The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 689-699
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.689

RESEARCH ARTICLE

고정산란체 기반 시계열 영상레이더 간섭기법을 활용한 부산 대심도 지하 고속화도로 건설 구간의 지반 안정성 분석

김태욱[1] · 한향선[2] · 이시웅[3] · 김우석[4*]

[1]강원대학교 지구물리학과 박사과정, [2]강원대학교 지구물리학과 조교수, [3]강원대학교 지구물리학과 석사과정, [4]한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

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

Taewook Kim[1] · Hyangsun Han[2] · Siung Lee[3] · Woo-Seok Kim[4*]

[1]Doctor Program, Department of Geophysics, Kangwon National University
[2]Assistant Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University
[3]Master's Degree Program, Department of Geophysics, Kangwon National University
[4]Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Abstract

Assessing ground stability is critical to the construction of underground transportation infrastructure. Surface displacement is a key indicator of ground stability, and can be measured using interferometric synthetic aperture radar (InSAR). This study measured time-series surface displacement using permanent scatterer InSAR applied to Sentinel-1 SAR images acquired from January 2017 to June 2023 for the area around a deep underground expressway under construction to connect Mandeok-dong and Centum City in Busan, South Korea. Regions of seasonal subsidence and uplift were identified, as were regions with severe subsidence after summer 2022. To evaluate stability of the ground in the construction area, the mean displacement velocity, final surface displacement, cumulative surface displacement, and difference between minimum and maximum surface displacement were analyzed. Considering the time-series surface displacement characteristics of the study area, the difference between minimum and maximum surface displacement since June 2022 was found to be the most suitable parameter for evaluating ground stability. The results identified highly unstable ground in the construction area as being to the north of the mid-lower reaches of the Oncheon-cheon River and to the west of the Suyeong River at the point where both rivers meet, with the difference between minimum and maximum surface displacement of 40~60 mm.

Keywords: surface displacement, underground expressway, ground stability, PSInSAR, Sentinel-1

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Woo-Seok Kim
E-mail: kws@kict.re.kr

Received: 6 December, 2023
Revised: 24 December, 2023
Accepted: 26 December, 2023

Ⓒ 2023 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.

초 록

지하 교통 인프라 건설에 있어서 지반 안정성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 지표변위는 지반 안정성을 평가하는데 사용되는 주요 인자 중 하나로 인공위성 영상레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)에 레이더 간섭기법(Interferometric SAR, InSAR)을 통해 관측될 수 있다. 이 연구에서는 부산광역시의 만덕동과 센텀시티를 잇는 대심도 지하 고속화도로 건설 구간에 대해 2017년 1월부터 2023년 6월까지 획득된 Sentinel-1 SAR 영상에 고정산란체 기반 시계열 영상레이더 간섭기법(Permanent Scatterer InSAR, PSInSAR)을 적용하여 시계열 지표변위를 산출하였다. 계절에 따라 지반의 침하와 융기가 반복되는 지역과 2022년 여름철 이후 심각한 지반침하가 발생하는 지역이 확인되었다. 지하 고속화도로 건설 구간에 대한 지반 안정성을 평가하기 위해 평균변위속도, 최종 지표 변위량, 누적 지표 변위량, 최소-최대 변위량의 차이를 분석하였다. 연구지역의 시계열 지표변위 특성을 고려하여 2022년 6월 이후의 최소-최대 변위량의 차이가 지반 안정성 평가에 가장 적합한 것을 확인하였으며, 지하 고속화도로 건설 구간 중 온천천 중하류의 북쪽 지반과 수영강이 온천천과 합류하는 지점에서 수영강 서편 지반이 40~60 mm의 최소-최대 변위량을 보여 불안정성이 큰 것을 파악하였다.

주요어: 지표변위, 지하 고속화도로, 지반 안정성, 고정산란체 기반 간섭기법, Sentinel-1

서 론

터널과 같은 지하 교통 인프라의 건설에 있어 지반의 안정성을 사전에 파악하고, 지반침하 등이 발생할 수 있는 위험 지역을 선정하는 것은 건설사업의 설계 단계뿐만 아니라 인프라의 사후 관리 및 유지 보수를 위해서 매우 중요하다. 지반 거동을 지시하는 지표변위는 지반의 안정성을 평가하는데 사용되는 대표적인 인자 중 하나이다(Barla et al., 2016; Lee et al., 2021). 따라서 지하 교통 인프라 건설지에 대해 정밀한 지표변위 관측을 수행한다면 지반 안정성에 대한 평가와 위험 지역 선정이 가능하다.

지표변위는 건설 현장에서 변위계, 경사계, 침하계 등의 변위 계측장비와 범지구 위치 결정 시스템(Global Positioning System, GPS)과 같은 측위 장비를 통해 관측될 수 있다(Bürgmann et al., 2006; Lingyun et al., 2014). 이와 같은 장비들은 현장에서 정밀한 변위를 실시간으로 관측하여 제공할 수 있는 장점이 있다. 그러나 계측장비 설치 위치에 대한 정보만을 제공하므로 건설지가 광범위할 경우 활용도가 제한적인 단점이 있다. 기상 조건이나 주간 및 야간에 관계 없이 고품질의 지표영상을 제공하는 영상레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)는 레이더 간섭기법(Interferometric SAR, InSAR)의 적용을 통해 넓은 지역의 변위 관측이 가능하며, 현장 계측장비가 가지고 있는 한계점을 극복할 수 있는 장점이 있다. 두 개의 SAR 영상을 활용한 단일 InSAR는 간섭쌍(InSAR pair)의 공간 기선거리(spatial baseline) 및 시간 기선거리(temporal baseline)에 따라 긴밀도(coherence)가 달라질 수 있다. 시공간적 기선거리가 길거나 간섭쌍의 획득 기간 동안 지표의 변화가 크게 발생한 경우 역상관으로(decorrelation) 인해 InSAR의 품질이 낮아져 변위 관측이 어려운 경우가 많다(Zebker and Villasenor, 1992). 또한 InSAR의 변위 관측 정확도는 대기에 의한 위상지연 효과, 고도에 기인한 간섭위상 제거에 사용되는 지형고도 자료의 부정확성, 위성 궤도 정보의 부정확성 등 다양한 원인으로 인하여 크게 낮아질 수 있는데(Hanssen, 2001) 단일 InSAR로는 이로 인한 변위 관측 오차를 보정하기 어렵다. 그리고 시간에 따라 비선형의 변위를 보이는 지역에서는 단일 InSAR를 통해 변위의 변화를 파악하기가 불가능하다.

InSAR를 통한 변위 관측의 정밀도를 향상시키고 변위의 시간적 변화를 관측하는데 다수의 SAR 영상을 활용하는 시계열 레이더 간섭기법이 효과적이다(Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002). 시계열 레이더 간섭기법은 변위 산출에 영향을 미치는 오차 요인의 평가 및 제거가 가능하며(Ferretti et al., 2001), 지반침하와 같이 장기적인 지반 변위 모니터링이 필요한 분야에 널리 이용되고 있다(Awasthi et al., 2022; Hussain et al., 2022; Kim and Han, 2022; Yazici and Tunc Gormus, 2022; Kim et al., 2023). 고정산란체 기반 레이더 간섭기법(Permarnent Scatterer InSAR, PSInSAR)은 지표에

서 강하고 일정한 후방산란을 보이는 산란체의 시계열 변위를 정밀하게 관측 가능하며 이는 도심지의 지반 안정성 분석에 효과적으로 사용될 수 있다. 특히 PSInSAR 기법은 고정산란체가 많은 도심지에서 지하 터널 공사 및 도로, 철도 등의 교통 인프라 건설에 따른 지표변위를 탐지하는데 유용하게 활용되고 있다(Orellana et al., 2020; Ramirez et al., 2022; Yang et al., 2022; Hussain et al., 2023).

부산광역시의 북구 만덕동과 해운대구 재송동 센텀시티를 잇는 대심도 지하 고속화도로는 2024년 10월 완공을 목표로 2019년 9월 착공하였다(Busan Metropolitan City, 2019). 해당 지하 고속화도로 건설 구간의 대부분이 충적층에 해당하여 지반 안정성 분석이 필요하다. 2023년 2월 24일 공사 현장에서 터널 천장이 붕괴되어 토사가 유출되는 등 지반의 안정성 약화에 기인할 수 있는 사고도 발생함에 따라 도로 건설 구간에 대한 지표변위 모니터링이 요구된다고 할 수 있다. 이 연구에서는 부산광역시 만덕-센텀 지하 고속화도로 건설 구간에 대해 인공위성 SAR 영상에 고정산란체 기반 시계열 레이더 간섭기법을 적용하여 시계열 지표변위를 산출하였다. 시계열 변위의 분석을 통해 지반 안정성 평가에 사용될 수 있는 변위량을 도출하고, 연구지역에 가장 적합한 변위량을 선정하였다. 최종적으로 선정된 변위량의 분석을 통해 만덕-센텀 지하 고속화도로 건설 구간에 대한 지반 안정성 평가를 수행하였다.

연구지역

이 연구에서는 부산광역시 북구 만덕동을 기점으로 해운대구 재송동 센텀시티까지 이어지는 구간의 지하 고속화도로 건설지를 대상으로 인공위성 SAR 영상 기반 지표변위 분석을 수행하였다(Fig. 1). 지표변위 분석 영역은 지하 고속화도로

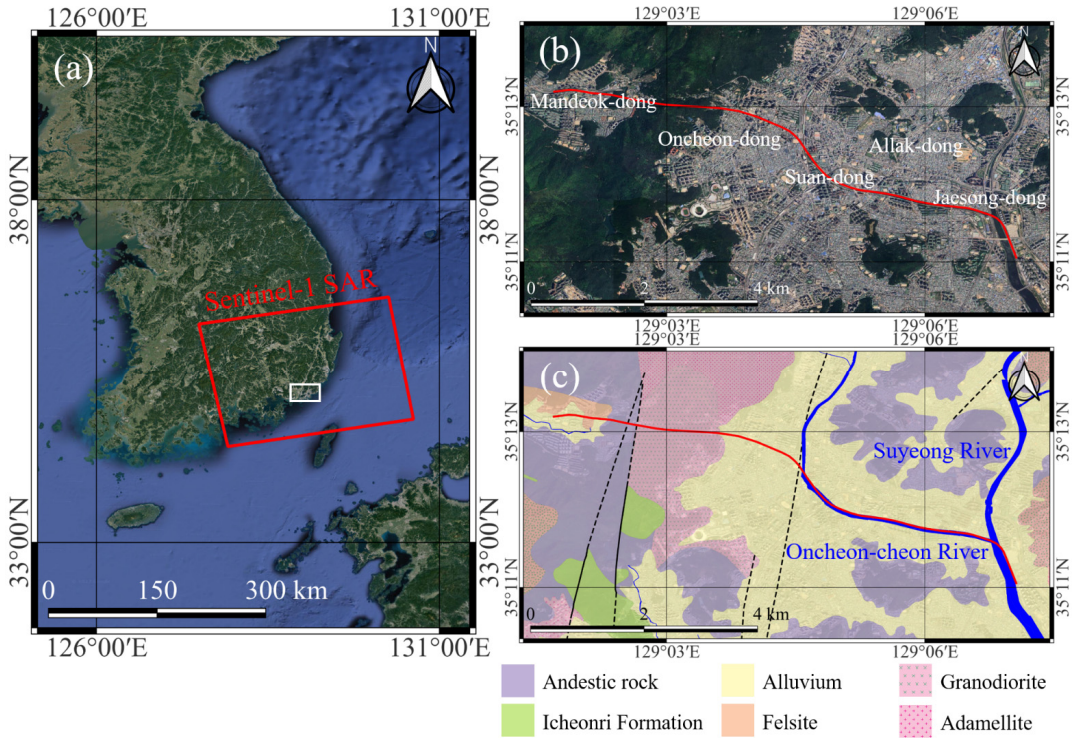

Fig. 1. (a) Location of study area (©Google earth). The red polygon represents the coverage of Sentinel-1 SAR imaging. (b) Enlargement of the area in the white box in (a). The red line indicates the route of the deep underground expressway in Busan, South Korea. (c) Geological map of the study area. Solid and dotted black lines represent faults and probable faults, respectively. The red line indicates the route of the deep underground expressway. Rivers are shown as blue.

노선을 중심으로 반경 250 m 영역으로 설정하였다. 만덕-센텀 지하 고속화도로는 지역균형발전과 교통혼잡 완화를 위해 2019년 9월에 착공된 대심도 지하도로이다. 노선의 총 길이는 약 9.6 km이며, 부산 도시철도 3호선 및 4호선, 동해선 광역전철과 인접해 있고, 노선 인근으로 수영강과 그 지류인 온천천이 흐르고 있다(Fig. 1c).

부산광역시 대심도 지하 고속화도로 건설 구간은 북구 만덕동과 동래구 온천동 사이 금정산(만덕고개), 쇠미산 등 산악지형을 제외하면 대부분 충적층으로 구성되어 있으며, 산악지역은 규장암, 안산암질암, 화강섬록암 등 화성암류로 이루어져 있다(Fig. 1c). 연구지역 주변은 양산 단층대의 일부인 금성동 단층과 동래 단층이 북북동-남남서 방향으로 놓여있고 동북동 방향의 단층들과 서로 교차되어 있어 지표수가 쉽게 지하로 유입될 수 있는 지질구조가 형성되어 있다(Son et al., 2002, Ryu et al., 2008).

연구자료

만덕-센텀 지하 고속화도로 건설지의 시계열 변위를 관측하기 위해 유럽우주국(European Satellite Agency, ESA)에서 운용 및 제공하는 Sentinel-1 위성의 SAR 영상을 획득하였다. Sentinel-1은 StripMap(SM), Interferometric Wide(IW) swath, Extra Wide(EW) swath, Wave(WV)의 4가지 모드로 지표를 관측한다. Sentinel-1은 Sentinel-1A와 Sentinel-1B 두 위성으로 구성되어 있으며, 모두 중심 주파수 5.405 GHz의 C-band SAR를 탑재하고 있다. Sentinel-1A와 Sentinel-1B는 동일 궤도를 180°의 위상 차이로 비행하면서 12일 주기로 영상을 획득하므로, 두 위성을 모두 이용할 경우 동일한 지역에 대해 6일 간격으로 영상을 취득할 수 있다. 그러나 Sentinel-1B는 전원 공급 장치의 결함으로 인해 2021년 12월 23일 이후로 신규 영상 획득이 불가능하다.

이 연구에서는 2017년 1월 14일부터 2023년 6월 24일까지 총 172장의 Sentinel-1A SAR 영상을 사용하였다(Fig. 1a). SAR 영상은 2018년 1월부터 2018년 6월까지 Sentinel-1A 위성이 연구지역을 관측하지 않은 시기를 제외하면 모두 12일 간격으로 구축되었다. 모든 SAR 영상은 위성의 상향 궤도(ascending orbit)에서 IW 모드의 VV 편파로 획득된 Single Look Complex 포맷으로 구축되었다(Table 1). InSAR 수행을 위해 필요한 SAR 영상의 정밀 정합과 지형고도에 의한 간섭위상의 제거를 위해 30 m 공간해상도의 Copernicus GLO-30 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 활용하였다. 이 연구에서는 또한 암반의 특성에 따른 시계열 지표변위의 해석을 위해 한국지질자원연구원에서 배포하는 1:5만 축척의 수치지질도(https://data.kigam.re.kr/data/)를 이용하였다.

Table 1. Sentinel-1 SAR data used in this study

	Date range (dd/mm/yyyy-dd/mm/yyyy)	Acquisition mode	Orbit direction	Polarization	Acquisition format	Number of SAR images
Sentinel-1A SAR	14/01/2017-24/06/2023	Interferometric wide swath	Ascending	VV	Single look complex	172

연구방법

연구지역의 대부분은 강한 후방산란을 갖는 인공구조물이 다수 분포하는 도심지에 해당하기 때문에 PSInSAR 기법 적용을 위한 산란체가 다수 산출될 것으로 기대할 수 있다. PSInSAR 기법을 수행하기에 앞서 우선 모든 SAR 영상에 정밀 궤도 데이터(precise orbit data)를 이용하여 위성의 궤도 보정을 수행하였다. PSInSAR 기법은 하나의 주영상(reference

image)을 선정하고, 나머지 모든 영상들을 부영상(secondary image)으로 정의한 후 주영상에 부영상을 정합한다. 그리고 주영상과 부영상을 통해 시계열 레이더 간섭쌍을 형성하여 InSAR를 수행한다. 이때 InSAR의 역상관을 최소화하고 높은 품질의 변위 탐지 결과를 산출하기 위해 레이더 간섭쌍들의 수직 기선거리(perpendicular baseline)가 짧고 그 분산 정도가 작으며, 시계열 InSAR 긴밀도가 높게 계산될 수 있는 조건의 주영상 선정이 중요하다(Kampes and Hanssen, 2004). 이 연구에서는 2021년 1월 17일 SAR 영상을 주영상으로 선정하였고(Fig. 2), 수직 기선거리와 시간 기선거리가 각각 264 m, 1,464일 이하인 레이더 간섭쌍을 171쌍 생성하여 PSInSAR를 수행하였다.

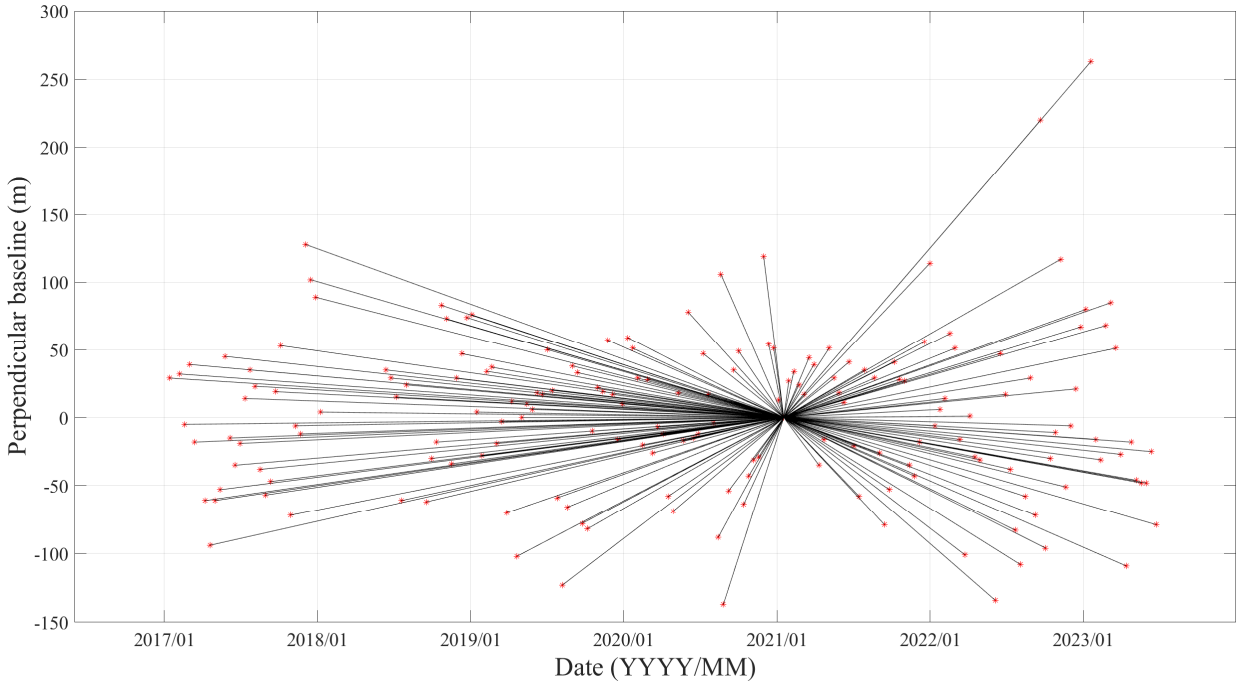

Fig. 2. Baseline plot of interferograms used in PSInSAR.

이 연구에서는 GAMMA Software의 Interferometric Point Target Analysis Software(IPTA) 패키지를 이용하여 PSInSAR를 수행하였다. PSInSAR를 통해 변위를 탐지하기 위해서는 먼저 다수의 시계열 SAR 영상들로부터 고정산란체 후보(persistence scatterer candidate, PSC)를 선정해야 한다. 시계열로 stacking된 SAR 영상들로부터 각각의 픽셀에 대해 시계열 후방산란의 표준편차 대비 평균의 비율(Ratio of the Mean to the Standard deviation, MSR)과 위상(phase)의 spectral correlation을 계산하고 MSR이 2.5 이상, spectral correlation이 0.4 이상인 픽셀을 PSC로 선정하였다. PSC의 시계열 변위를 산출하기 위해 주영상과 나머지 부영상들의 간섭도를 생성하고 절대위상복원을 수행하였다. 제작된 시계열 간섭도에서 나타나는 위상은 변위 외에 대기에 의한 위상 지연, DEM 오차 및 궤도 오차에 의한 위상, 잡음(noise)에 의한 위상을 포함한다. 정밀한 시계열 변위를 산출하기 위해 인접한 PSC 사이의 시공간적 위상 네트워크로부터 선형변위속도와 DEM 오차를 구하여 제거한 후 잔여 위상을 구하였다. 잔여 위상은 대기에 의한 위상 지연 효과와 잡음에 의한 위상을 포함한다. 잔여 위상에 대해 공간적으로 저주파 필터링, 시간적으로 고주파 필터링을 적용하여 대기에 의한 위상을 추출하였다. 이를 통해 시계열 간섭도로부터 대기 및 DEM 오차에 의한 위상 성분을 제거하였다. 시계열 간섭도의 위상은 변위, 궤도 오차, 잡음 성분을 가지는데 정밀 궤도 데이터의 사용으로 궤도 오차 성분은 작을 것으로 기대되었으며, 잡음 성분 또한 변위에 비해 크지 않을 것으로 판단하였다. 초기 PSC로부터 신뢰할 수 있는 PS를 산출하기 위해 temporal coherence가

0.7 이하인 PSC는 모두 제거하였다. 최종적으로 선정된 PS의 위상을 활용하여 레이더 관측 방향(Line Of Sight, LOS)의 시계열 변위를 산출하였다.

연구지역인 부산 대심도 지하 고속화도로 건설 구간의 지표에서는 수평방향의 변위에 비해 수직방향의 변위가 매우 클 것으로 판단하였고, Sentinel-1의 레이더 입사각(θ)을 이용하여 레이더 관측 방향의 변위(d_{LOS})를 수직방향의 변위($d_{vertical}$)로 변환하여 해석하였다(식 (1)).

$$d_{vertical} = \frac{d_{LOS}}{\cos\theta} \tag{1}$$

Lee et al.(2021)은 교통 인프라 건설로 인한 지반 안정성 평가를 위해 시계열 레이더 간섭기법의 변위 탐지 결과로부터 도출할 수 있는 3가지의 변위량 지표-최종 지표 변위량, 누적 지표 변위량, 최소-최대 변위량 차이를 제안하였다. 최종 지표 변위량은 변위 관측 기간의 마지막 날짜에 해당하는 변위를 의미하며, 누적 지표 변위량은 관측 기간 동안 관측된 변위의 절댓값을 누적한 것이다. 최소-최대 변위량 차이는 관측 기간 동안 측정된 최소 지표 변위와 최대 지표 변위의 차이를 나타낸다(Lee et al., 2021). 이 연구에서는 평균지표변위속도와 Lee et al.(2021)이 제시한 3개의 지표 변위량을 산출하고, 이를 통해 만덕-센텀 대심도 지하 고속화도로 건설지 지반의 안정성을 평가하였다.

연구결과 및 토의

Fig. 3은 2017년 1월부터 2023년 6월까지 만덕-센텀 지하 고속화도로 노선 경로를 중심으로 반경 250 m 이내(흰색 폴리곤 영역)에서 산출된 평균 수직변위속도로, 총 4,591개의 PS에서 도출된 변위를 보여준다. 양의 변위속도는 융기를 의미하고 음의 변위속도는 침하를 의미한다. 만덕동과 온천동 사이에 식생으로 피복된 산지에서는 고정산란체로 정의할 수 있는 강하고 안정적인 후방산란을 보이는 산란체가 거의 없어 변위가 관측되지 않았다. Fig. 3의 P1~P8은 노선 경로 주변

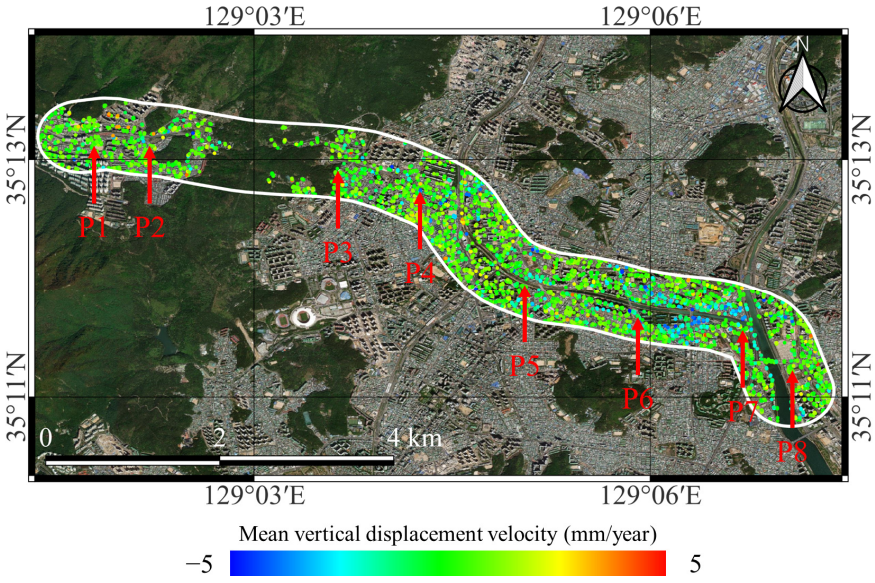

Fig. 3. Mean vertical displacement velocity from January 2017 to June 2023. The white outline indicates a 250 m radius from the expressway.

에서 PS들의 변위를 대표할 수 있는 PS를 표기한 것으로, 모두 지하 고속화도로 건설 노선에서 수평 거리로 100 m 이내에 위치한다. 수직변위속도는 대부분의 지역에서 매우 작으나, 수영강에 인접한 온천천 주변(P6과 P7 사이)에서 -5 mm/year 내외로 산출되어 이 구간에서 지반침하가 뚜렷하다는 정보가 제시된다.

Fig. 4는 각각의 PS로부터 산출된 수직변위의 시계열을 보여준다. 지하 고속화도로 건설 구간의 서쪽(부산광역시 북구 만덕동)에 위치한 P1, P2 및 그 주변 영역에서는 대부분 1 mm/year 이하의 매우 작은 변위속도가 관측되었고, 변위의 시간적 변화 또한 매우 작은 것으로 분석되었다(Figs. 4a and 4b). 이는 P1, P2가 위치한 부산광역시 북구 만덕동 일대가 안산암 및 규장암질의 암반 지반으로 지반침하량이 상대적으로 작기 때문으로 판단된다(Fig. 1c). 산악지역 동편에 접해 있는 부산광역시 동래구 온천동의 P3와 P4에서는 각각 -1.01 mm/year와 -0.06 mm/year의 수직변위속도가 관측되었다. P3와 P4의 시계열 지표변위는 1 cm 내외의 수준으로 여름철에 침하하고 겨울철에 융기하는 계절성을 보였는데, 이는 해당 지역이 충적층에 해당하며(Fig. 1c) 여름철 강우에 의해 지반의 침하가 발생할 가능성이 높기 때문으로 판단되었다. 주목할만한 점은 P3 지점에서 2023년 1월까지 변위가 거의 발생하지 않았으나 2023년 2월부터 급격한 침하가 발생하였고 이후 6개월간 지표가 33 mm 침하한 것이 관측되었다.

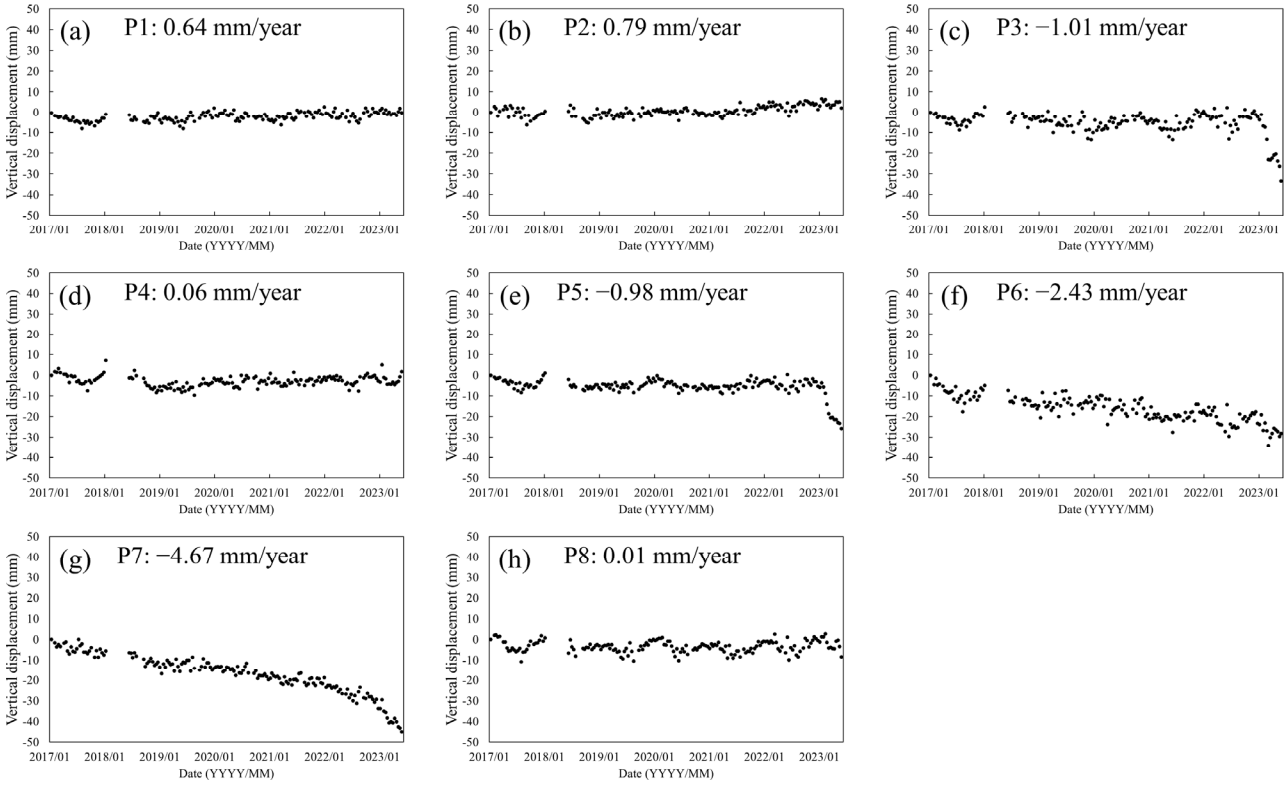

Fig. 4. Time-series of displacement for locations (a) P1, (b) P2, (c) P3, (d) P4, (e) P5, (f) P6, (g) P7, and (h) P8 labeled in Fig. 3.

P5부터 P7까지 모두 충적층 지대에 위치하며 수직변위속도는 -1~-5 mm/year로 모두 지반침하를 지시하는 변위속도가 도출되었으나 수직변위의 시계열은 서로 상이하였다(Figs. 4e~4g). P5는 온천천의 상류(부산광역시 동래구 수안동) 지역의 하천 주변 지반에서 선정된 산란체로 P3 지점과 유사한 수직변위속도(-0.98 mm/year) 및 수직변위 시계열 변화를 보인다(Fig. 4e). P5 지점에서 지반침하는 2022년 11월까지 거의 발생하지 않다가 2022년 12월부터 7개월간 약 30 mm의

급격하게 나타났다(Figs. 4c and 4e). 이는 2022년 여름철의 폭우로 지표수의 상당량이 지하로 유입되고 이로 인해 지반이 약화된 결과일 수 있다(Liu et al., 2019; Fang et al., 2022). 또한 P3에서와 같이 터널 공사에 따른 지반의 불안정성이 반영된 결과일 가능성도 있다. P6과 P7은 온천천의 중하류 및 온천천과 수영강이 합류하는 지역의 하천 인근 지반에서 선정된 산란체로 관측 기간 동안 지속적으로 침하가 발생하였다(Figs. 4f and 4g). 이 지역은 온천천의 하류이면서 수영강과 합류하는 곳으로 하천에 의한 지반의 불안정성이 다른 지역에 비해 상대적으로 클 수 있다. 두 지점에서 각각 30 mm 및 45 mm의 침하 변위가 관측되었는데 2022년 여름철 이후 침하의 속도가 빨라졌음이 확인된다(Figs. 4f and 4g). 부산광역시 해운대구 재송동(센텀시티)에서 산출된 P8은 약 1 cm 내외의 침하 및 융기가 계절에 따라 반복되는 양상이 나타났으며, 최종적으로는 0.01 mm/year의 매우 작은 수직변위속도를 나타냈다(Fig. 4h).

부산 만덕-센텀 지하 고속화도로 건설지의 시계열 지표변위는 지역에 따라 상이하게 관측되었으며, 특히 변위속도(침하속도)가 시간에 따라 일정하지 않음이 확인되었다. P3, P5, P6은 최종 침하량이 비슷한 수준임에도 불구하고 변위 속도 차이가 발생하였다. 또한 P7의 경우 2022년 여름 이후부터 침하가 가속화 되었다. 전체 관측 기간에 대한 평균변위속도는 변위가 시계열적으로 선형의 형태를 보일 때 유의미한 정보를 제공하므로 본 연구지역의 지표 안정성을 평가하는데 적합하지 않다고 할 수 있다.

Fig. 5는 PSInSAR로 산출된 전체 관측 기간의 시계열 변위로부터 최종 지표 변위량, 누적 지표 변위량, 최소-최대 변위량 차이를 구하여 도시한 것이다. 국토교통부에서 발간한 2023년 지하안전평가서 표준매뉴얼(MOLIT, 2023)에 정의된 도로 및 인접구조물의 허용 침하량(25 mm)을 기준으로 지반의 불안정성을 평가할 경우, 최종 지표 변위량에 근거한 불안정 지역은 온천천 인근에 집중되어 있다. 그러나 누적 지표 변위량에 근거하면 대부분의 구간에서 -50 mm 이상의 상당한 침하로 표현되는 영역이 제시된다. 반면 최소-최대 지표 변위량 차이는 노선에 인접한 영역에서 침하가 발생하며, 특히 온천천 하류의 북쪽 지반에서 불안정성이 큼을 지시한다.

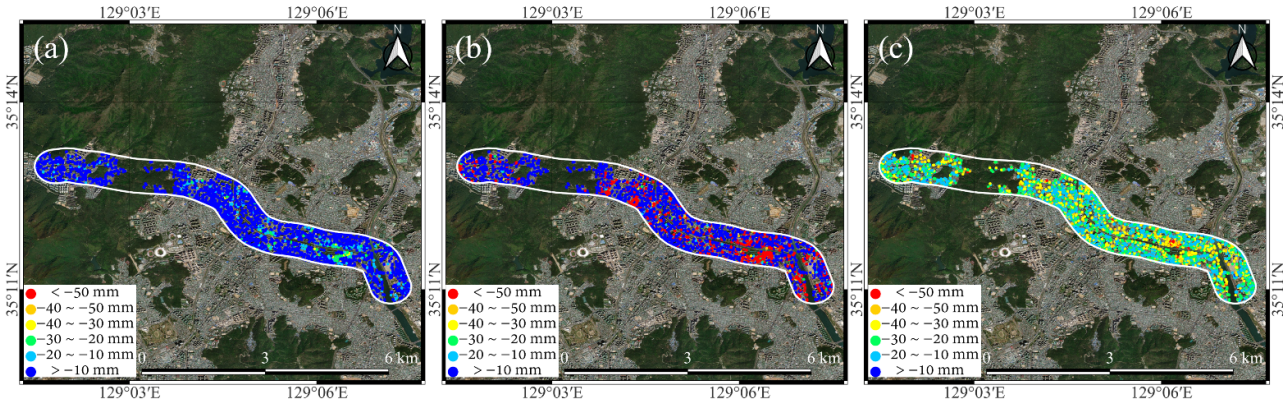

Fig. 5. (a) Final surface displacement, (b) cumulative surface displacement, and (c) difference between minimum and maximum surface displacement for the entire observation period.

Fig. 5에 제시된 3가지의 지표 변위량은 서로 다른 지반 불안정성 평가 결과를 나타낸다. 지반 불안정성평가에 적합한 변위량을 선정하기 위해서는 연구지역 지표변위의 시계열적 특성을 고려할 필요가 있다. 본 연구지역에서는 지표의 침하 및 융기가 계절에 따라 반복되는 곳이 있으며, 특정 시기를 전후로 지반침하의 속도가 다른 곳도 관측되었다. 또한 계절적인 침하와 융기의 크기가 유사하여 변위속도가 0 mm/year에 가까운 지역도 다수 분포한다. 지표의 침하와 융기가 반복된다는 것은 최종 지표 변위량으로 지표의 불안정성을 평가하기 어려우며, 침하와 융기의 크기가 비슷하다는 것은 누적

지표 변위량도 지표 불안정성 평가에 적합하지 않음을 의미한다. 이에 이 연구에서는 최소-최대 지표 변위량 차이를 지반 안정성 평가를 위한 최적의 변위량으로 선정하였고, 2022년 6월을 전후로 지반침하 속도가 달라지는 지역이 있음을 고려하여 2022년 6월 이전 5년과 이후 1년에 대한 최소-최대 지표 변위량 차이를 구하였다(Fig. 6).

2022년 6월 이전 5년간 최소-최대 수직변위 차이는 지하 고속화도로 건설 구간 대부분 영역에서 10~40 mm의 침하를 보임을 지시하며, 불안정성을 가지는 지역의 특정이 어려웠다(Fig. 6a). 2022년 6월 이후 1년간의 최소-최대 수직변위 차이는 지반 불안정 지역을 보다 뚜렷하게 지시하였는데, 연산교와 안락교 사이의 온천천 북쪽 및 수영강 서편 지반이 큰 불안정성을 가지는 지역으로 분석되었다(Fig. 6b).

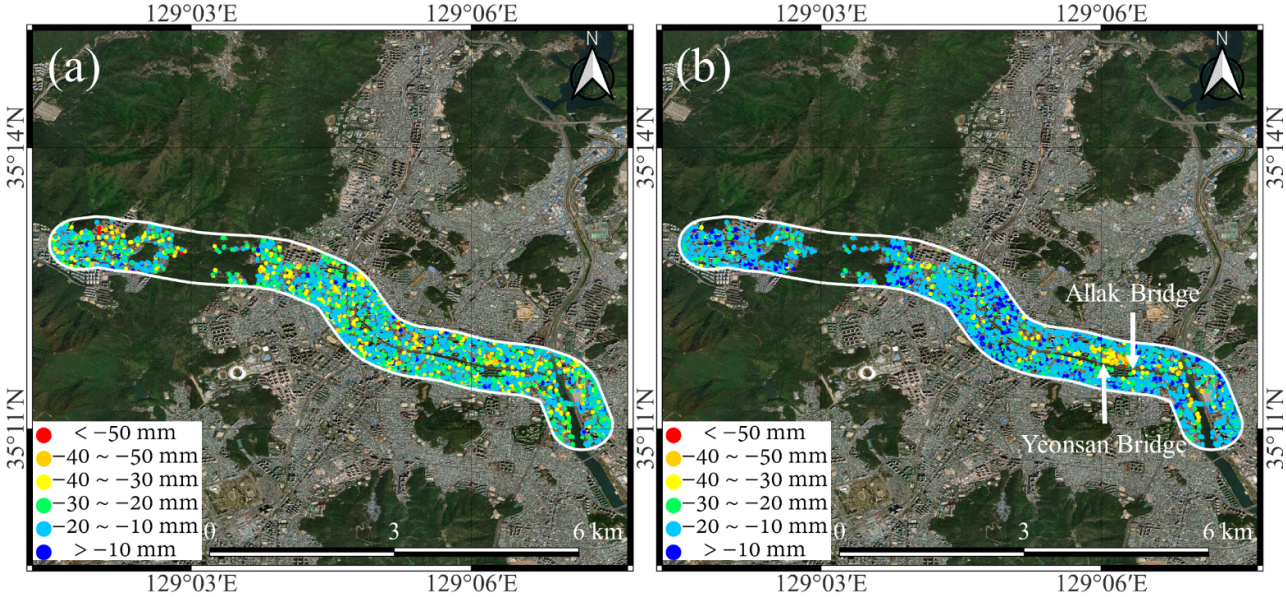

Fig. 6. Difference between minimum and maximum surface displacement for (a) 5 years before and (b) 1 year after June 24, 2022.

이 연구에서는 부산 만덕-센텀 지하 고속화도로 건설 구간의 시계열 지표변위 발생 원인을 명확하게 규명하지는 못하였다. 그러나 PSInSAR로 도출된 시계열 지표변위를 통해 지하 고속화도로 건설지의 변위특성을 해석하였고, 지표 안정성을 평가하기 위한 최적의 변위량을 탐색하여 지하 고속화도로 건설 및 사후 관리와 유지보수에 중요한 정보를 제공한 것은 매우 가치 있는 결과라 할 수 있다. 또한 이 연구를 통하여 시계열 지표변위로부터 단일 변위량만을 도출하여 지반 안정성을 분석할 경우 한계점이 존재하며, 연구지역의 시계열 변위 특성을 고려하여 최적의 변위량을 선정한 후 지반 안정성이 분석되어야 함을 확인하였다. 향후 도심지의 대심도 교통 인프라 건설에 인공위성 PSInSAR의 활용도가 매우 높을 것으로 기대하며, 관심 지역의 지질학적 특성과 지표변위의 기작을 명확히 파악할 수 있다면 지표변위 기반의 지반 안정성 평가 시스템이 체계적으로 구축될 수 있을 것이다.

결 론

이 연구에서는 부산광역시의 만덕-센텀 대심도 지하 고속화도로 건설 구간에 대해 172장의 Sentinel-1 SAR 영상에 PSInSAR 기법을 적용하여 시계열 변위를 산출하고, 지반의 안정성을 평가하였다. 도로 건설 구간 중 침하가 발생하는 지

역 및 침하와 융기가 반복되는 지역을 파악할 수 있었고, 온천천 중하류 및 온천천과 수영강의 합류 지역 주변 지반에서 2022년 여름 이후에 지반침하 가속화를 탐지할 수 있었다. PSInSAR로 산출된 시계열 변위로부터 평균변위속도, 최종 지표 침하량, 누적 지표 침하량, 최소-최대 지표 변위량 차이를 구하여 지반 안정성을 평가하였으며, 연구지역에서는 지반침하 가속화가 시작된 이후 시기에 대한 최소-최대 지표 변위량 차이가 가장 적합한 지반 안정성 평가 인자로 활용될 수 있음을 제시하였다.

사사

이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2021R1C1C1009621, No. 2019R1A6A1A03033167)과 국토교통과학기술진흥원(과제명: 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: 23UUTI-B157786-04)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Awasthi, S., Jain, K., Mishra, V., Kumar, A., 2022, An approach for multi-dimensional land subsidence velocity estimation using time-series Sentinel-1 SAR datasets by applying persistent scatterer interferometry technique, Geocarto International, 37(9), 2647-2678.

Barla, G., Tamburini, A., Del Conte, S., Giannico, C., 2016, InSAR monitoring of tunnel induced ground movements, Geomechanics and Tunnelling, 9(1), 15-22.

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.

Bürgmann, R., Hilley, G., Ferretti, A., Novali, F., 2006, Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis, Geology, 34(3), 221-224.

Busan Metropolitan City, 2019, Mandeok~Centum urban expressway first shovel, Retrieved from https://www.busan.go.kr/news/snsbusan01/view?dataNo=63373.

Fang, Q., Zhao, L., Hou, R., Fan, C., Zhang, J., 2022, Rainwater transformation to runoff and soil loss at the surface and belowground on soil-mantled karst slopes under rainfall simulation experiments, Catena, 215, 106316.

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 Science & Business Media, 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.

Hussain, S., Pan, B., Afzal, Z., Ali, M., Zhang, X., Shi, X., Ali, M., 2023, Landslide detection and inventory updating using the time-series InSAR approach along the Karakoram Highway, Northern Pakistan, Scientific Reports, 13(1), 7485.

Kampes, B.M., Hanssen, R.F., 2004, Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(11), 2446-2453.

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., Shin, H., Jung, J., Han, H., Kang, K.-m., Hwang, E., 2023, 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).

Lee, H., Yoon, H., Han, H., 2021, A study on the determination of indicators for the risk assessment of ground depression using SAR imageson, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 22(7), 13-20 (in Korean with English abstract).

Lingyun, J., Qingliang, W., Shuangxu, W., 2014, Present-day 3D deformation field of Northeast China, observed by GPS and leveling, Geodesy and Geodynamics, 5(3), 34-40.

Liu, G., Zheng, F., Jia, L., Jia, Y., Zhang, X.C.J., Hu, F., Zhang, J., 2019, Interactive effects of raindrop impact and groundwater seepage on soil erosion, Journal of Hydrology, 578, 124066.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2023, Underground safety impact assessment standard manual, 135 (in Korean).

Orellana, F., Delgado Blasco, J.M., Foumelis, M., D'Aranno, P.J., Marsella, M.A., Di Mascio, P., 2020, Dinsar for road infrastructure monitoring: Case study highway network of Rome metropolitan (Italy), Remote Sensing, 12(22), 3697.

Ramirez, R.A., Lee, G.J., Choi, S.K., Kwon, T.H., Kim, Y.C., Ryu, H.H., Kim, S., Bae, B., Hyun, C., 2022, Monitoring of construction-induced urban ground deformations using Sentinel-1 PS-InSAR: The case study of tunneling in Dangjin, Korea, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 108, 102721.

Ryu, S.H., Hamm, S.Y., Jeong, J.H., Han, S.J., Cheong, J.Y., Kim, H.S., 2008, Hydraulic characteristics of shallow geology in Dongrae area, Busan megacity, The Journal of Engineering Geology, 18(1), 55-68 (in Korean with English abstract).

Son, M., Hamm, S.Y., Kim, I.S., Lee, Y.H., Jeong, H., Ryu, C.K., Son, W.K., 2002, Fracture analysis for evaluation of groundwater flow around the Geumjeong Mountain, Busan, The Journal of Engineering Geology, 12(3), 305-317 (in Korean with English abstract).

Yang, M., Wang, R., Li, M., Liao, M., 2022, A PSI targets characterization approach to interpreting surface displacement signals: A case study of the Shanghai metro tunnels, Remote Sensing of Environment, 280, 113150.

Yazici, B.V., Tunc Gormus, E., 2022, Investigating persistent scatterer InSAR (PSInSAR) technique efficiency for landslides mapping: A case study in Artvin dam area, in Turkey, Geocarto International, 37(8), 2293-2311.

Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992, Decorrelation in interferometric radar echoes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), 950-959.