Research Article

pISSN 1225-6161 • eISSN 2287-9307
Korean Journal of Remote Sensing 2024, 40(3), 307-316
https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.3.7

Korean Journal of Remote Sensing
KJRS

2024년 일본 노토반도 지진으로 인한 지표 변위 분석: Offset Tracking을 이용한 수평 방향 지표 변위를 중심으로

김봉찬[1], 이슬기[2], 이창욱[3]*

[1]강원대학교 과학교육학과 박사과정생
[2]강원대학교 스마트지역혁신학과 박사수료생
[3]강원대학교 과학교육학부 교수

Analysis of Surface Displacement Due to the 2024 Noto Peninsula Earthquake in Japan: Focus on Horizontal Surface Displacement Using Offset Tracking

Bong Chan Kim[1], Seulki Lee[2], Chang-Wook Lee[3]*

[1]PhD Student, Department of Science Education, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea
[2]PhD Candidate, Department of Smart Regional Innovation, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea
[3]Professor, Division of Science Education, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea

Abstract: On January 1, 2024, an earthquake with a moment magnitude of 7.5 occurred on the Noto Peninsula in Japan. The earthquake caused significant surface displacement on the Noto Peninsula. The surface displacement is measured by global navigation satellite system (GNSS) base stations, but there are limitations in obtaining information in areas where base stations do not exist. Therefore, in this study, we aim to determine the horizontal land surface displacement across the Noto Peninsula using offset tracking, which can detect rapidly occurring displacement. As a result of analyzing the Noto Peninsula using the offset tracking technique, it was found that more horizontal surface displacement occurred in the northwest region than in the northeast region of the Noto Peninsula, where the epicenter was located, and the surface displacement value reached a maximum of 2.9 m. The results of this study can be used to calculate surface displacement values in areas where surface displacement data are not available through ground GNSS base stations.

Keywords: Earthquake, SAR, Sentinel-1, Offset tracking

요약: 2024년 1월 1일 일본 노토반도에서 모멘트 규모 7.5의 강진이 발생했다. 이 강진에 의해 노토반도에는 심각한 지표 변위가 발생하였다. 지표 변위 파악에는 global navigation satellite system (GNSS) 기지국에서 측정된 자료를 사용하나 기지국이 존재하지 않는 지역의 정보를 획득하기에는 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 급격하게 발생한 변위를 탐지할 수 있는 offset tracking을 이용하여 노토반도 전역의 수평 지표 변위를 파악하고자 한다. Offset tracking 기법을 이용하여 노토반도를 분석한 결과 진앙이 위치한 노토반도의 북동쪽 지역보다 북서쪽 지역에서 더 많은 수평 방향 지표 변위가 발생하였으며 지표 변위 값이 최대 2.9 m에 달하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 지상 GNSS 기지국을 통해 지표 변위 자료를 획득하지 못하는 지역의 지표 변위 값을 산출하는 데 활용할 수 있을 것이다.

주요어: 지진, 합성개구레이더, Sentinel-1, Offset tracking

Received: June 3, 2024
Revised: June 24, 2024
Accepted: June 25, 2024
Published: June 30, 2024

Corresponding author:
Chang-Wook Lee
E-mail: cwlee@kangwon.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (https://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.
Copyright © 2024 Korean Society of Remote Sensing

1. 서론

2024년 1월 1일 일본 이시카와현 노토 지방에서 모멘트(moment) 규모 7.5의 지진이 발생하였으며 일본 기상청은 이를 2024년 노토반도 지진으로 명명하였다(Japan Meteorological Agency, 2024; United States Geological Survey, 2024a). 본 지진은 일본 기상청 진도 계급 기준으로 최대 진도 7의 강진으로 기록되었고 한화 기준 약 23조 5천억 원의 재산 피해 및 236명의 사망자가 발생하는 피해를 입혔다(The Headquarters for Earthquake Research Promotion, 2024; Oh, 2024). 강진의 발생은 많은 인명 피해와 재산 피해를 입힘과 더불어 큰 지표 변위를 야기한다. 이때 지진으로 인해 발생한 지표 변위를 파악하는 데에는 주로 지상 global navigation satellite system (GNSS) 기지국에서 측정된 자료가 활용된다. 특히 2024년 노토반도 지진의 경우 일본 국토지리원에서 GNSS 기지국을 통해 측정한 지표 변위 자료를 제공하고 있어 높은 정확도의 지표 변위 자료를 획득할 수 있다(Geospatioal Information Authority of Japan, 2024a). 이렇듯 GNSS 기지국의 경우 높은 정확도의 지표 변위 자료를 획득할 수 있다는 장점이 존재한다. 그러나 GNSS 기지국이 위치하지 않는 지역의 지표 변위를 파악하기 어렵다는 한계점이 존재한다. 이러한 GNSS 기지국을 통한 지표 변위 측정의 한계점을 극복하기 위한 방법 중 하나로 위성영상을 활용한 지표 변위 연구가 수행되고 있다.

Synthetic aperture radar (SAR) 위성은 위상(phase) 등의 특성을 이용하여 지표 변위를 수 mm 이내의 정밀한 관측이 가능해 지진으로 인해 발생하는 지표 변위 또는 변화 탐지에 대한 연구에 적극적으로 활용되고 있다. SAR를 이용한 대표적인 지표 변위 탐지 기법으로는 interometry synthetic aperture radar (InSAR), offset tracking 기법이 있다. InSAR 기법은 넓은 지역의 지표 변위를 정밀하게 관측할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 단일 픽셀의 지표 변위 값이 사용한 전자기파 파장의 절반보다 큰 경우 위상 unwrapping 과정에서 문제가 발생한다는 문제가 있다(Peng et al., 2022). Offset tracking 기법은 Bernstein and Colby (1983)이 제안한 교차 상관(cross-correlation) 알고리즘을 사용해 두 영상 사이의 상관성을 추정한 후 지표 변위를 관측하는 기법으로 단기간에 매우 큰 지표 변위가 발생해도 이를 관측할 수 있다는 장점이 존재한다(Chae et al., 2019; Lu and Veci, 2016; Chae et al., 2021). 또한 offset tracking 기법은 differential InSAR 기법이 가시선 방향(line of sight)의 지표 변위만 추정할 수 있다는 한계를 가진 것과는 다르게 지표의 azimuth 방향 및 range 방향으로의 변위도 추출할 수 있다는 장점을 가진다(Fan et al., 2019). 특히 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)에서 제공하는 프로그램인 SNAP에서는 비교적 간편하게 지표 변위의 방향 및 속도를 산출 가능하다(Lu and Veci, 2016). 이러한 장점들로 인해 offset tracking 기법은 빙하의 이동과 지진 및 산사태로 인한 피해 연구에 많이 활용되고 있다.

Strozzi et al. (2002)은 offset tracking 기법을 이용하여 1992년 및 1996년에 발생한 북부 Svalbard의 Monacobreen 지역의 빙하 움직임을 분석하였으며, Cai et al. (2017)은 미국 콜로라도주 슬럼굴리언에서 발생한 산사태로 인한 지표 변위를 파악하기 위해 적응형 offset tracking 기법을 사용하였다. 이와 더불어 Himematsu and Furuya (2016)는 2016년 발생한 구마모토 지진으로 인한 지표 변위를 파악하기 위해 Wang et al. (2023)은 2023년 2월 튀르키예-시리아 지역에 발생한 지진으로 인해 발생한 지표의 급격한 변위를 파악하는데 offset tracking 기법을 사용하였다. 또한 일본우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, 2024)는 Advanced Land Observation Satellite (ALOS)-2 위성 영상을 이용하여 2024년 노토반도 지진으로 인한 지표 변위를 InSAR 기법과 offset tracking 기법을 이용하여 분석하였다. 그러나 InSAR 기법을 이용한 분석은 큰 지표 변위로 인해 unwrapping을 수행하지 못했으며 offset tracking 기법을 이용한 분석은 동-서 방향의 지표 변위, 수직 방향의 지표 변위만 제공해 수평 방향의 지표 변위를 제공하지 않았다는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 offset tracking 기법을 사용하여 동-서 및 남-북 방향을 고려한 수평 방향의 지표 변위를 분석하고자 한다.

본 연구에서는 offset tracking 기법을 이용하여 2024년 1월 노토반도 지진으로 인해 발생한 지표 변화 지역을 파악하고자 한다. 기존의 GNSS 자료는 점자료로 기지국이 존재하는 지역의 지표 변위만 관측할 수 있다는 한계가 존재한다. 반면 SAR 영상 기반의 관측 기법은 면 자료를 관측할 수 있기 때문에 광범위한 지역의 변화를 관측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존의 InSAR 기법은 급격한 지표 변위가 발생 시 위상의 한계로 인해 관측하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 본 연구에서는 offset tracking 기법을 적용하였으며, 광범위한 지역의 급격한 지표 변위를 관측할 수 있다는 장점을 가진다. 연구 결과의 검증을 위해서 지상 GNSS 기지국을 통해 측정된 지표 변위 자료와 비교하여 offset tracking 기법이 지진으로 인한 급격한 지표 변위의 파악에 효과적임을 보이고자 한다. 본 연구는 급격하게 나타나는 큰 지표 변위가 발생하였을 때 광범위한 지역의 지표 변위 파악에 활용할 수 있을 것이다.

2. 연구 지역 및 자료

2.1. 연구 지역

본 연구는 2024년 1월 1일 지진이 발생한 일본 이시카와현 노토 지방의 노토반도를 연구 지역으로 설정하였다. 2024년 노토반도 지진의 진앙으로부터 반경 250 km 이내에서 모멘트 규모 6 이상의 지진이 1900년 이후로 30번이나 발생했으며, 이 중 3건은 노토반도 또는 그 근처에서 발생했다(United States Geological Survey, 2024b). 본 지진으로 인해 노토반도의 경우 최대 4.10 m의 융기가 발생하였으며, 서

https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.3.7

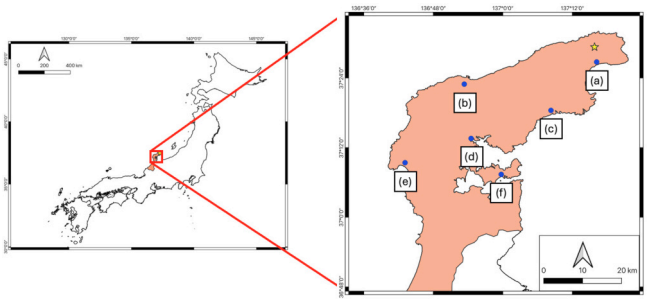

Fig. 1. Figure of the study area. Showing Ishikawa Prefecture (Apricot color area), the epicenter (yellow star), and global navigation satellite system (GNSS) station (blue dot) (Geospatial Information Authority of Japan, 2024b).

쪽으로 1.48 m의 수평 이동이 관측되었다(Geospatial Information Authority of Japan, 2024a).

Fig. 1은 진앙, 노토반도의 위치, GNSS 기지국 위치 및 연구 지역을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 노란 별 형태로 표시된 곳은 2024년 노토반도 지진 중 모멘트 규모가 7.5인 지진의 진앙을 나타내는 것으로 37.489°N, 137.264°E에 위치하며 진원 깊이는 약 10 km이다(United States Geological Survey, 2024a). Fig. 1에서 파란색 점으로 표시가 된 곳은 본 연구에서 사용한 지상 GNSS 기지국의 위치로 Fig. 1(a)는 진앙에서 가장 가까운 곳에 위치한 Suzu 기지국, Fig. 1(b)는 Wajima 기지국, Fig. 1(c)는 진앙에서 두 번째로 가까운 곳에 위치한 Noto 기지국, Fig. 1(d)는 Anamizu 기지국, Fig. 1(e)는 Togi 기지국, Fig. 1(f)는 Noto Island 기지국을 나타낸다(Geospatial Information Authority of Japan, 2024b).

2.2. 연구 자료

2.2.1. Sentinel-1 위성 영상 자료

본 연구에서 사용한 위성은 ESA에서 운용하는 Sentinel-1을 사용하였다. Sentinel-1은 C 대역 SAR를 탑재하고 있으며 ESA에서 전 세계 과학자들의 연구를 위해 무료로 제공하고 있으며, Sentinel-1 임무를 통해 수집된 데이터는 다양한 용도로 활용되고 있다. 이러한 용도 중 일부에는 해상 및 육상 모니터링, 환경 재해로 인한 비상 대응 등이 있다.

Offset tracking 기법을 사용하기 위해서는 지진 전후의 위성 영상이 필요하다. 본 연구에서는 지진 전인 2023년 12월 30일 획득한 영상과 지진 후 날짜인 2024년 1월 11일 획득한 영상 중 Ground Range Detected (GRD) 자료를 사용하였다. GRD는 지구 타원체 모델인 WGS84를 이용해 지상 범위 탐지 및 Multi-look된 결과를 투영한 자료로 speckle noise가 줄어든다는 특징이 존재한다. Multi-look 과정에서 해상도가 낮아지는 문제가 있으나 본 연구에서 사용한 ESA SNAP 소프트웨어의 offset tracking 툴은 GRD 자료를 이용하여 offset tracking 기법을 수행한다. 따라서 본 연구에서는 Sentinel-1A 위성이 촬영한 GRD 자료를 사용하였다(Lu and Veci, 2016; Amitrano et al., 2019; Mahmoud et al., 2020).

Table 1. Image parameters used in this study

Satellite Name	Sentinel-1A
Acquisition Date	December 30, 2023 January 11, 2024
Acquisition Mode	Interferometric Wide Swath (IW)
Image Size (Range × Azimuth) (pixel)	9,691 × 19,404
Polarization	VV + VH
Parallel Baseline (m)	–40
Perpendicular Baseline (m)	–34
Temporal Baseline (days)	12
Orbit Direction	Descending
Azimuth Pixel Spacing (m)	10
Range Pixel Spacing (m)	10
Mean Incidence Angle (deg)	33.78

Table 1은 본 연구에서 사용한 위성 영상 목록 및 영상들의 parameter들을 나타낸 것이다. Offset tracking 처리를 위해 지진 발생 전후로 획득한 영상들인 2023년 12월 30일, 2024년 1월 11일의 노토반도 영상을 사용하였다. 두 영상 모두 descending 궤도에서 획득되었으며 위성 진행 방향의 오른쪽 방향으로 입사각이 평균 33.78°일 때 Interferometric Wide Swath (IW) 모드로 획득되었다. Sentinel-1 GRD 영상은 VV 및 VH 편파로 획득한 정보를 제공하나 VH 편파의 경우 일부 지역에서 부정확한 결과를 낼 수 있기에 VV 편파를 이용하였다(Du et al., 2022). 두 영상은 Azimuth, Range 방향 둘 다 10 m의 픽셀 간 거리를 가진다. 영상들의 parallel baseline은 –40 m, perpendicular baseline 이 –34 m, temporal baseline 은 12일이다. 해당 영상들은 perpendicular baseline 값이 낮아 각자 관측 기하가 비슷하기에 높은 상관도를 가진다(Baek et al., 2018). 또한 본 연구에서는 관측 오차를 최소화하기 위해 2023년 12월 30일, 2024년 1월 11일 획득한 영상들을 사용하였다(Jung and Hong, 2017).

2.2.2 지상 GNSS 기지국 지표 변위 자료

본 연구에서 사용한 GNSS 기지국의 지표 변위 자료는 일본 국토지리원에서 제공하는 자료를 이용하였다. 해당 자료는 GNSS 기지국의 동-서 방향, 남-북 방향, 수평 방향 및 수직 방향의 지표 변위를 제공하고 있다. 본 연구에서 사용한 Sentinel-1 영상은 지진 전 획득한 영상과 지진 발생 일자 사이의 기간이 짧으므로 GNSS 자료는 영상 획득 날짜를 기준으로 하는 것이 아닌, 지진 발생 이전 1주간인 2023년 12월 25일부터 2023년 12월 31일까지의 지표 변위 자료와 지진 발생 이후 1주간인 2024년 1월 2일부터 2024년 1월 8일까지의 지표 변위

자료 평균을 산출하여 사용하였다. 이때 Fig. 1(d) Anamizu 기지국의 경우는 2024년 1월 7일 및 2024년 1월 8일의 자료가 존재하지 않아 해당 기지국의 지진 발생 이후의 지표 변위 자료는 2024년 1월 2일부터 2024년 1월 6일까지의 5일간 자료의 평균 값을 활용하였다. 지표 변위 자료의 경우 동-서 방향에서는 동쪽 방향을, 남-북 방향에서는 북쪽 방향을 양수 값으로 나타내었다. 또한 수직 방향에서는 지표에서 위로 상승하는 방향을, range 방향의 경우 위성과 멀어지는 방향을 양수 값으로 나타내었다. 그러나 수평 방향 지표 변위 자료의 경우 방향에 상관없이 양수 값으로 나타내었다(Geospatial Information Authority of Japan, 2024c).

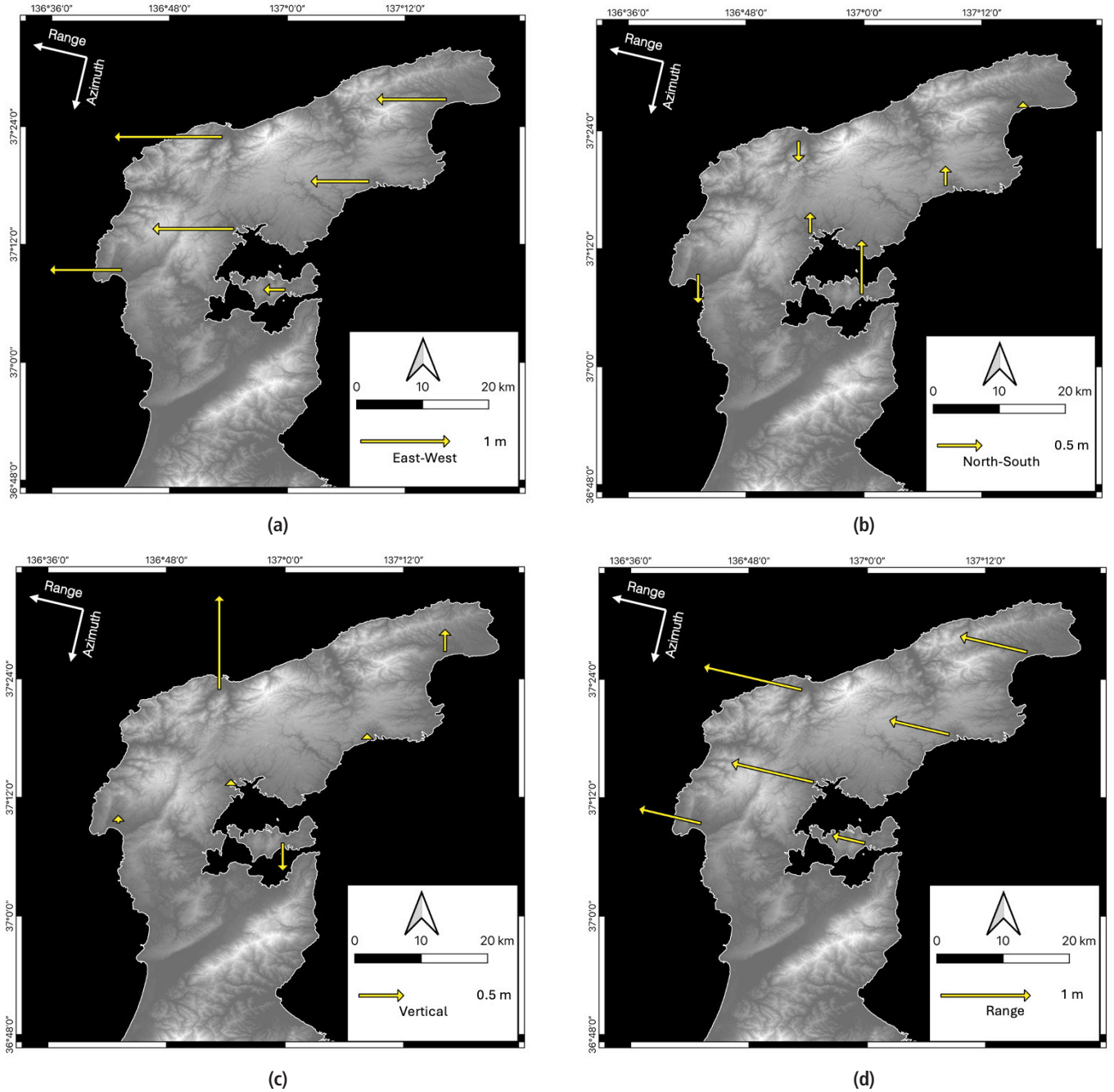

Fig. 2. Surface displacement measured by GNSS base stations. (a) shows the surface displacement in the east-west direction, (b) shows the surface displacement in the north-south direction, (c) shows the surface displacement in the vertical direction, and (d) shows the projection of the surface displacement in the range direction (Geospatial Information Authority of Japan, 2024b; 2024c). The background image is SRTM 1arc sec digital elevation model.

https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.3.7

Table 2. Latitude-longitude coordinates and average displacement values of GNSS base stations (Geospatial Information Authority of Japan, 2024b; 2024c)

Symbol	Station Name	Latitude	Longitude	Displacement (m)[a]				
				E-W[b]	S-N[b]	Horizontal[c]	Vertical	Range[b],[d]
a	Suzu	37°26′45.7213″	137°16′12.1601″	–0.782	0.024	0.783	0.248	0.767
b	Wajima	37°22′56.5443″	136°53′20.9570″	–1.213	–0.227	1.234	1.049	1.129
c	Noto	37°18′25.0939″	137°08′18.7634″	–0.651	0.220	0.687	0.007	0.684
d	Anamizu	37°13′35.1784″	136°54′31.5529″	–0.907	0.231	0.936	0.026	0.936
e	Togi	37°09′24.2678″	136°43′07.5095″	–0.812	–0.330	0.876	0.087	0.715
f	Noto Island	37°07′23.3822″	136°59′45.8453″	–0.241	0.606	0.652	–0.313	0.374

[a] The displacement value is rounded to the fourth decimal place and may differ from the horizontal value.
[b] The displacement value is positive if the surface displacement direction is east, north, or in a direction where the ground is rising and moving away from the satellite.
[c] Horizontal indicator displacement is positive regardless of direction.
[d] Positive for moving away from the satellite, negative for moving closer.

Table 2는 각 기지국의 위경도 좌표 및 기지국에서 측정한 평균 지표 변위 값 나타낸 것이다. Table 2에서 Fig. 1(a) Suzu 기지국은 진앙지에서 가장 가까운 곳에 위치함에도 불구하고 6개 기지국 중 4 번째로 큰 수평 방향 지표 변위 값을 보였다. Fig. 1(a) Suzu 기지국은 진앙지에서 가장 가까운 곳에 위치함에도 불구하고 6개 기지국 중 3번째로 작은 수평 방향 지표 변위 값을 보였다. Fig. 1(a) Suzu 기지국의 수직 방향 지표 변위 값의 경우 0.248 m로 6개 기지국 중 수직 방향 지표 변위 값의 절댓값은 3번째로 높은 수준이나 수직 방향 지표 변위가 가장 낮게 기록된 Fig. 1(c) Noto 기지국 대비 약 35.4배 수준의 지표 변위 값을 보였다. Fig. 1(b) Wajima 기지국은 Fig. 1(a) Suzu 기지국보다 진앙지에서 멀리 떨어져 있음에도 불구하고 다른 기지국 보다 수평 방향의 지표 변위가 가장 큰 것으로 나타났다. 특히 Fig. 1(b) Wajima 기지국은 동-서 방향의 지표 변위가 다른 기지국보다 큰 –1.213 m로 나타났으며 수직 방향의 경우 1 m 이상 융기한 유일한 기지국으로 나타났다. Fig. 1(c) Noto 기지국의 경우 6개 기지국 중 가장 낮은 수직 방향 지표 변위의 절댓값을 보이고 있으며 가장 낮은 수평 방향 지표 변위를 보인 Fig. 1(f) Noto Island 기지국과는 수평 방향 지표 변위가 0.035 m의 차이를 가진다.

Fig. 1(d) Anamizu 기지국의 경우 다른 기지국 대비 비교적 적은 수직 방향의 지표 변위 값의 절댓값을 보였으며, 수평 방향 지표 변위 값의 경우 Fig. 1(b) Wajima 기지국에 이어 두 번째로 높은 0.936 m로 나타났다. Fig. 1(e) Togi 기지국의 경우 진앙지에서 가장 멀리 위치하였으나 Fig. 1(f) Noto Island 기지국 보다 높은 수평 방향의 지표 변위가 나타났으며, 이는 6개 기지국 중 3 번째로 큰 수평 방향의 지표 변위 값이다. Fig. 1(f) Noto Island 기지국의 경우 가장 낮은 수평 방향의 지표 변위 값을 보이며, 특히 융기 현상이 발생한 다른 기지국들과는 달리 0.313 m 지반 침하가 발생한 것으로 나타났다.

수평 방향의 지표 변위를 위성 영상의 range 방향으로 투영한 결과 Figs. 1(a–f) 기지국 모두 위성에서 멀어지는 방향으로 수평 방향의 지표 변위가 발생한 것으로 나타났다. Fig. 1(b) Wajima 기지국에서 가장 큰 range 방향의 지표 변위가, Fig. 1(f) Noto Island 기지국에서 가장 작은 range 방향의 지표 변위가 나타났다. Fig. 2는 지상 GNSS 기지국에서 측정한 지표 변위를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 동-서 방향, Fig. 2(b)는 남-북 방향의 지표 변위를 나타내며 Fig. 2(c)는 수직 방향, Fig. 2(d)는 위성 영상의 range 방향의 지표 변위를 나타낸 것이다 (Geospatial Information Authority of Japan, 2024b; 2024c).

3. 연구 방법

Fig. 3는 본 연구의 흐름도를 나타낸다. 본 연구에서는 ESA의 SNAP 프로그램에 탑재된 툴을 이용하여 전처리 과정 및 offset tracking을

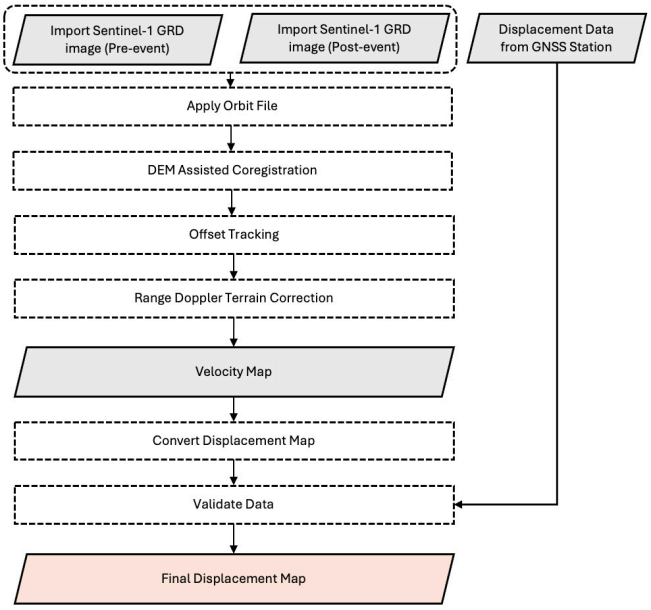

Fig. 3. Flow chart of this study.

Table 3. Processing parameters of offset tracking

Output Grid		Registration	
Grid Azimuth Spacing in Pixels	40	Registration Window Width	128
Grid Range S pacing in Pixels	40	Registration Window Height	128
Grid Azimuth Spacing in Meters	400	Registration Oversampling	16
Grid Range Spacing in Meters	400	Cross-Correlation Threshold	0.1
Grid Azimuth Dimension	485	Average Box Size	5
Grid Range Dimension	219	Max Velocity (m/day)	0.3
Total Grid Points	106215	Radius for Hole Filling	4

수행하였다. 전처리 과정으로는 영상들에 정밀 궤도 정보를 적용한 다음 지형에 의한 offset을 최소화하기 위해 수치 표고모델을 이용하여 coregistration 하는 과정을 수행하였다(Lu and Veci, 2016; Fan et al. 2019). 이때 지진 전후에 획득한 영상들의 궤도 정보로 ESA에서 제공하는 Sentinel Precise 자료를 적용하였으며 coregistration 과정에 사용한 수치 표고모델은 Shuttel Radar Topography Mission (SRTM)을 통해 획득된 SRTM 1 arc sec HGT를 사용하였다(United States Geological Survey, 2018). 이후 연구 지역으로 두 영상을 subset 한 다음 offset tracking 기법을 수행하였다(Lu and Veci, 2016). SNAP offset tracking 툴은 사용자가 지정한 grid spacing parameter를 바탕으로 지진 발생 전 영상에 GCP를 설정하고, 지진 발생 전후 영상 간 cross correlation을 수행하여 registration window 내에서 지진 발생 후 영상의 GCP 위치를 탐색한다. 이후 두 영상의 GCP 변위를 기반으로 이동 속도를 산출하며, 이 과정에서 max velocity 값을 이용해 이상치를 제거하여 velocity map을 산출한다(Array Systems Computing, 2020). Offset tracking 기법은 변위 추정 커널(kernel) 크기가 작은 경우 보다 정밀한 지표 변위를 산출할 수 있으나 해상도가 낮아지는 단점이 존재한다.

반대로 변위 추정 커널이 커지는 경우 해상도가 높아지나 지표 변위의 정밀도가 떨어지는 단점이 존재한다(Baek et al., 2018). 따라서 적합한 변위 추정 커널의 크기는 연구 지역에 따라 달라진다. Offset tracking의 경우 주로 빙하 등 변위가 큰 대상에 대한 연구에 사용된다. 따라서 SNAP offset tracking 툴의 경우 parameter 중 max velocity의 기본 값이 5 m/day로 설정 되어있다(Lu and Veci, 2016). 그러나 본 연구에서 사용한 영상들의 temporal baseline이 12일이므로 Table 1에서 나타난 이번 지진으로 인한 지상 GNSS 기지국의 최대 수평 방향 지표 변위인 1.234 m를 일간 평균 속도로 환산하면 약 0.1 m/day이다 (Geospatial Information Authority of Japan, 2024c). 이를 고려하여 본 연구에서는 GNSS 기지국의 수평 방향 최대 지표 변위 이상을 반영할 수 있도록 processing parameter 중 max velocity 값을 0.3 m/day로 설정하였다. 이 외 다른 요소들의 경우 ESA SNAP에서 제공하는 기본 값을 사용하였다. 특히 registration window width 및 height의 경우 지표 변위 발생 시 지표 변위 정도를 탐색하는 범위를 설정하는 parameter로 2024년 노토반도 지진에서는 지표 변위 정도가 128 픽셀 내에 위치한다. 따라서 해당 값은 기본 값인 128 픽셀로 결정하였다 (Lu and Veci, 2016). Table 3는 offset tracking 기법에 적용한 processing parameter들을 나타낸 것이다.

Offset tracking을 통해 산출된 자료는 수치표고모델을 이용하여 지형 보정을 수행해 velocity map을 산출하였다(Lu and Veci, 2016). 이때 사용한 수치 표고모델은 전처리 과정에서 사용한 SRTM 1 arc sec HGT를 이용하여 수행하였다. 이렇게 산출된 velocity map 자료는 연구에서 사용한 두 위성 영상 간 temporal baseline 값인 12를 곱해 지표 변위 지도로 변경하였다. 이후, 동-서, 남-북 및 range 방향의 지표 변위를 각각 산출한 다음 일본 국토지리원에서 제공하는 GNSS 자료를 이용해 비교 및 검증하여 최종 지표 변위 지도를 제작하였다.

4. 연구결과 및 토의

Fig. 4는 지상 GNSS 기지국과 offset tracking을 통해 획득한 지표 변위 자료를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 동-서 방향의 지표 변위를 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 남-북 방향의 지표 변위를 나타낸 것이다. Fig. 4(c)는 range 방향의 지표 변위를 나타낸 것이다. 이때 Figs. 4(a, b)에서 붉은색으로 표시된 지역은 동쪽, 북쪽 방향으로 지표 변위가 발생하였음을 의미하며, 푸른색으로 표시된 지역은 서쪽, 남쪽 방향으로 지표 변위가 발생하였음을 의미한다. Fig. 4(c)에서 푸른 색으로 표시된 지역은 위성과 멀어지는 방향으로 지표 변위가 발생했음을 의미하며, 붉은색으로 표시된 지역은 위성과 가까워지는 방향으로 지표 변위가 발생했음을 의미한다. 지상 GNSS 기지국의 지표 변위 자료는 기지국의 위치에 offset tracking과 동일한 색상 범례를 가진 원을 통해 나타내었다.

Fig. 5는 지상 GNSS 기지국과 offset tracking의 지표 변위 자료 및 지상 GNSS 기지국 자료를 이용한 offset tracking 자료의 검증을 위한 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE) 값을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 동-서 방향의 지표 변위를, Fig. 5(b)는 남-북 방향의 지표 변위를, Fig. 5(c)는 range 방향의 지표 변위 자료를 나타낸 것이다. Fig. 5(c) range 방향의 MAE가 0.509 m로 가장 오차가 작은 것으로 나타났으며, Fig. 5(a) 동-서 방향의 MAE가 0.522 m, Fig. 5(b) 남-북 방향의 MAE가 0.682 m로 남-북 방향의 MAE가 가장 큰 오차를 보였다. 일반적으로 offset tracking 기법에서 오차 범위는 픽셀 크기의 1/10에

https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.3.7

서 1/20 정도로 알려져 있다(Strozzi et al., 2002; Jia et al., 2020). 본 연구에서 사용한 Sentinel-1 위성 영상은 Table 1에서 pixel spacing 값이 10 m이므로 오차의 범위는 0.5–1 m이다. 따라서 본 연구를 통해 산출한 지표 변위 지도는 비교적 낮은 오차 값을 가진다고 판단하였다.

Fig. 6는 offset tracking 기법을 이용해 산출한 수평 방향의 지표 변위량을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 진앙과 가장 멀리 떨어진 노토반도의 남부 지역은 지표 변위가 적게 발생한 것을 확인할 수 있다. (a) 지역의 경우 진앙이 위치하는 지역이나 지표 변위의 정도는 비교적 적

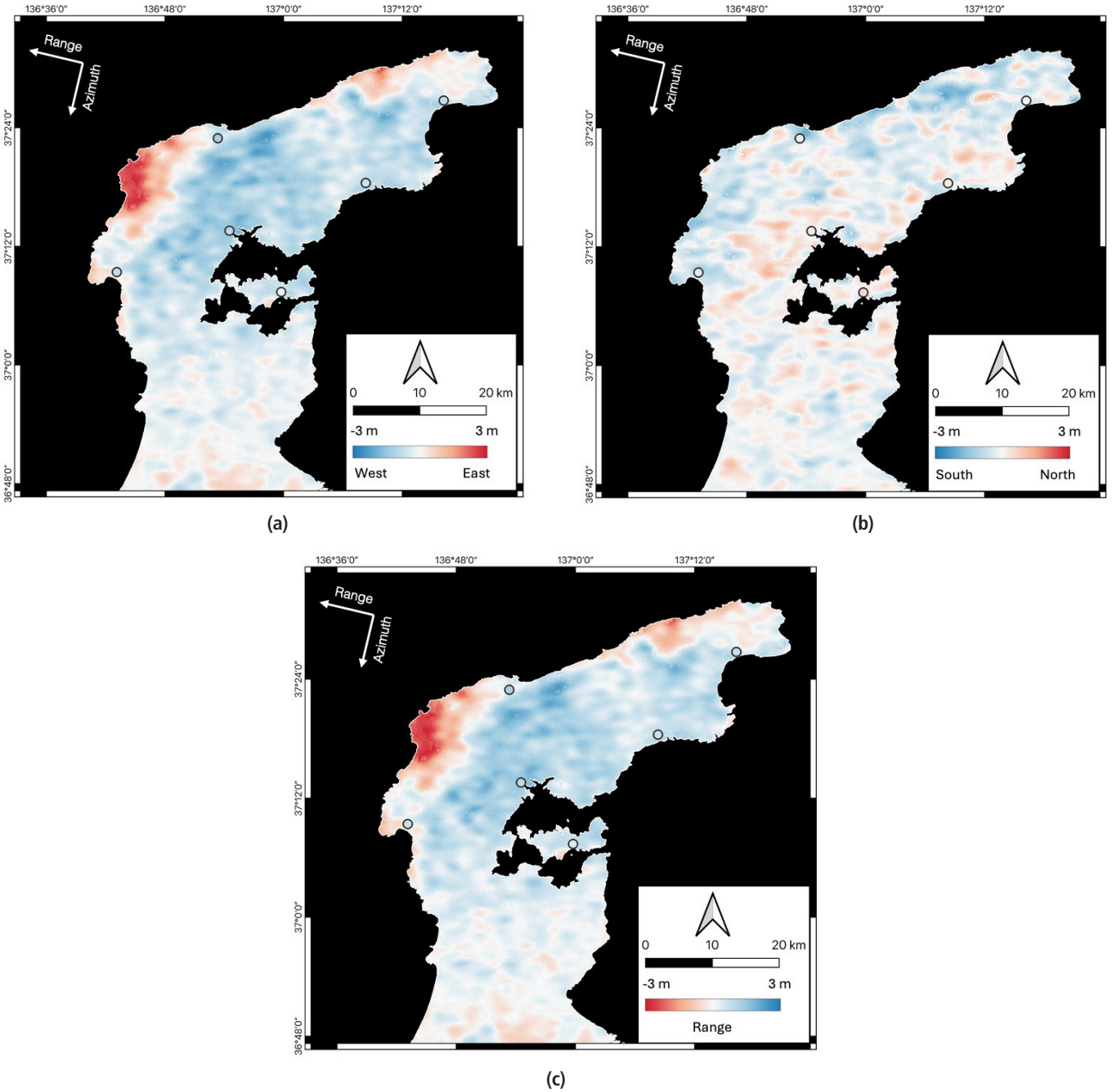

Fig. 4. Comparison of horizontal surface displacement for offset tracking with a GNSS base station on the ground. (a) shows the surface displacement in the east-west direction and (b) shows the surface displacement in the north-south direction. The red color represents the east and north directions and the blue color represents the west and south directions. (c) shows the surface displacement in the range direction. The colors are blue for the direction away from the satellite and red for the direction towards it. The colored circles in the figure indicate the location of the GNSS base station and the surface displacement value.

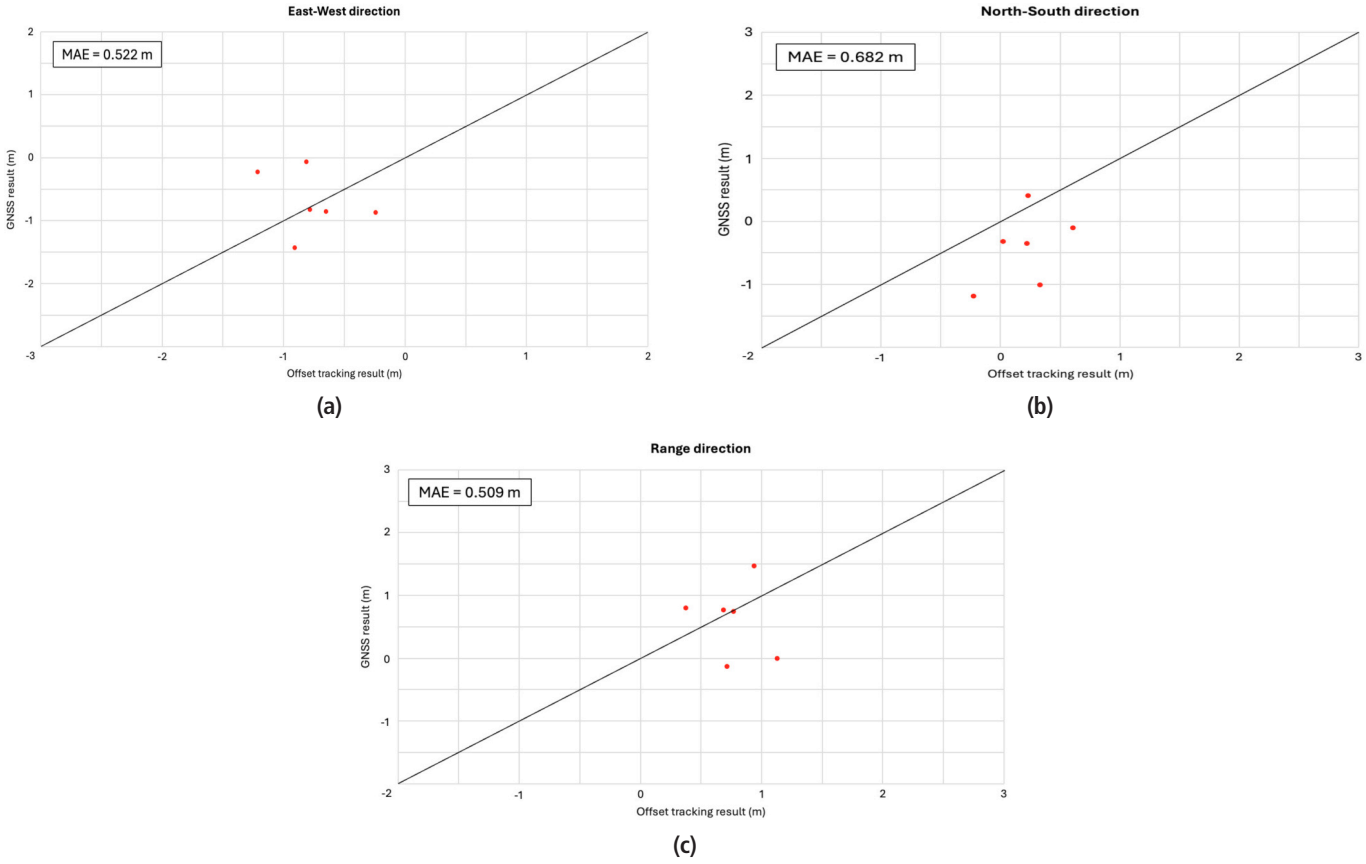

Fig. 5. Comparison of surface displacement values from ground GNSS base stations and offset tracking. (a) shows the surface displacement in the east-west direction, (b) in the south-north direction, and (c) in the range direction.

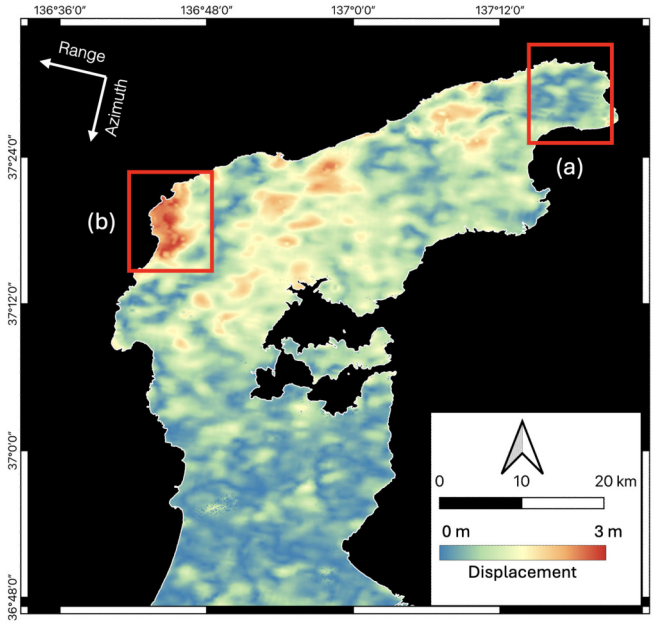

Fig. 6. Horizontal surface displacement maps obtained with offset tracking. (a) shows less surface displacement. (b) shows a large surface displacement in the southeast direction.

은 것으로 나타나며 해안가 지역에 한해 최대 1.7 m의 지표 변위가 있었음을 확인할 수 있다. 이에 반해 (b) 지역의 경우 진앙과 비교적 멀리 떨어져 있으나 동남쪽 방향으로 큰 지표 변위가 발생했으며 최대 지표 변위는 2.9 m로 나타났다. 노토반도의 북부 지역의 경우 (b) 지역 대비 적은 지표 변위량을 보였으며 전반적으로 남서쪽 방향의 지표 변위가 발생한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 offset tracking 기법을 이용하여 2024년 1월 1일 일본 노토반도 지역에서 발생한 지진으로 인한 지표의 변위를 파악하고, 수평 방향의 지표 변위 지도를 산출하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 2023년 12월 30일 및 2024년 1월 11일 획득한 Sentinel-1 영상을 이용하여 지진 전후의 offset tracking 자료를 산출하였다. 이렇게 산출된 offset tracking 자료는 GNSS 기지국의 동-서, 남-북 및 range 방향의 지표 변위 자료와 비교하여 검증하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.3.7

1) 본 연구에서는 offset tracking 기법을 이용하여 지상 GNSS 기지국이 위치하지 않는 지역의 지표 변위를 파악할 수 있었다.
2) 2024년 1월 1일 일본 노토반도에서 발생한 지진으로 인해 노토반도에 지표의 변화가 발생하였다.
3) 진앙지와 비교적 거리가 있는 노토반도의 북서쪽 지역에서 최대 지표 변위가 발생하였다.
4) 이때 노토반도의 북서쪽 지역 및 일부 동북쪽 지역에서는 알려진 지표 변위와는 다른 양상을 보였다. 해당 지역들은 남동쪽 방향의 지표 변위가 관측되었으며, 노토반도의 북부 지역에서는 서쪽 방향의 지표 변위가 관측되었다.

본 연구에서 산출한 지표 변위 지도는 노토반도의 북서쪽 지역 및 일부 동북쪽 지역에서 동쪽으로 향하는 지표 변위가 나타났다는 점에서 일본우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, 2024)가 2024년 1월 1일 발표한 자료와 유사한 양상을 보인다. 그러나 이후 진행된 연구와는 다른 양상을 보인다. 이는 multi-look 기법을 적용한 GRD 자료는 비교적 해상도가 낮아 관측 정밀도가 낮아져 지표 변위 방향 파악에 어려움이 있었던 것으로 생각된다. 또한 본 연구는 offset tracking 기법을 사용하여 지진으로 인한 지표 변위에 대한 연구는 수행하였으나 기반암 등 지표의 변위에 영향을 주는 다른 요소들을 고려하지 못했다는 한계점이 존재하며 offset tracking을 통해 산출한 지표 변위 지도의 MAE 값이 0.509 m에서 최대 0.682 m에 달하였다. 따라서 추후 연구에는 기반암 등 지표 변위에 영향을 주는 다른 요소 및 적합한 offset tracking processing parameter에 대한 연구와 더불어 single look complex 등 다양한 자료를 활용하여 연구를 수행할 것이다.

사사

이 논문은 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2023R1A2C1007742).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

Amitrano, D., Guida, R., Di Martino, G., and Iodice, A., 2019. Glacier monitoring using frequency domain offset tracking applied to sentinel-1 images: A product performance comparison. *Remote Sensing, 11*(11), 1322. https://doi.org/10.3390/rs11111322

Array Systems Computing, 2020. Github - senbox-org/s1tbx. Available online: https://github.com/senbox-org/s1tbx/blob/master/s1tbx-op-insar/src/main/java/org/esa/s1tbx/insar/gpf/OffsetTrackingOp.java (accessed on June 18, 2024).

Baek, W. K., Jung, H. S., Chae, S. H., and Lee, W. J., 2018. Two-dimensional velocity measurements of Uversbreen glacier in Svalbard using TerraSAR-X offset tracking approach. *Korean Journal of Remote Sensing, 34*(3), 495–506. https://doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.3.5

Bernstein, R., and Colby, C., 1983. Image geometry and rectification. *Manual of Remote Sensing, 1*, 873–922.

Cai, J., Wang, C., Mao, X., and Wang, Q., 2017. An adaptive offset tracking method with SAR images for landslide displacement monitoring. *Remote Sensing, 9*(8), 830. https://doi.org/10.3390/rs9080830

Chae, S. H., Lee, K. J., and Lee, S. G., 2021. Two-dimensional velocity measurements of Campbell Glacier in East Antarctica using coarse-to-fine SAR offset tracking approach of KOMPSAT-5 satellite image. *Korean Journal of Remote Sensing, 37*(6–3), 2035–2046. https://doi.org/10.7780/kjrs.2021.37.6.3.11

Chae, S. H., Lee, W. J., Baek, W. K., and Jung, H. S., 2019. An improvement of the performance of SAR offset tracking approach to measure optimal surface displacements. *IEEE Access, 7*, 131627–131637. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938831

Du, S., Mallorqui, J. J., and Zhao, F., 2022. ACE-OT: Polarimetric SAR data-based amplitude contrast enhancement algorithm for offset tracking applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60*, 1–15. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3195612

Fan, J., Wang, Q., Liu, G., Zhang, L., Guo, Z., Tong, L. et al., 2019. Monitoring and analyzing mountain glacier surface movement using SAR data and a terrestrial laser scanner: A case study of the Himalayas north slope glacier area. *Remote Sensing, 11*(6), 625. https://doi.org/10.3390/rs11060625

Geospatial Information Authority of Japan, 2024a. Reiwa 6 Noto Peninsula earthquake results of field emergency survey - Results of on-site emergency surveys. Available online: https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/R6-notopeninsula-earthquake-EmergencyObservation.html (accessed on Apr. 18, 2024).

Geospatial Information Authority of Japan, 2024b. Survey results and parameters of the area at basic reference points. Available online: https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/index.aspx#11/37.328400/136.973419/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1z0f0 (accessed on

May 27, 2024).

Geospatial Information Authority of Japan, 2024c. Observation data before and after the Noto Peninsula earthquake in Reiwa 6 (January 1, M 7.6). Available online: https://www.gsi.go.jp/common/000254311.pdf (accessed on Feb. 1, 2024).

Himematsu, Y., and Furuya, M., 2016. Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: Evidence for dynamic slip partitioning. *Earth, Planets and Space, 68*, 169. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0545-7

Japan Aerospace Exploration Agency, 2024. Observation results of the Noto Peninsula earthquake in Reiwa 6 by Daichi-2. Available online: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/library/disaster/dis_pal2_noto_earthquake_20240110_j.htm (accessed on June 19, 2024).

Japan Meteorological Agency, 2024. Related information on the Noto Peninsula earthquake in Reiwa 6. Available online: https://www.jma.go.jp/jma/menu/20240101_noto_jishin.html (accessed on Feb. 2, 2024).

Jia, H., Wang, Y., Ge, D., Deng, Y., and Wang, R., 2020. Improved offset tracking for predisaster deformation monitoring of the 2018 Jinsha River landslide (Tibet, China). *Remote Sensing of Environment, 247*, 111899. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111899

Jung, H. S., and Hong, S. M., 2017. Mapping three-dimensional surface deformation caused by the 2010 Haiti earthquake using advanced satellite radar interferometry. *Plos One, 12*(11), e0188286. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188286

Lu, J., and Veci, L., 2016. *Offset tracking tutorial*. European Space Agency. https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Offset%20Tracking%20Tutorial.pdf

Mahmoud, A. M. A., Novellino, A., Hussain, E., Marsh, S., Psimoulis, P., and Smith, M., 2020. The use of SAR offset tracking for detecting sand dune movement in Sudan. *Remote Sensing, 12*(20), 3410. https://doi.org/10.3390/rs12203410

Oh, S., 2024. Japanese government estimates up to 23 trillion won in damage to 3 Noto Peninsula earthquake prefectures. Available online: https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=7875240 (accessed on Jan. 31, 2024).

Peng, L., Wang, H., Ng, A. H. M., and Yang, X., 2022. SAR offset tracking based on feature points. *Frontiers in Earth Science, 9*, 724965. https://doi.org/10.3389/feart.2021.724965

Strozzi, T., Luckman, A., Murray, T., Wegmuller, U., and Werner, C. L., 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40*(11), 2384–2391. https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.805079

The Headquarters for Earthquake Research Promotion, 2024. Evaluation of the 2024 Noto Peninsula earthquakes. Available online: https://www.jishin.go.jp/main/chousa/24jan_noto_2/index-e.htm (accessed on May 27, 2024).

United States Geological Survey, 2018. USGS EROS archive-digital elevation-shuttle radar topography mission (SRTM) 1 arc-second global. Available online: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1 (accessed on June 19, 2024).

United States Geological Survey, 2024a. Earthquake hazards program, M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Available online: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/origin/detail (accessed on Jan. 31, 2024).

United States Geological Survey, 2024b. Earthquake hazards program, M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan earthquake. Available online:https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/executive (accessed on May 27, 2024).

Wang, W., Liu, Y., Fan, X., Ma, C., and Shan, X., 2023. Coseismic deformation, fault slip distribution, and coulomb stress perturbation of the 2023 Türkiye-Syria earthquake doublet based on SAR offset tracking. *Remote Sensing, 15*(23), 5443. https://doi.org/10.3390/rs15235443