 관찰 지역으로 설정하였다.

또한, 터널의 굴착에 따른 지표상의 영향 범위를 설정하여, 분석을 수행하였다. Attewell et al.(1986)은 터널 굴착에 따른 굴착 영향 범위는  $45^{\circ}+(\varnothing/2)$ 로 제안하였으며, Seoul Metropolitan City(2020)에서는 터널 심도(토피고) 60 m일 경우 굴착 영향 범위를 터널 외측에서부터 거리 71.5 m로 정한 바 있다.

Table 1. SBAS parameter setting

Parameter	Descending (2015~2021)
Temporal baseline threshold	Max: 60 days
Perpendicular baseline threshold	2% of critical baseline
Azimuth looks	1
Range looks	4
Number of interferograms	705
Interferogram filtering method	Goldstein
Unwrapping method	Minimum cost flow (MCF)
Unwrapping coherence threshold	0.2
Refinement method	Remove residual phase
SBAS displacement model	Linear

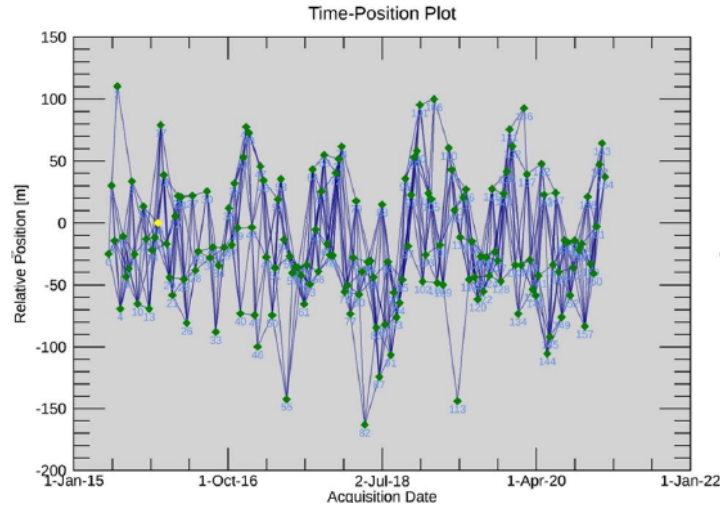


Fig. 2. Time-Position maps in connection graphs for SBAS-DInSAR analysis (descending, Sentinel-1 data) (yellow dot: super master data, green dot: SAR data).

### PSInSAR 설정

SBAS DInSAR 결과를 확인한 후, 동일한 SAR 자료는 Envi-SARscape 5.6(Harris Geospatial Solutions, Inc.)에 구현된 PSInSAR(Ferretti et al., 2001; Ferretti, 2014) 방법을 이용하여 추가적으로 분석하였다. 주요 파라미터(parameter) 설정은 공간적으로 변화가 급격하지 않으며 시간상으로는 불규칙한 특성에 기초하여 각각 Low Pass(LP) 필터링(Filtering)과 High Pass(HP) 필터링(Filtering)을 적용하였으며, 0.75를 임계값으로 설정하여 임계값보다 큰 긴밀도를 가진 화소들을 최종 고정산란체로 선정하였다. 또한, PSInSAR는 SBAS DInSAR와는 다른 개념으로 개체의 지속적 산란에 의존하며 해당 객체에 대해서만 계산을 수행한다. 이에 따라, PSInSAR는 여러 객체가 영구 레이더 산란으로 포착되는 도시 지역에 적용하는 데 적합해 보인다.

다른 한편으로, PSInSAR는 해당 지점에서만 변위를 제공하는 반면, SBAS DInSAR은 공간 변위 분포를 제공할 수 있다. PSInSAR에서 PS점의 모든 결과는 서로 독립되며, Fig. 3은 본 연구에 사용된 PSInSAR의 시간-위치 도면을 나타는

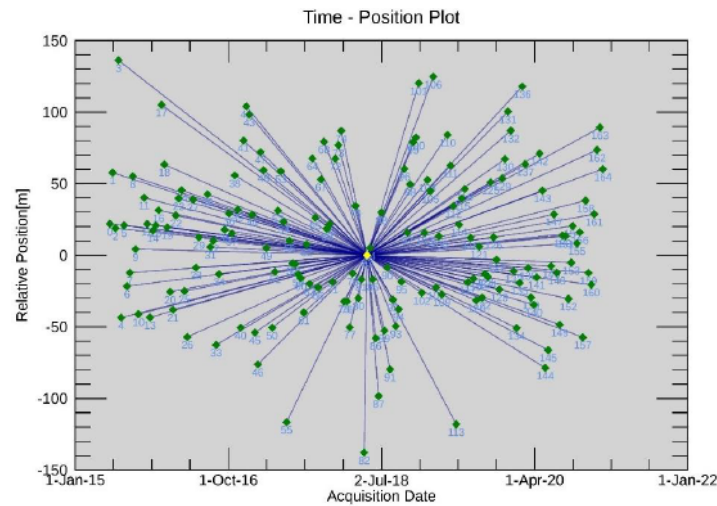


Fig. 3. Time-Position plot for PSInSAR processing (descending, Sentinel-1 data). The yellow dot is a super master data.

것으로 황색 점은 슈퍼 마스터(super master) 자료를 나타내며, 이는 다른 모든 자료가 해당 자료에 함께 등록된다는 것을 의미하며, 이 경우 간섭도 수는 164개가 된다.

## 분석 결과

### SBAS DInSAR 분석 결과

지표 변위 중 레이더에서 지표를 향하는 방향인 LOS(Line of Sight)의 거동을 알기 위해 시간 경과에 따른 165개의 이미지를 활용하여 SBAS DInSAR 기법으로 변위를 추출하였다. 먼저, LOS 변위의 전이가 보이는 위치는 GCP에서 선택하였으며, Fig. 4에서 LOS 변위 지도에서 자주색 원으로 표시하였다. 앞서 언급한 대로 GCP는 그 위치가 안정적이라고 가정된 터널 공사 노선에서 멀리 떨어진 도심부에서도 무작위로 선정하였으며, 대부분 녹지 지역(인프라 구조물이 없는 지역 포함)에 위치하는 것으로 확인되었다. 또한, GCP 대부분  $\pm 10$  mm 이내의 변위를 나타내는 것으로 확인되며, 10 mm는 Sentinel-1 자료를 사용한 DInSAR 분석의 일반적인 정확도이다.

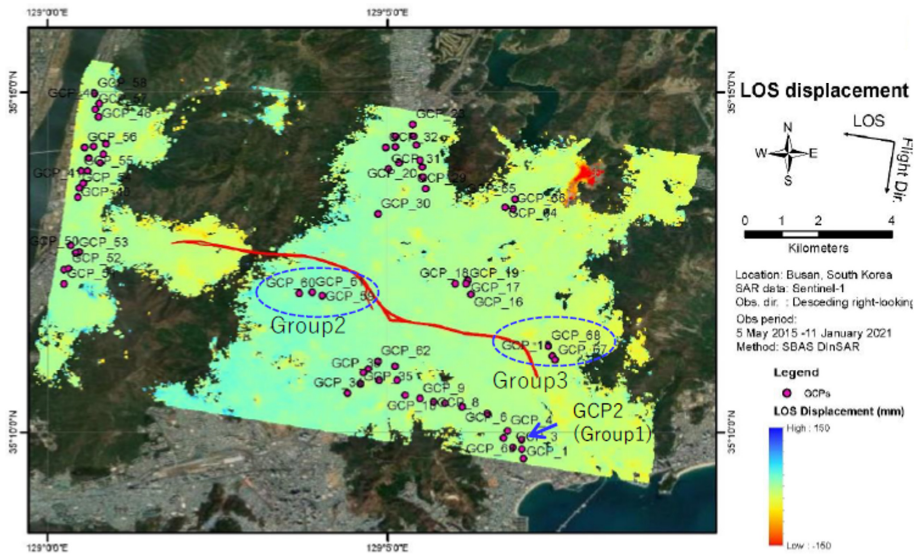


Fig. 4. GCPs overlaid on LOS displacement map.

Fig. 5는 분석에 활용한 전체 기간 동안 모든 GCP에서 LOS 변위의 시간 전이를 나타내는 것으로 GCP의 변위는 대부분 10 mm 이내로 작은 것으로 확인된다. 다만 일부 지점에서는 여러 GCP의 변위가 약  $\pm 20$  mm까지 증감하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 이 지점들을 터널 노선과 인접하면서 변위량이 있는 유사 위치별로 묶어 그룹 1: 2번, 그룹 2: 59, 60 및 61번, 그룹 3: 15, 67 및 68번의 3개 그룹으로 분류하였다. 이 지점들을 터널 공사 시 주요 관심 지역으로 판단하여, 추가적인 계측 등의 제안 가능할 것으로 판단되며, 발생한 변위가 터널 굴착에 의한 영향인지 또는 굴착과 상관없이 발생한 변위인지에 대한 여부는 현장 자료와 비교 분석이 추가로 필요해 보인다.

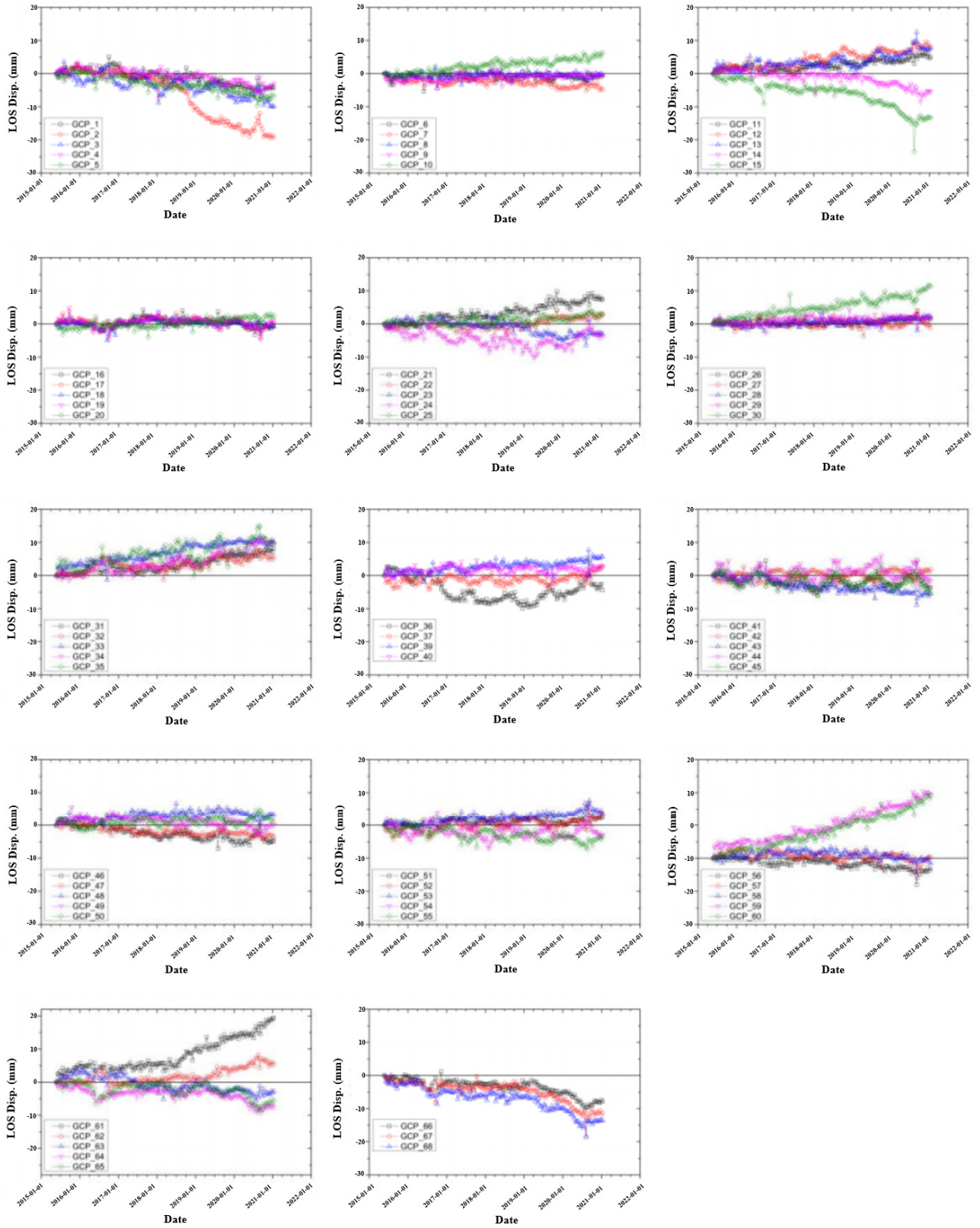


Fig. 5. The LOS displacement transitions at the GCPs Nos. 1 to 68 (descending (2015~2021)).

터널 노선을 따라 변위를 분석하기 위해 관심 지점(the Points Of Interest, POI)은 터널 굴착 영향 범위를 충분히 포함하며, 지표 변위의 양상이 보이는 위치에 대해 불균일한 간격으로 터널 정렬 중심에 폭 500 m의 범위로 선정하였다(Fig. 6). 터널 정렬을 따라 발생하는 LOS 변위의 상세한 공간 분포와 POI 변위의 시간 전이를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 각각 2016년과 2018년에 급격한 변화를 나타내는 P6와 P16을 제외하고 대다수 POI에서는 최대  $\pm 50$  mm까지 선형 변위 추세가 확인되었다(Fig. 7). P6의 경우는 식생이 분포하는 지역이며(Fig. 8a), P16의 경우는 인공구조물 건설과 관련 있는 지역으로 확인되었다(Fig. 8b and 8c).

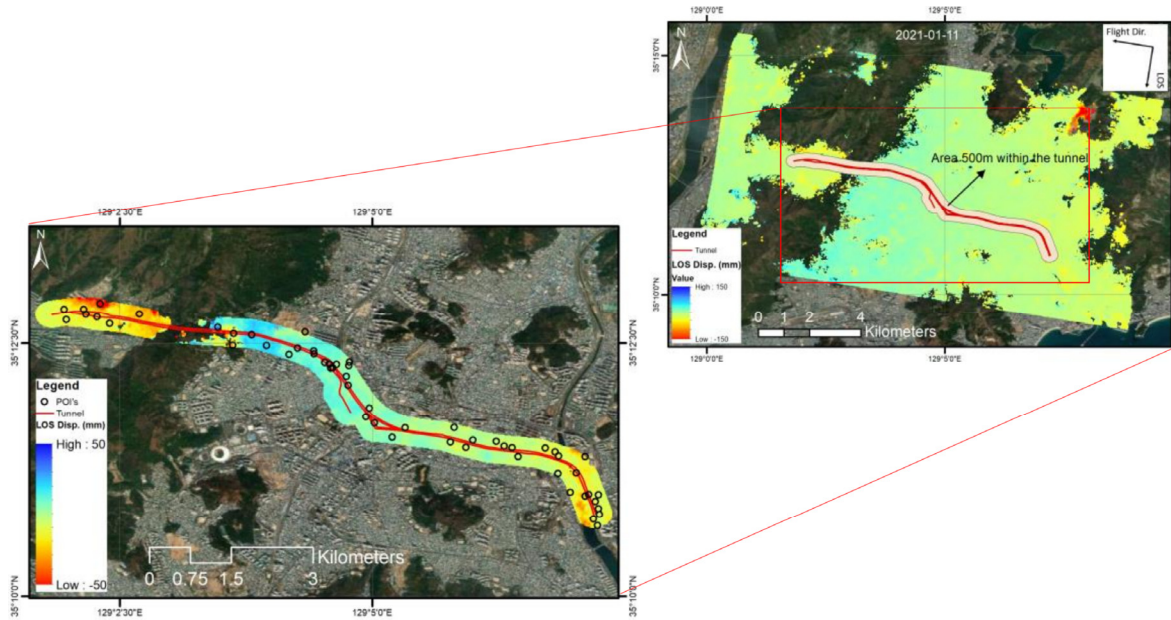


Fig. 6. Descending (2015~2021). Spatial distribution of LOS displacement occurring within a 500 meters radius of tunnel construction projects (red line) (modified from Kim et al., 2022a).

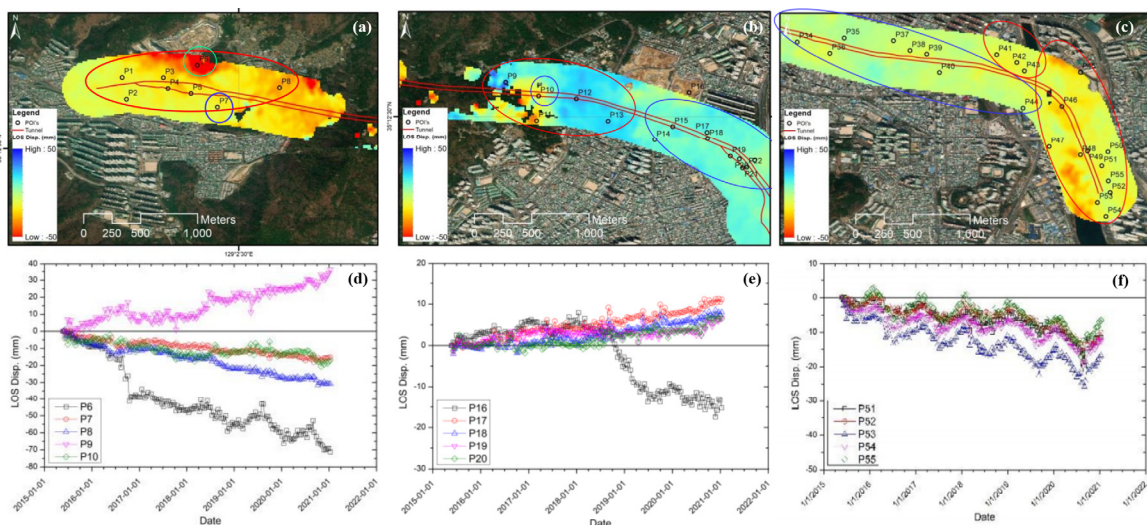
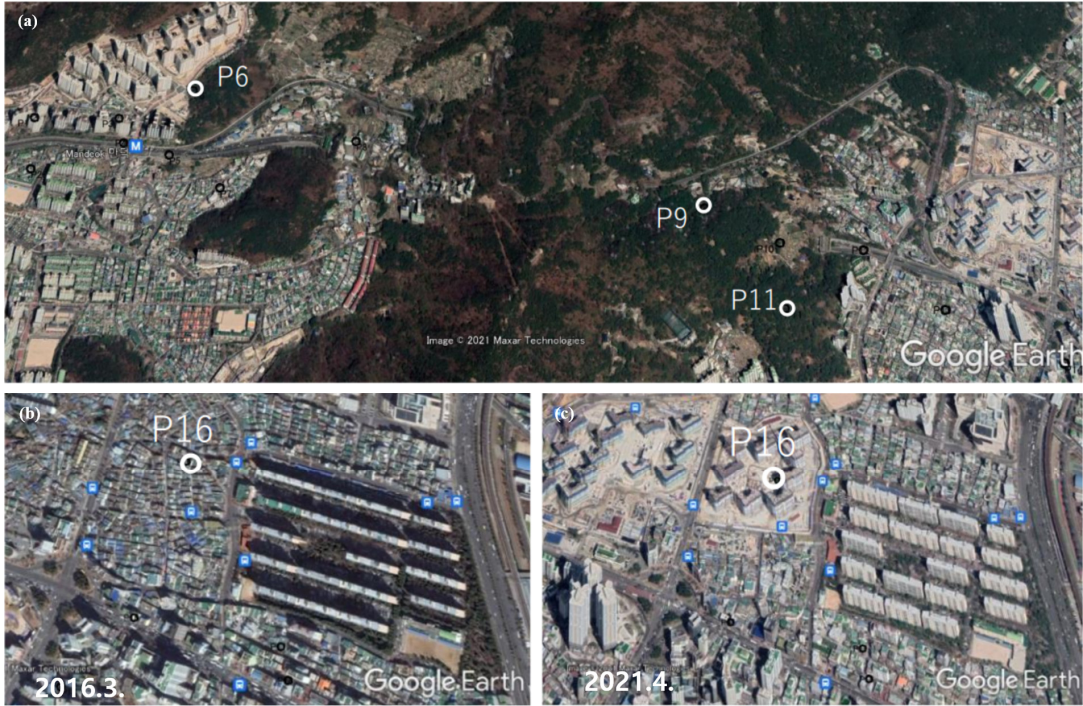


Fig. 7. Spatio-temporal distribution of LOS displacement at the areas within 500 meters of tunnel alignment. In particular, there are sharp changes observed at “P6” and “P16” in the data. (a) to (c) represent enlarged portions of Fig. 6, with (b) corresponding to Group 2 and Groups. (d) to (f) illustrate displacements at key POI identified in (a) to (c).

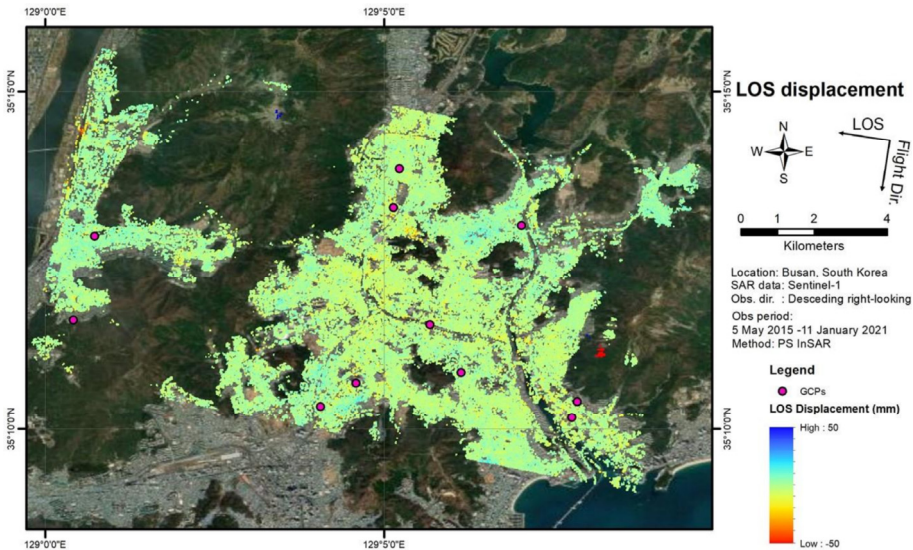




**Fig. 8.** Ground surface condition as a factor of scattered results. (a) To identify locations where displacement is observed in vegetated areas at P6, P9 and P11, (b)&(c) To pinpoint locations where displacement is observed due to the construction of infrastructure (such as apartments) in the same area at P16.

### PSInSAR 분석 결과

본 연구에서는 동일 위치에 대한 결과값 비교를 위해 PSInSAR 기법으로도 분석해 보았다. Fig. 9는 시간 경과에 따른 LOS 변위 거동을 알기 위해 SBAS DInSAR와 동일한 방식으로 분석을 진행한 PSInSAR 결과를 보여준다. PSInSAR에서 결과가 없는 부분은 PS점이 제한되기 때문에 SBAS DInSAR에 비해 결과값이 증가할 수도 있다. PS는 일관도 값이 높



**Fig. 9.** The spatial distribution of LOS displacement generated from PSInSAR analysis.

은 일관된 산란 객체에만 의존할 수 있기 때문으로 확인된다. 또한, PS는 일관성 값이 높은 영구 산란 객체에서만 선택할 수 있기 때문에 합리적인 값이라 할 수 있다. 식생 영역과 수역은 PS 처리에 따라 제거되며, 일관도 값은 임계값보다 낮기 때문에 일부는 결과값이 도출되지 않는 것이다. 변위의 크기는 SBAS 결과와 일부 차이가 있지만, 대부분 POI는 SBAS 결과와 유사한 변위 추세가 감지되고 있으므로 실제 계측자료 등과 연계하여 현장 변위 발생 자료와의 비교·분석이 필요한 것으로 판단된다.

특히, 도로의 시점 부에 인접한 미남교차로 부분(P17~P24)은 지속적인 침하의 변위가  $\pm 20$  mm까지 발생함을 확인하였으며(Fig. 10a), 수영강 동서 양측에서도(P46~P55) 일부 융기를 포함하여, 침하의 변위가  $\pm 20$  mm까지 발생함을 확인할 수 있었다(Fig. 10b).

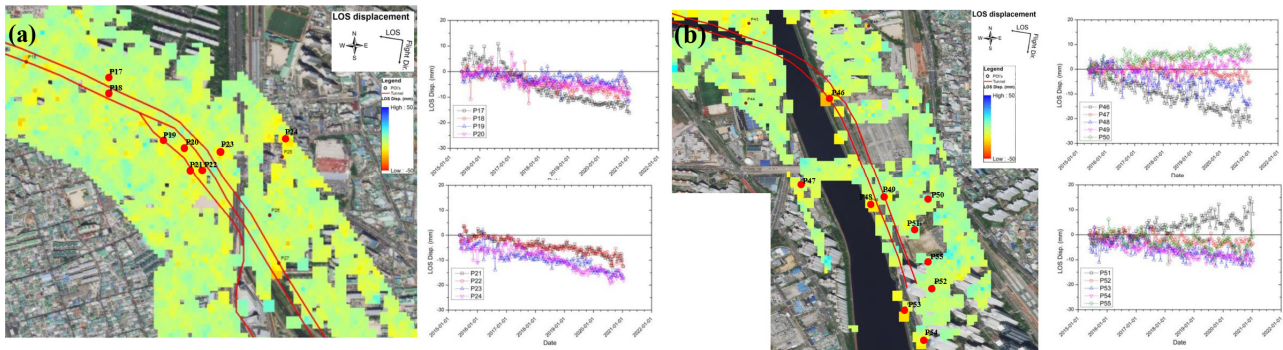


Fig. 10. The spatio-temporal of LOS displacement at the points of interest (POIs).

### 결론

본 연구 지역은 대부분 층층층이 분포하는 지역으로 북북동-남남서 방향으로 발달하고 있는 단층들의 경우 최근 횡단 층에 대한 연구가 활발히 하고 있지만, 본 연구의 SAR 자료를 활용한 분석에서는 단층의 영향에 의한 지표변위를 추정하기는 힘들었다. 이는 인공구조물이 대부분인 도심부에서 단층운동 변위 조사에 활용하기에는 한계가 있다고 할 수 있다. 하지만, Sentinel-1 SAR 자료는 동일 지역에 대해 보통 몇 주 간격으로 제공되는 자료로 DInSAR의 특정 위치에 대한 시간적 변위 분석에 유용하다는 것을 확인 할 수 있었다. 터널 노선에서의 지표상 지반 변위는 주로  $\pm 10$  mm 이내에서 안정적이지만 일부는 2014년 또는 2015년 이후 지금까지  $\pm 20\sim 30$  mm까지 증가한 부분이 있음을 알 수 있었다. 현재 터널 시공과 관련하여 지반조사 중 계측으로 전체 계획 및 시공 노선을 포함한 광역적 범위의 영역을 관측한다는 것은 한계가 있다. 하지만, 지하도로, 광역철도 등 도시 지역 지하공간을 활용하는 지하교통인프라 구축 사례가 증가할 것으로 예상되는 시점 이므로 거시적 측면에서의 사전, 설계 시, 시공 중 및 운영 중 침하 검토와 모니터링은 매우 중요하고 고려 사항이다. 이에 본 연구에서는 입체 지하 교통 인프라 안전 건설을 위한 조사 및 계측 고도화 기술개발의 일환으로 광역 이미지 자료인 SAR 자료를 활용한 지반조사 기법을 개발하기 위해 인공위성 이미지 자료 분석을 이용하여 광역의 지표 변위를 분석하였다.

인공위성 SAR로 관측한 지표 변위는 최소 수 mm 이상의 오차를 가질 수 있다. 따라서 수 mm 수준의 누적 변위가 관측된 지역은 실제 변위가 발생했을 가능성도 있으나 SAR 관측의 오차에 기인할 가능성이 높다. 반면 시계열 변위 관측 결과에서 수 cm 이상의 누적 변위가 관측되거나 지표 변위의 시간적 변동이 심한 지역에 대해서는 변위계 설치 등 추가적인 정밀 조사를 수행하여 안정을 확보하여야 한다. 또한 변위 속도가 수 mm/yr 이상을 보이는 지역도 현장 모니터링 지역에 포함해야 할 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원(과제명: 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: RS-2020-KA157786)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Attewell, P., Yeates, J., Selby, A., 1986, Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, Blackie, 325p.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Ferretti, A., 2014, *Satellite InSAR data: Reservoir monitoring from space*, EAGE Publication, 160p.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Hanssen, R.F., 2001, *Radar interferometry: Data interpretation and error analysis (Vol. 2)*, Springer, 308p.
- Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Shah, S.U., Khan, J., Ying, Z., 2022, Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique, *Scientific Reports*, 12(1), 5294.
- Kim, T., Han, H., 2022, Analysis of surface displacement of oil sands region in Alberta, Canada using Sentinel-1 SAR time series images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(2), 139-151 (in Korean with English abstract).
- Kim, T., Han, H., Lee, S., Kim, W., 2023a, Time-series interferometric synthetic aperture radar based on permanent scatterers used to analyze ground stability near a deep underground expressway under construction in Busan, South Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 33(4), 689-699 (in Korean with English abstract).
- Kim, T., Shin, H., Jung, J., Han, H., Kang, K.-m., Hwang, E., 2023b, Construction of time-series displacement data of Yongdam Dam based on PSInSAR analysis of satellite C-band SAR images, *Geo Data*, 5(3), 147-154 (in Korean with English abstract).
- Kim, W., Yastika, P., Shimizu, N., 2022a, Investigation of applicability of DInSAR for monitoring ground surface displacements due to tunnel excavations - A case study in Korea, *Proceedings of the 48th Symposium on Rock Mechanics*, Japanese Society of Civil Engineers, On-line, 446-451.
- Kim, W., Yoo, W., Hwang, S., Shimizu, N., 2022b, The ground investigation technique for safety construction of underground transportation infrastructure in the city, *Proceedings of the KSCE 2022 Convention*, Korean Society of Civil Engineers, Busan, 5-6 (in Korean).
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A., 2007, An overview of the Small Baseline Subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis, *Pure and Applied Geophysics*, 164, 637-661.
- Seoul Metropolitan City, 2020, *Study on the impact analysis of urban deep tunnel construction*, 195p (in Korean).
- Yastika, P.E., Ibara, T., Shimizu, N., Iwata, N., Takahashi, H., Araki, Y., 2018, Application of DInSAR for monitoring the ground deformation due to volcanic activity: A case study of Sakurajima, *Proceedings of the ISRM Regional Symposium: 10th Asian Rock Mechanics Symposium*, Singapore, G2.