



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

PSInSAR 기법을 활용한 무산 광산
지표 변위 분석

추용재

강원대학교 대학원

지구물리학과

2024년 2월

이훈열 교수 지도
이학석사학위논문

PSInSAR 기법을 활용한 무산 광산
지표 변위 분석

Analysis of Surface Displacement
of the Musan mine using PSInSAR

강원대학교 대학원

지구물리학과

추용재

추용재의 석사 학위논문을
합격으로 판정함

2023년 12월

심사위원장 한 향 선 인

위 원 이 훈 열 인

위 원 이 창 욱 인

PSInSAR 기법을 활용한 무산 광산 지표 변위 분석

추용재

강원대학교 대학원 지구물리학과

북한의 철광업은 전체 수출액의 약 13.8%를 차지할 만큼 중요한 산업 분야 중 하나이다. 그러나, 북한은 광업 인프라에 대한 투자가 미비하며 이는 생산성 부진 또는 사고 대처 미흡 등의 영향을 미칠 수 있다. 그렇기에 북한 지역 광산 자원에 대한 모니터링과 지속적인 연구의 중요성은 상당할 것으로 사료된다. 이 연구에서는 북한 최대 규모의 노천 철광산인 무산 광산을 대상으로 자원 이동량을 추정 및 지표 변위를 산출하여 광산의 시계열 지표 활동을 원격탐사 기법을 통해 다양하게 분석하고자 한다.

이 논문의 연구 방향은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째, 다중 시기 고도 정보를 활용해 무산 광산의 개발단계부터 최근 시점까지의 철광석 생산량과 폐석 적치량을 추정한다. 둘째, PSInSAR 기법을 이용해 무산 광산의 시계열 지표 변위를 산출한다. 그리고 최종적으로 두 결과를 연계하여 적치량과 지반 침하량 사이의 정량적인 관계에 대한 토의를 하고자 한다.

먼저 지반 침하를 관찰하기 전에, 채광 및 적치 활동이 발생한 지역을 특정하고 자원 이동량을 추정하고자 하였다. 무산 광산은 접근이 제한되어 현장 자료가 매우 부족하다. 따라서 본 연구에서는 Shuttle Radar Topography Mission 1 sec HGT (SRTM) 및 Copernicus 30m global DEM 두 가지 InSAR DEM을 사용하여 2000년부터 2015년까지의 고도 정보를 수집하였다. 단, 무산 광산은 1935년부터 본격적으로 개발이 시작되어 해당 자료만으로는 충분한 분석이 수행되기 어려울 것으로 판단하였다. 따라서 1918년에 제작된 조선지형도를 디지털화하여 DEM화 하였다. 결과적으로 약 100년 간의 고도 정보를 획득하였고 채광량과 적치량을 추정하였다. 무산 광산에서는 개발 초기부터 약 13억 7천만 ton의 철광석이 채광되었고, 약 10억 6천만 ton의 폐석이 적치된 것으로 나타났다.

2017년부터 2021년까지 약 5년 간의 Sentinel-1 SAR 위성 영상을 수집하여 PSInSAR를 수행하였다. 그 과정에서 지표 변위를 분석하기에 충분한 양의 PS를 획득하기 위해 InSAR stack size의 시간적 범위를 1년씩 분할한 Time Segmented PSInSAR (TS-PSInSAR)를 도입하였고, 5년 분량의 PSInSAR보다 약 8배 가량 많은 양의 PS를 획득하였다. Line of Sight (LOS)방향으로 획득된 변위를 수직방향 및 동~서방향의 수평 변위로 변환하여 분석을 수행하였다. 5년 간 획득한 무산 광산의 누적 변위는 동쪽 적치장에서 최대 약 730 mm로 연구지역 중 가장 큰 수준의 수직 침하량을 나타낸다.

PSInSAR를 통해 도출된 2차원 변위와 다중시기 고도 변화량을 종합적으로 분석한 결과, 수직 변위의 크기는 폐석 적치량과 폐석이 적치된 시기 등 다양한 요인에 영향을 받는 것으로 추정된다. 폐석이 많이 쌓일수록 수직 변위가 크게 발생하며, 폐석이 적치된 지 오래 지날수록 지반이 안정화되어 변위가 약화되는 추세를 보인다. 수평 변위의 방향은 폐석 적치 양상에 따라 달라진다. 과거에 계곡이었던 지역에 폐석을 매립한 경우, 수평 변위의 방향은 계곡의 중심부를 향한다. 반면, 자연 사면위에 폐석을 쌓은 경우 수평 변위는 해당 사면의 방향을 따르는 경향이 있으며, 수직축에 대한 변위벡터의 각도는 시간이 지날수록 안식각을 따르는 것으로 보인다.

핵심주제어

SAR, PSInSAR, DEM, 변화 탐지, 노천 광산, 지표 변위, 사면 안정성

감사의 말

이 논문은 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다.

목 차

I. 서론	1
II. 연구자료	4
1. 연구지역	4
2. Sentinel-1A/B SAR	5
3. Copernicus DEM	6
4. SRTM DEM	7
5. 조선지형도	8
III. 연구방법	10
1. 조선지형도 디지털화 및 DEM화	10
2. DEM change detection을 이용한 자원 이동량 추정	11
3. PSInSAR	12
1) Time Segmented PSInSAR	13
2) 2차원 지표 변위 도출	14
IV. 연구결과	16
1. 무산광산 자원 이동량 추정	16
1) 고도 변화량 산출 결과	19
2) 체적 및 질량 변화량 추정	20
2. PSInSAR 결과	22
3. TS-PSInSAR 및 2차원 변위 분석	28
1) 동쪽 적치장 결과 분석	32
2) 북쪽 적치장 결과 분석	35
3) 서쪽 적치장 결과 분석	37
4) 적치량과 지표 변위 간 정량적 관계 분석	42
V. 결론	44
□ 참고문헌	46
□ Abstract	50

그림 목 차

Fig. 1. The location (left) and the entire view (right) of the Musan mine. ...	4
Fig. 2. The historical topographic map of Hoeryeong, 1:200,000 scale with 50 m contours (modified from Chu and Lee, 2023).	9
Fig. 3. Digital Elevation Models used in this study. (a) The Copernicus DEM. (b) The SRTM DEM (c) 1918 DEM derived from the historical topography map (modified from Chu and Lee, 2023).	17
Fig. 4. DEM change results by period of Musam mine (modified from Chu and Lee, 2023).	18
Fig. 5. Results of the PSInSAR for 5 years.	23
Fig. 6. The time series displacement of the PSs marked on Fig. 5.	24
Fig. 7. Cumulative displacement for each orbit of the PS shown in Fig. 5. The blue dotted line is the initial result of PSInSAR, and the red dotted line is the manual phase unwrapping result.	26
Fig. 8. PSInSAR results for the PSs shown in Fig. 5. The unwrap_time_win parameter was varied, including settings of 48 (the gray one), 24 (initial result, the blue one), 12 (the green one), and 6 days (the purple one), along with the manual phase unwrapping result. ...	27
Fig. 9. TS-PSInSAR results for each orbit by year.	30
Fig. 10. TS-PSInSAR displacement rate map of each orbit, integrating the position of PS for each orbit.	31
Fig. 11. Comparison between the results of manual phase unwrapping and	

TS-PSInSAR. 31

Fig. 12. Converted TS-PSInSAR results for the east storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction. 33

Fig. 13. Google Earth optical satellite images of the east storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 12. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows. 34

Fig. 14. Converted TS-PSInSAR results for the north storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction. 35

Fig. 15. Google Earth optical satellite images of the north storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 14. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows. 36

Fig. 16. Converted TS-PSInSAR results for the north part of the west storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction. 38

Fig. 17. Google Earth optical satellite images of the north part of the west storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 16. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows. 39

Fig. 18. Converted TS-PSInSAR results for the south part of the west storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction. 40

Fig. 19. Google Earth optical satellite images of the north part of the west storage

area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 14. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows.

..... 41

Fig. 20. Correlation between waste rock pile thickness and surface displacement.

..... 43

I. 서론

노천 광산은 광체가 지표면에 드러나있는 광산을 의미하며 대규모 발파, 대형 장비 운용이 가능하여 효율적인 채굴이 가능하다. 더불어 지상에서 작업하는 만큼 지하 채굴 방식에 비해 산소 부족, 유독 가스 중독 등과 같은 위험에서 상대적으로 자유롭다는 장점이 있다(Lee *et al.*, 2008; Sari *et al.*, 2014; Adushkin *et al.*, 2020; Alititi *et al.*, 2021). 한편, 노천 광업으로 인해 발생하는 문제점은 오랜 기간 지적되어왔다. 예를 들어, 지표 채굴로 인해 사면 안정성이 저하되거나, 작업 과정에서 생기는 오수, 분진 등으로 인한 환경 문제가 있다. 또한, 광체를 덮고있는 표토 혹은 폐석을 적치함으로써 발생할 가능성이 있는 지반 침하 문제는 곧 안전사고로 이어질 수 있으며, 인적 및 물적 자원에 심각한 피해를 미칠 가능성 있기에 지속적이고 체계적인 모니터링을 통한 대응 마련이 중요하다(Sjöberg, 1996; Shu *et al.*, 2001; Monjezi *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2015; Yoon *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022). 또한 북한 자원에 대한 연구는 장기적으로 한반도의 경제적 상생 혹은 통일 편익 증진 등 긍정적인 영향을 불러올 수 있다(Bae *et al.*, 2015; Park and Joung, 2017; Chu and Lee, 2023).

북한의 대표적인 노천 광산인 무산 광산은 세계적인 규모의 대형 노천 철광산이다(Koh *et al.*, 2013). 북한의 경우 전체 수출액 중 철광석 수출에 의존이 높다(Chung, 2019). 하지만, 북한은 광업 인프라에 대한 투자가 부족하며 장비 노후화 및 현대화가 미비한 것으로 알려져있다(Kim *et al.*, 2021). 적절한 대비 없이 무분별하게 개발을 이어나가면 향후 광산 자원 개발에 위협이 될 수 있을 것으로 판단된다. 이는 북한 지역을 대상으로 하는 자원 개발 연구의 당위성을 제공한다.

한편, 북한은 접근이 불가능하며 공개된 자료가 매우 제한적이다. 그렇기에 북한 지역에 대한 연구는 자료의 양적 및 질적 측면에서 불리할 수 있으며, 전통적인 현장조사 방식의 적용이 어렵다. 최근 발전된 인공위성 원격 탐사 기술을 통한 지표 및 자원 분석은 상당한 이점을 가진다. 원격탐사 자료는 넓은 범위의 면적에 대해 긴 기간 동안의 지표 변화를 높은 정확도로 획득할 수 있다. 더불어, 현장조사가 불가능한 험준한 지역이나 사회적 문제로 개발 및 접근이 제한된 지역을 대상으로도 연구가 가능하다.

이에 본 연구에서는 시계열 합성구경레이다(synthetic aperture radar, SAR) 영상 및 글로벌 interferometric SAR (InSAR) 수치지형모델(digital elevation model, DEM) 등을 이용하여 광산 활동을 분석하고자한다.

광산 활동은 두 가지 측면에 대해 정량적으로 산출하였다. 먼저, 광산 지역에서 채광 및 적치가 발생한 영역을 특정하고, 과거부터의 철광석 채광량과 폐석 적치량을 추정하였다. 북한 지역에 대해 가용한 글로벌 InSAR DEM은 Shuttle Radar Topography Mission 1 sec HGT (SRTM) DEM과 Copernicus 30 m global DEM이다. 그러나, 무산 광산은 1935년부터 본격적으로 개발이 진행되어 왔기에 2000년대에 제작된 두 DEM만으로는 무산 광산의 자원 이동량에 대해 토의하기에 충분하지 않을 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구에서는 DEM 외에 추가적인 지형정보를 확보하기 위해 1918년에 제작된 제3차 조선지형도를 활용하기로 했다(Chu and Lee, 2023). 종이 지도를 DEM화한 후, 현재 시점의 InSAR DEM과의 변화를 탐지하여 약 백 년 간의 무산 광산의 채광량 및 적치량을 정량적으로 산출하였다.

채광장과 적치장을 구분한 후, Sentinel-1A/B SAR 위성 영상에 PSInSAR 기법을 적용해 적치장을 대상으로 2017년 초부터 2021년 말까지 발생한 시계열 지표 변위를 산출하였다. 이 과정에서, 5년이라는 긴 기간 동안의 자료처리로 인한 여러 문제를 해결하기 위한 시도가 있었다. 예를 들어, 긴 시계열 범위는 시간적인 역상관(decorrelation)을 유발하며 이로 인해 분석하기에 충분하지 않은 양의 PS를 산출한다. 적은 양의 PS는 공간적인 연속성을 저하시켜 절대위상복원(phase unwrapping) 오류를 일으킨다. 결과적으로, 본 연구에서는 양질의 PS를 많이 산출시켜 PSInSAR 결과의 전반적인 품질을 향상시키고자 InSAR stack의 시간 범위를 각 1년 단위로 분할한 time segmented PSInSAR (TS-PSInSAR)를 도입하였다(Moon and Lee, 2022). TS-PSInSAR를 통해 각 궤도별 LOS 방향으로 산출된 변위는 수직방향 및 동~서 방향의 수평 변위로 변환하여 앞서 획득한 폐석 적치량과 함께 분석하였다.

본 논문의 2장에서는 연구 지역인 무산 광산에 대한 소개와 연구에 사용된 Sentinel-1A/B SAR 영상 및 DEM과 조선지형도 등 연구의 전반적인 자료를 소개한다. 3장에서는 연구 방법을 조선 지형도 DEM화 과정, DEM change detection 및 채광/적치량 산출, 그리고 TS-PSInSAR 및 후처리 순으로 설명한다. 4장에서는 연구 결과

를 제시하며 각 결과들을 연계 해석한 토의를 서술한다. 마지막으로, 이 연구의 최종 결론을 5장에서 이야기하며 본 논문을 마무리한다.

II. 연구자료

1. 연구지역

연구지역은 북한 함경북도 무산군 무산읍 창렬로동자구에 위치한 무산광산이다(위도 42° 14' 05" 경도 129° 15' 21"). 무산 광산은 노천 철광산으로 자철광 추정 매장량은 약 25억 ton에 달한다(Bae *et al.*, 2015). 무산 광산은 무산광산연합기업소 소속이며 북한 내에서 생산되는 철광석의 약 70%가 이 곳에 집중될 만큼 최대 철광석 생산지이다(Park and Joung, 2017). Fig. 1은 무산 광산의 전경 및 위치를 보여준다. 그림에서 붉은 색 박스로 표시된 영역은 수집한 SAR 위성 영상의 커버 영역이며, 무산 광산의 위치는 흰색 점으로 표시되어있다. 무산 광산의 넓이는 약 6.7 km²로 나타나며, 중앙에 채광장이 위치하며 사방을 적치장이 둘러싼다.

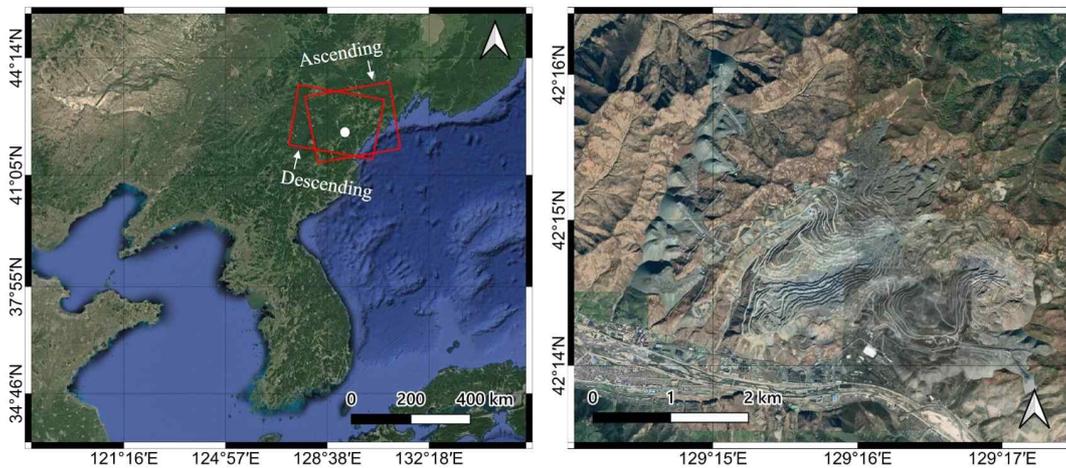


Fig. 1. The location (left) and the entire view (right) of the Musan mine.

2. Sentinel-1A/B SAR

Sentinel-1A/B SAR 위성 영상은 유럽우주국(European Space Agency; ESA)에서 운용하는 쌍둥이 위성이다. Sentinel-1A와 Sentinel-1B 위성은 각각 2014년 4월, 2016년 4월에 각각 발사되었으며, 동일한 궤도를 공유하면서 6일의 반복 주기로 동일한 지역을 관측한다. Sentinel-1A/B 위성은 중심 주파수가 약 5.4 GHz인 C-band SAR 센서를 탑재하고 있고, 태양 동기 궤도를 돌며 고도 약 693 km에서 SAR 영상을 획득한다. SAR 영상은 능동 마이크로파를 이용하므로써 기상 조건 및 주야에 관계 없이 균일한 품질의 영상을 획득할 수 있다. SAR 영상은 광학 위성과는 달리 위상(phase)에 대한 자료가 서로 간섭할 수 있는 형태로 기록된다. 동일한 지역을 시간차를 두고 촬영한 두 장 이상의 SAR 영상 간의 위상차를 이용하는 InSAR 기법은 지표에서 발생하는 미세한 움직임을 연간 수 센티미터의 정밀도로 획득이 가능하다. Sentinel-1은 기선거리(perpendicular baseline)을 일정하게 유지하도록 궤도의 제어가 이루어지며 이를 통해 원활한 InSAR 프로세싱이 가능하다(Torres *et al.*, 2012).

Sentinel-1A/B 위성의 관측모드는 4가지로 분류된다. 5×5 m의 공간해상도를 가지며 작은 세부 사항을 관찰하는 데 사용되는 Strip Map 모드, 20×40 m의 공간해상도를 가지며 넓은 지역을 커버하는데 주로 사용되는 Extra Wide 모드, 5×5 m의 해상도를 가지며 주로 바다 및 해양 모니터링에 사용되는 Wave 모드, 그리고 5×20 m의 공간해상도를 가지며 버스트 동기화를 통해 간섭계의 구현을 할 수 있는 육상 감시용 Interferometric Wide swath (IW) 모드가 있다(Torres *et al.*, 2012). 본 연구에서는 PSInSAR 수행을 위해 IW모드로 촬영한 single look complex(SLC) 영상을 이용하였다. Sentinel-1A/B 위성 영상은 Alaska Satellite Facility(ASF, <https://search.asf.alaska.edu/#/>) 혹은 Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)에서 오픈소스로 획득할 수 있다. 자료는 ascending(Asc) 궤도에서 2017년 3월 10일부터 2021년 11월 20일까지 총 139장을, descending(Dsc) 궤도에서 2017년 3월 2일부터 2021년 11월 24일까지 총 142장을 획득하였다.

3. Copernicus DEM

Copernicus 30 m global DEM은 유럽연합(European Union)에서 주도하는 Copernicus 프로그램의 일부로써, 지구표면의 고도정보를 30 m의 공간해상도로 표현한 수치표면모델이다. DEM은 지표면의 표고 정보를 수치화하여 표현한 래스터 데이터로, 지형 분석, 수문 분석, 3차원 지표 시각화 등 다양한 분야에서 활용된다. 독일의 TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) 미션은 근접한 대형으로 비행하는 거의 동일한 두 개의 X-band 위성으로 구축된 SAR 간섭계로 구성된 지구 관측 레이더 임무이다. Copernicus DEM은 TanDEM-X 미션을 통해 2011년 1월부터 2015년 1월까지 수집된 자료를 이용하여 제작된 글로벌 DEM이다.

Copernicus DEM은 3가지 인스턴스를 포함한다. European Economic Area 10m (EEA-10)는 유럽 경제 지역을 커버하며 그 해상도는 10 m이다. global 30 m (GLO-30) 및 GLO-90은 전 세계를 커버하며, 해상도는 각각 30 m, 90 m이다. 본 연구에서는 GLO-30 인스턴스를 사용하였다. Copernicus DEM은 지리 좌표계를 사용하며 수평 데이터는 WGS84-G1150 (EPSG 4326)을, 수직 데이터는 EGM2008 (EPSG 3855)를 사용한다. Copernicus DEM의 절대 수직 해상도는 4 m 미만(90% 선형 오차)이며, 상대 수직 해상도는 2 m 미만(경사도 20% 이하) 혹은 4 m 미만(경사도 20% 초과)으로 알려져있다(AIRBUS, 2022).

4. SRTM DEM

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)은 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)과 미국 국가 지리 정보국(National Geospatial-Intelligence Agency; NGA)의 협업 프로젝트로, 남위 56°에서 북위 60° 사이의 준 글로벌 DEM을 획득하기 위해 수행되었다. SRTM DEM은 우주왕복선 Endeavor에 탑재된 C-band SAR 시스템을 통해 2000년 2월 11일부터 22일까지 총 12일 간 획득된 데이터로 제작된 InSAR DEM이다. SRTM DEM은 1-arc second(약 30 m) 및 3-arc seconds(약 90)의 공간해상도를 가지는 데이터를 오픈소스로 제공한다. Copernicus DEM과 더불어 오픈토포그래피 홈페이지(<https://opentopography.org/>)에서 제공받을 수 있다. 지리좌표계를 사용하며 수평 데이터는 WGS84, 수직 데이터는 Earth Gravitational Model 1996 (EGM96)을 사용한다(Earth Resources Observation and Science Center, 2018).

5. 조선지형도

한반도의 근대지형도는 청일전쟁 이후 일본에 의해 제작되었다. 조선지형도는 시기별로 제1차부터 제3차지형도로 구분된다. 제1차지형도는 한일합병 이전, 1894년부터 1906년까지 일본군에 의해 비밀리에 측량된 지형도이다. 제2차지형도는 한일합병 이후 제1차지형도를 수정 및 보완하여 제작되었다. 단, 2차지형도는 한반도 남부 일부 지역에 국한된다. 제3차지형도는 삼각측량 및 지형측량 방법을 통해 측도된 지형도이다. 3차지형도는 1914년부터 1918년까지 측도되어 1918년까지 제판되었으며, 이후 일부 기밀지역에 한해 1926년까지 교통도 및 철도보입도 등으로 간행되었다. 총 도엽은 727도엽이며 주요 지역에 따라 1:25,000 등의 대축척지도로, 전체적으로 1:200,000 등의 소축척 지도로 제작되기도 하였다(Park, 2019).

본 연구에서 수집한 제3차지형도는 국토지리정보원 산하 국토정보플랫폼(<https://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do>) 및 국립중앙박물관 소장 조선총독부박물관 문서(<https://www.museum.go.kr/modern-history/main.do>)를 통해 획득하였다. 전자의 경우 무산 도엽 및 진화동 도엽에 대해 1:50,000 축척의 지형도를 획득하였다. 단, 이는 연구 지역인 무산 광산의 일부 지역에 한해서만 등고선 정보가 남아있으며(진화동 도엽), 나머지 지역에 대해서는 교통도의 형태로만 남아있었다. 한편, 후자는 회령 도엽의 1:200,000 축척의 지형도를 획득할 수 있었다. 이 지형도는 등고선 간격이 50 m로 정밀도가 떨어지지만, 등고선 자료가 온전히 보존되어 있어 이를 이용하기로 하였다. Fig. 2는 국립중앙박물관에서 획득한 1:200,000 축척의 조선 제3차지형도 회령 도엽의 모습을 보여준다. 도엽에서 붉은색으로 표시된 지역은 연구 지역인 무산 광산의 과거 지형도이며, 이를 확대하여 하단에 도시하였다.

무산 광산의 개발 초기 단계부터의 자원 이동량을 추정하기 위해 앞서 소개한 글로벌 DEM 외에 추가적으로 해당 지형도를 디지털화하여 사용하였다(Chu and Lee, 2023).

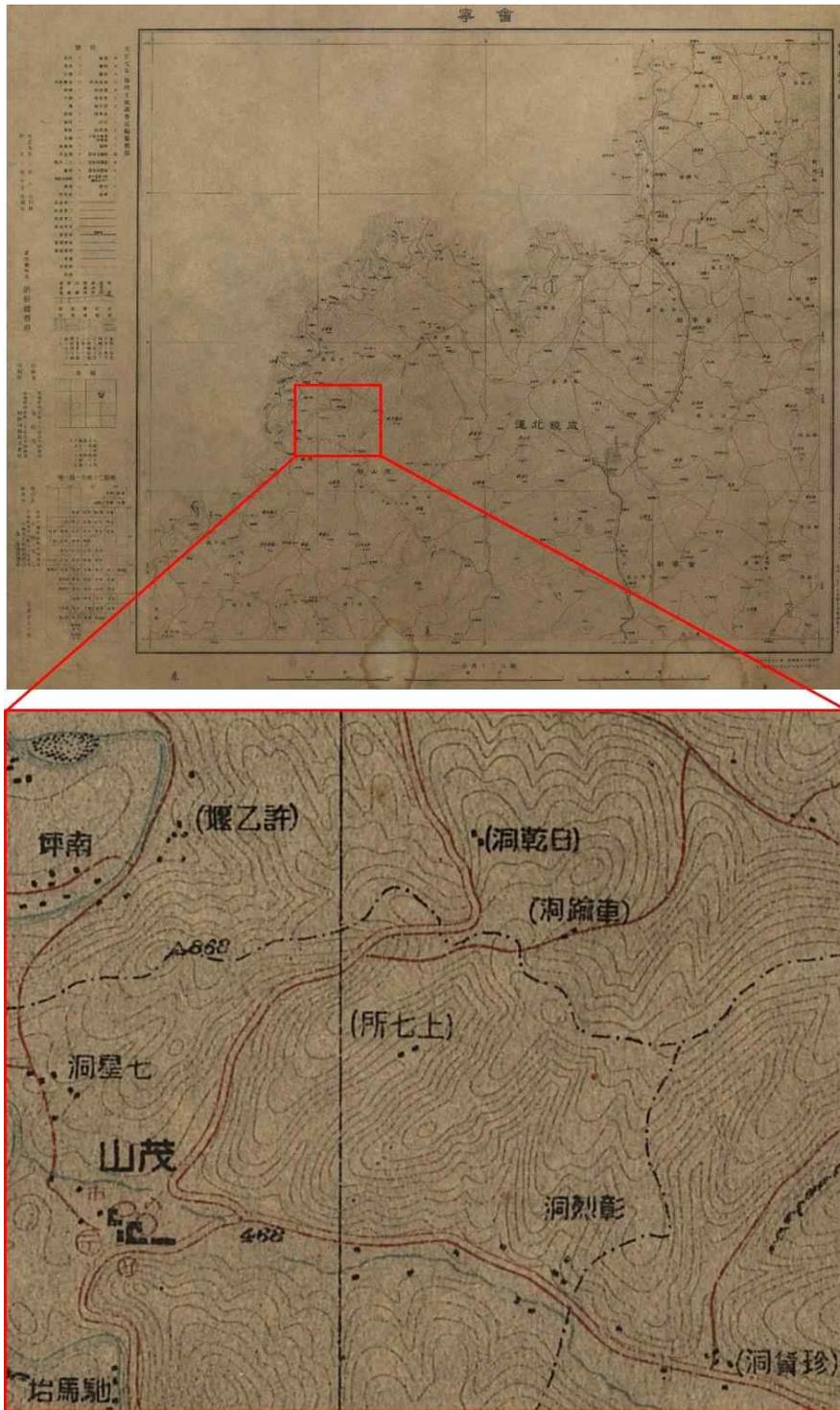


Fig. 2. The historical topographic map of Hoeryeong, 1:200,000 scale with 50 m contours (modified from Chu and Lee, 2023).

Ⅲ. 연구방법

1. 조선지형도 디지털라이징 및 DEM화

적치장에서 발생하는 지반 침하를 관찰하기에 앞서, 1918년부터(조선지형도) 2015년까지(Copernicus DEM) 발생한 자원 이동량을 정량적으로 추정하고자 하였다. 광산지역에서의 채광장과 적치장을 물리적으로 구분하고, 채광된 철광석의 양과 폐석 적치량을 산출하여 종합적으로 해석하기 위함이다. 먼저, 현대의 두 가지 글로벌 DEM과의 공간 분석을 용이하게 처리하기 위해 이미지 형태의 조선지형도를 디지털화하는 과정을 거쳤다(Chu and Lee, 2023).

국립중앙박물관에서 획득한 회령 도엽 이미지 파일을 EPSG:3857 (WGS84/Pseudo-Mercator) 좌표계로 투영하여 지오코딩하였다. 또한 지오코딩 오차를 보정하기 위해 Google Earth 광학 위성 영상과 비교해 능선 및 계곡선의 변화가 적은 15개의 지상기준점(ground control point; GCP)를 설정하여 georeferencing을 다시 했다. 정밀도 검증을 위해 회령 도엽 이미지 외에, 국토정보플랫폼의 1:50,000 지형도를 함께 지오코딩한 후 두 영상을 비교하여 추가로 GCP를 설정하여 보정을 수행하였다. 지오코딩된 조선지형도를 디지털라이징하여 등고선을 벡터 레이어로 추출하였다. 벡터 레이어로 획득한 등고선에 부정 삼각망 네트워크 보간을 수행하여 최종적으로 1918년의 추정 DEM을 획득하였다. 추가적으로, 해당 자료 처리 및 이후로 진행하는 모든 래스터 처리는 Quantum Geographic Information System (QGIS) 소프트웨어를 이용하여 수행하였다.

2. DEM change detection을 이용한 자원 이동량 추정

세 가지 시점의 DEM을 획득한 후 인접한 시점의 DEM 간의 래스터 연산을 통해 고도 변화량을 산출하였다. 1918년부터 2015년까지 고도 변화가 발생한 지역 및 Google Earth 광학 위성 영상에서 육안으로 식별한 사면의 모양을 토대로 적치장과 채광장을 각각 구별하여 폴리곤(polygon)으로 추출하였다.

QGIS 소프트웨어의 플러그인 중 하나인 volume calculation tool을 이용해 각 시기 별 채광 및 적치로 인해 발생한 체적 변화량을 산출하였으며, 체적 변화량에 암석의 밀도와 공극율을 통해 질량으로 환산하였다. 환산 식은 다음 식(1) 및 (2)을 따른다.

$$M_{mine} = V_{mine} \times \rho_{mine} \quad (1)$$

$$M_{dump} = V_{dump} \times \rho_{crust} \times (1-n) \quad (2)$$

위 식에서 M_{mine} 과 M_{dump} 는 각각 질량으로 환산한 채광량 및 적치량을 나타낸다. 연구지역인 무산광산은 중국 북동부의 안산층과 암종이 같은 것으로 간주된다. 따라서 안산층 암종의 평균 밀도를 통해 무산 광산의 평균 밀도(ρ_{mine})를 약 3.4 g/cm³로 추정하였다(Bae *et al.*, 2015; Chu and Lee., 2023). 체적 변화량(V_{mine})과 밀도 추정치를 이용해 최종적으로 채광량을 산출하였다. 한편, 유용한 광물을 추출하고 남은 암석은 표토와 함께 적치되어 버려진다. 이때 적치되는 폐석 더미의 밀도는 함철 광물보다는 밀도가 낮을 것으로 추정되기에 본 연구에서는 적치량 산정 과정에서 무산 일대 암종 평균 밀도 대신 평균 지각 밀도(ρ_{crust})인 2.7 g/cm³를 적용하였다. 해당 밀도에 적치장에서 산출된 체적 변화량(V_{dump})과 함께, 폐석 더미에 압착이 가해지지 않았다는 가정 하에 공극율(n)도 고려하였다. 단, 북한의 경우, 공개된 자료가 극히 제한적이기 때문에 본 연구에서는 공극율을 30%($n=0.3$)로 설정하였다(Bae *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2022; Chu and Lee, 2023).

3. PSInSAR

본 연구에서는 2017년 초부터 2021년 말까지 약 5년간의 시계열 지표 누적 변위를 PSInSAR를 통해 탐지하고자 한다. PSInSAR는 픽셀 내에서 안정된 레이더 후방산란 신호를 가지는 고정산란체(persistent scatterer; PS)를 이용해 지표의 시계열 변위를 밀리미터의 정확도로 탐지하는 기법이다(Ferretti *et al.*, 2001; Hooper *et al.*, 2004). PS로 선정될 수 있는 지표의 산란체로는 교량, 댐, 건물 등과 같은 인공구조물 등이 있다. 적치가 완료된 광산 지역의 폐석 더미는 식생이 거의 없는 표면을 이루어 안정된 PS의 산출이 용이할 것으로 보인다(Lee *et al.*, 2022). 본 연구에서 수행한 PSInSAR는 Stanford method for persistent scatterer (StaMPS) 패키지를 통해 처리되었다(Hooper *et al.*, 2010).

수집한 데이터는 Asc 궤도에서 139장, Dsc 궤도에서 141장으로 상당히 긴 기간 동안의 시계열 변위를 탐지한다. 이러한 긴 기간 동안의 PSInSAR의 수행은 긴 기간 동안의 지표 변위 패턴을 관측하기 유용한 장점이 있는 반면, 시간적인 역상관을 유발할 수 있다. 이는 곧, StaMPS 패키지를 통한 자료처리 단계에서 PS 후보 선정에 이용되는 진폭 분산 지수를 높이기 때문에 충분한 양의 PS가 산출되지 않는 단점이 있다. 또한 적은 양의 PS는 공간적인 연속성을 저하시켜 절대위상복원 성능을 저하시킬 가능성이 있다. 본 연구에서는 우선 5년간 획득한 139장(Asc), 141장(Dsc)의 영상을 모두 이용해 PSInSAR를 수행하였다. 그러나, 분석하기에 충분한 양의 PS를 획득하지 못했다. 더불어, 변위를 나타내는 PS에서는 심각한 절대위상복원 오류가 발생하였다. 이에, 본 연구에서는 절대위상복원 오류를 다음 2가지 방법을 통해 보정하였다.

InSAR는 Line of Sight (LOS) 방향으로 획득한 거리에 대한 변위 정보를 2π 로 wrap한 형태로 기록한다. 하나의 fringe는 $-\pi \sim \pi$ 의 범위 내에서 파장의 절반 (Sentinel-1의 경우 27.78 mm)에 해당하는 변위 정보를 나타낸다. LOS 방향으로의 실제 변위를 획득하기 위해서는 wrapped phase를 2π 로 위상을 해제하여 연결시키는 과정이 필요하다. 이 과정에서 절대위상복원 오류는 대체로 인접한 시계열 변위에 대해 2π , 즉, 27.78 mm의 간격으로 발생한다. 첫 번째 방법은 27.78 mm 간격으로 발생한 절대위상복원 오류를 수동으로 연결해주는 것이다. 단, 이 방법은 물리적인 한계가 있기에 해당 방법으로 획득한 누적 변위는 5년 간 발생한 변위 패턴을 간략히 확인하는 용도와 더불어, 다음 장에서 소개할 TS-PSInSAR의 검증 자료로 활용하였다.

두 번째 방법은 자료처리 단계에서 절대위상복원 오류를 완화하는 방법이다. StaMPS 패키지에서 unwrap_time_win은 자료처리 과정 중 위상복원을 수행하는 step 6 단계에 사용되는 파라미터이다. 이 파라미터는 절대위상복원 과정에서 시간 영역 필터링에 관여하는 주파수의 범위를 지정하는 역할을 한다. 주파수 영역에서

phase unwrapping 필터는 저주파 통과 필터(low-pass filter)이며 그 임계값은 $1/\text{unwrap_time_win}$ 로 결정된다. 즉, unwrap_time_win 파라미터가 클수록 고주파 대역의 변위 정보를 포함해 더욱 정밀한 변위 해석이 가능하다. 하지만, 고주파 대역의 성분은 불확실성을 포함할 수 있다. 반면, 파라미터가 클수록 저주파 대역의 변위 정보가 강조되어 노이즈 및 잡음 요인을 줄여 변위의 안정성을 확보할 수 있다(Ferretti *et al.*, 2001). 이 연구에서는 동일한 조건에서 unwrap_time_win 의 크기를 조절하며 PSInSAR를 반복 수행하며, 시간 영역에서의 절대위상복원 성능을 비교하였다. 이를 통해 다음 장에서 소개한 TS-PSInSAR를 위한 최적의 파라미터를 탐색하고자 하였다.

1) Time Segmented PSInSAR

전술하였듯 5년이라는 긴 기간 동안의 PSInSAR 자료처리는 PS의 불충분으로 인해 분석하기에 어려움이 있으며, 적은 수의 PS는 3차원 절대위상복원 성능을 저하시킨다. 결과적으로, PSInSAR의 질적·양적 품질이 매우 낮기 때문에 본 연구에서는 근본적으로 PS를 충분히 산출하여 고품질의 결과를 획득하고자 InSAR stack의 시간적 범위를 분할하는 TS-PSInSAR를 도입하여 5년 동안의 시계열 지표 변위를 다시 산출하였다.

TS-PSInSAR는 Moon *et al.*(2022)에 의해 제안된 기법이다. Moon *et al.*은 남극의 빙붕 등과 같이 매우 빠른 표면 변위를 나타내는 지역에 대해 하나의 InSAR stack에서 발생하는 최대 변위가 SAR 영상의 경사거리 해상도의 $1/8$ 미만이 되도록 시간 범위를 설정해야 한다고 제시하였다. 본 연구에서 사용한 Sentinel-1 SAR 영상의 경사거리 해상도는 약 2.4 m이므로 하나의 InSAR stack에서 발생하는 최대 변위는 300 mm 이내로 제한되어야 한다. 앞서 5년 분량의 PSInSAR에서 획득한 지표 변위를 분석한 결과, 무산 광산의 특정 지역에서는 변위가 매우 빠른 속도로 발생하기에 본 연구에서는 각 시간 간격을 약 1년으로 분할하여 TS-PSInSAR를 수행하였다.

최종적으로 각 궤도별로 5년 동안의 시계열 지표 변위가 1년 단위로 획득되었다. 하지만 각 세그먼트 별로 산출된 PS가 공간적으로 일치하지 않기에 하나의 점 표적에 대한 누적 변위를 관측하기에는 무리가 있다. 따라서 각 기간별로 획득한 시계열 누적 변위를 연결하는 과정에서 PS의 통합을 수행하였다. 가장 최근 시점인 2021년의 TS-PSInSAR의 결과(n)로 도출된 PS의 위치를 기준으로 반경 50 m 이내의 가장 가까운 지점의 직전 기간(n-1)의 PS의 변위를 연결하였다. 이 때, 인접한 기간의 TS-PSInSAR 결과에 대해 50 m 이내에 이웃한 PS가 없는 PS는 제거하였다. 이를 통해 각 궤도별로 5년 간의 누적 변위 정보를 포함하는 PS를 획득하였다. 추가적으로, 다음 절에서 설명할 2차원 지표 변위를 통해 Asc 궤도와 Dsc 궤도의 PS의 공간

적인 위치를 일치시킬 필요가 있었다. 따라서 Asc 궤도의 PS를 기준으로 동일한 방법으로 Dsc 궤도의 가장 가까이(최대 반경 50 m 이내) 위치한 PS의 위치를 이동시켜주었다.

2) 2차원 지표 변위 도출

이전 절까지의 자료 처리를 통해 5년 간의 Asc 및 Dsc 궤도의 누적 변위를 하나의 PS로 획득하였다. 단일 궤도의 PSInSAR를 통해 획득된 변위는 LOS 방향으로의 변위를 나타낸다. 두 방향의 궤도에서 획득한 PSInSAR의 LOS 방향 변위는 일련의 연산을 통해 수직 및 동~서방향의 수평 변위로 근사할 수 있다(Klemm *et al.*, 2010; Fuhrmann and Garthwaite, 2019). 위성으로부터 지상의 표적까지의 단일 LOS 방향 변위 벡터 \hat{i} 은 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{i} = (-\sin\theta \cos\alpha, \sin\theta \sin\alpha, \cos\theta) \quad (3)$$

이 때, θ 는 표적 지점에 대한 위성의 incidence angle을, α 는 위성의 진행 방향 각도를 북쪽에서부터 시계방향으로 잰 각을 의미한다. 지표의 실제 변위 벡터 $\vec{d} = (d_x, d_y, d_z)$ 가 주어졌을 때, LOS 방향으로의 변위 D_{LOS} 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$D_{LOS} = \hat{i} \cdot \vec{d} = (-\sin\theta \cos\alpha \quad \sin\theta \sin\alpha \quad \cos\theta) \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

양 궤도(Asc, Dsc)를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} D_{Asc} \\ D_{Dsc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_{Asc} \cos\alpha_{Asc} & \sin\theta_{Asc} \sin\alpha_{Asc} & \cos\theta_{Asc} \\ -\sin\theta_{Dsc} \cos\alpha_{Dsc} & \sin\theta_{Dsc} \sin\alpha_{Dsc} & \cos\theta_{Dsc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 D_{asc} 및 D_{dsc} 은 TS-PSInSAR를 통해 획득할 수 있으며, θ_{Asc} 과 θ_{Dsc} , 그리고 α_{Asc} 과 α_{Dsc} 은 Sentinel-1 위성의 헤더 정보에서 확인할 수 있다. 알고자 하는 변수는 지표 변위 벡터의 각 요소(d_x, d_y, d_z) 세 가지이다. 한편, 식 (5)를 통해 계산할 수 있는 식은 두 개 뿐이므로, 이를 해결하기 위해 약간의 근사를 하고자 한다. 본 연구에서 사용된 Sentinel-1 위성의 경우 중위도 지역에서 위성의 진행방향각이 남-북선과 약 10° 내외의 차이가 난다. Asc 궤도에서의 진행방향각(α_{Asc})은 약 189° , Dsc 궤도에서의 진행방향각(α_{Dsc})은 약 350° 로 식 (5)의 $\sin\alpha$ 항이 거의 0에 가깝게 된다.

이를 이용해 식을 전개하였을 때, 두 번째 항인 d_y 에 대한 항목을 0으로 근사시켜 최종적으로 동~서 방향의 수평 변위 d_x 와 수직 방향 변위 d_z 를 획득할 수 있다. 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_{Asc} \cos\alpha_{Asc} & \cos\theta_{Asc} \\ -\sin\theta_{Dsc} \cos\alpha_{Dsc} & \cos\theta_{Dsc} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} D_{Asc} \\ D_{Dsc} \end{pmatrix} \quad (6)$$

위 식 (6)을 통해 각 PS별 2차원 변위를 획득한 후, 폐석 적치량과 연계하여 적치장의 발달 과정에 따른 수평 변위의 거동 양상 및 적치량과 침하량의 정량적인 관계를 종합적으로 분석하고자 한다.

IV. 연구결과

1. 무산광산 자원 이동량 추정

조선지형도를 DEM화 하고, SRTM 및 Copernicus 글로벌 DEM을 수집하여 1918년, 2000년, 그리고 2015년으로 총 세 가지 시점의 DEM을 획득하였다(Fig. 3). Fig. 4는 이들을 각 시기별로 인접한 DEM 간의 차분을 통해 고도 변화가 발생한 지역을 시기별·활동별로 매핑한 결과이다. 1918년 DEM부터 SRTM DEM까지의 기간인 1918~2000년을 제 1시기(P1), SRTM DEM부터 Copernicus DEM까지의 기간인 2000~2015년을 제 2시기(P2)로 구분하여 각 시기 별 DEM change를 계산하였다. 나중 시점의 DEM을 기준으로 먼저 시점의 DEM을 차분하면 고도가 상승한 지역은 적치가 발생한 것으로, 고도가 감소한 지역은 노천 채광이 발생한 지역으로 해석하였다. Fig. 4에서 각각의 시기의 DEM change 결과가 나타난다. 먼저 P1에서는 채광이 발생한 지역은 청록색(C)으로, 적치가 발생한 지역은 녹색(G)으로 표시되었다. P2의 경우 채광장은 자주색(M), 적치장은 붉은색(R)으로 표시하였다. 이후 두 레이어를 중첩시키면 각 시기별 및 활동별 결과를 한번에 알 수 있다. 두 시기를 관통하여 활동이 발생한 부분은 감산혼합에 의해 채광장은 파란색(B)으로, 적치장은 검은색(K)으로 나타난다. Fig. 4에서 채광장과 적치장을 명확히 구분하기 위해 DEM change 결과에 대해 ± 10 m 이내의 차이는 마스킹하여 표현하지 않았다. 추가적으로, DEM change detection을 통해 획득한 고도 변화 정보와 Google Earth 광학 위성 영상을 통해 육안으로 식별한 채광장과 적치장의 형태를 종합적으로 비교하여 채광장 및 적치장의 경계를 구분하여 폴리곤으로 디지털화 하였다.

한편, 조선 지형도와 SRTM DEM의 change 결과에서 광산 이외 지역에서의 고도 변화가 감지되었다. 무산군 일대는 광산 및 민가 지역을 제외하고는 대부분 산간지역으로, 고도 변화를 일으킬만한 메커니즘이 없다. 1985년부터 현재까지 무산군 일대의 Google Earth 광학 위성 영상을 확인한 결과, 뚜렷한 지표 활동이 감지되지 않았다. 이는 조선지형도의 등고선을 DEM화 하는 과정에서 발생한 오차로 판단하여 이에 대한 통계적인 보정을 수행하였다.

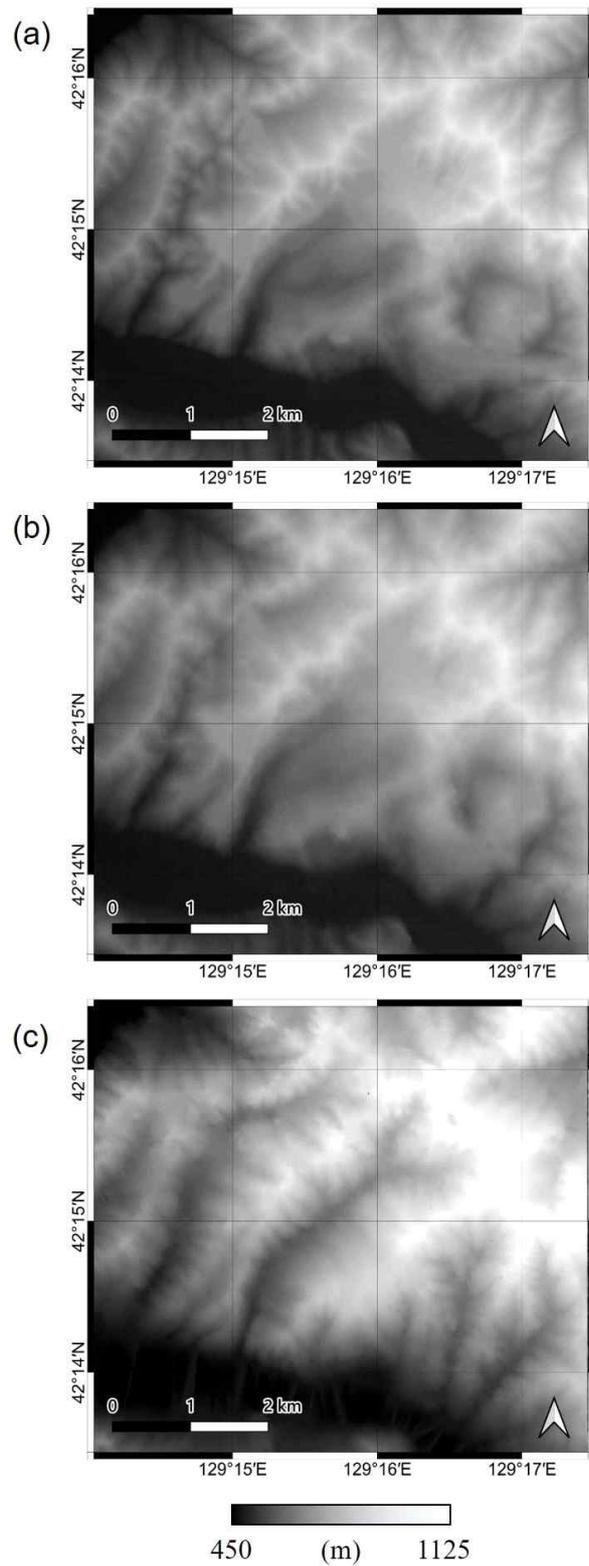


Fig. 3. Digital Elevation Models used in this study. (a) The Copernicus DEM. (b) The SRTM DEM (c) 1918 DEM derived from the historical topography map (modified from Chu and Lee, 2023).

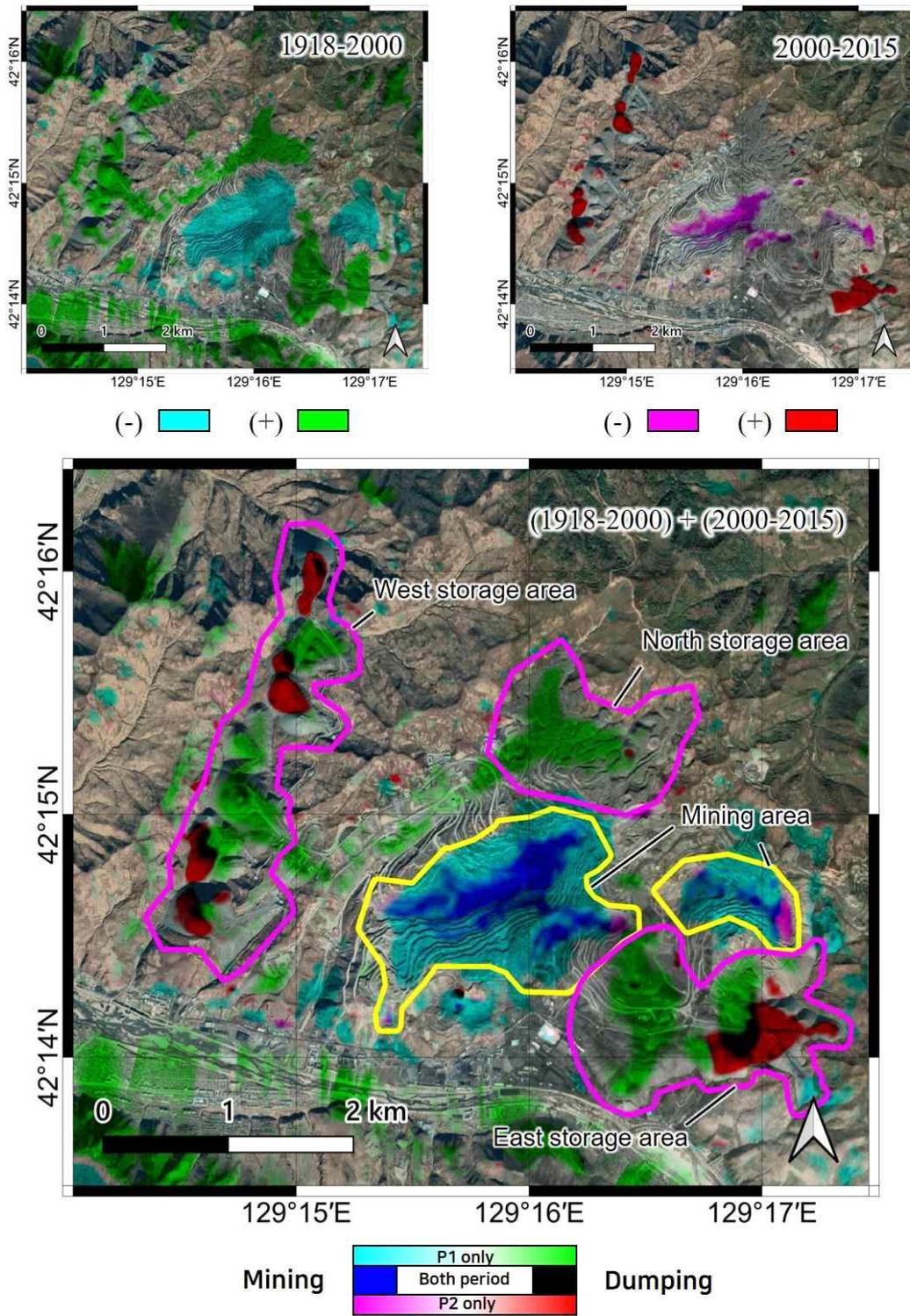


Fig. 4. DEM change results by period of Musam mine (modified from Chu and Lee, 2023).

P2 시기의 DEM change 결과에서 광산 지역 이외의 변화가 없는 지역에 대한 고도값의 평균을 계산하였다. 이 값은 SRTM 및 Copernicus DEM과 매우 유사하며 광산 이외 지역에서 고도 변화가 없음을 나타낸다. 이후, 해당 레이어와 조선지형도 DEM 간의 차이를 구해 동일한 픽셀들의 평균을 계산하였다. 이는 변화가 없는 지역에 대한 수직 오차를 의미하며 그 값은 약 48 m로 나타난다. 이는 조선지형도 자체에서 등고선 한 개 정도의 오차를 포함할 수 있음을 내포한다. 조선지형도 DEM의 전체 고도를 48 m만큼 전반적으로 낮추어 수직 오차를 보정하였다. 이를 통해 순수한 광산 활동에 의한 고도 변화만 남고 활동성이 없는 지역은 SRTM, Copernicus DEM과 비슷하게 나타나게 보정되었다.

1) 고도 변화량 산출 결과

DEM change 결과를 통해 무산광산의 적치장 세 군데와 채광장 두 군데를 구별하였다. 먼저, 광산 중심부의 채광장은 P1에서 최대 190m의 고도 감소가 나타나며, 가장자리부터 중앙으로 채굴해나간 것으로 보인다. 중앙 채광장의 중심부에는 P2에서도 약 34 m의 고도 감소가 나타나 2015년까지도 채광 활동이 있는 것으로 보인다. 중앙 채광장의 오른쪽으로 작은 규모의 채광장이 하나 더 위치한다. 해당 채광장에서는 P1에서 약 180 m, P2에서 약 30 m 가량의 고도 변화가 감지되었다.

중앙의 채광장을 기준으로 사방에 적치장이 분포하는 모습을 볼 수 있다. 본 연구에서는 위치에 따라 각각 서쪽, 북쪽, 동쪽 적치장으로 명명한다. 서쪽 적치장은 남북으로 긴 모양으로 형성된 적치장이다. 좁고 긴 지형적인 특성 때문에 이 절에서는 서쪽 적치장을 북쪽으로부터 세 부분으로 분할하여 분석한다. 먼저 서쪽적치장 북부는 P1에 약 120 m의 폐석이 적치되었다. 이후 P2에는 해당 사면의 남북쪽으로 각각 최대 90 m, 85 m의 폐석더미가 적치되어 있다. 최북단지역은 Google Earth 영상을 확인한 결과 2009년 이후 적치활동이 시작된 것으로 보인다. 서쪽 적치장의 중심부는 P1에 최대 130 m 가량의 고도 변화가 발생하였으며, 이후 추가적인 적치 활동은 없는 것으로 보인다. 이 지역은 중앙 채광장과 거리상 가장 가까운 곳에 위치하며, 이로 인해 해당 지역에서 가장 먼저 적치가 완료된 것으로 보이며 이후 북부로 활동이 이전된 것으로 추정된다. 서쪽 적치장의 남부는 2009년에 적치가 시작된 최북단지역을 제외하고, 서쪽 적치장 전체에서 가장 늦게 적치활동이 시작된 것으로 보인다. P1에 적치활동이 감지되기는 하였으나, Google Earth 위성에서 1985년도에 아직 적치가 시작되지 않은 자연 사면임을 확인하였다. P1과 P2 전체를 통틀어 최대 약 110 m의 폐석이 쌓인 것으로 보인다.

북쪽 적치장은 Google Earth 영상을 확인한 결과 1985년에 이미 적치가 끝났으며, 그 후에 추가적인 적치활동은 거의 없는 것으로 나타난다. 따라서 P1에 대해서만 최

대 120 m의 고도 변화가 감지되었다. 이 지역은 둘레 약 5 km의 분지에 폐석을 메워 넓고 평평하게 형성된 적치장이다. 세 가지 적치장 중 가장 먼저 적치가 일어난 것으로 추정된다.

동쪽 적치장은 동~서 방향으로 나란히 위치한 남~북 방향 계곡 위에 폐석이 메워진 것으로 보인다. 적치장에서 가까운 왼쪽 계곡에서 먼저 폐석이 적치되었으며 이 지역은 P1에서 최대 약 160 m의 고도 상승이 감지되었다. 오른쪽 계곡은 비교적 늦게 적치활동이 시작되었으며, 현재까지도 활동이 지속되고 있다. 특히, 동쪽 적치장의 최동부 지역은 2000년 이후부터 적치가 시작된 것이 확인되었다. 해당 지역은 P2에 최대 약 120 m 수준의 고도 상승이 발생하였다. 두 계곡 사이에 두 시기에 걸쳐 연속적으로 적치 활동이 발생한 부분이 존재한다. 이 지역에서는 P1과 P2에서 총 150 m 가량의 적치가 발생하였다. 이상의 결과를 이용해 다음 절에서 체적 변화량과 질량 변화량을 추정하고자 한다.

2) 체적 및 질량 변화량 추정

DEM change를 통해 획득한 고도 변화 값과 채광장 및 적치장 경계를 이용해 체적 변화량을 산출하고, 밀도와 공극률을 고려하여 질량 변화량을 추정하였다. 채광장 전체에서는 P1에서 약 344 km³, P2에서 약 60 km³의 체적이 변화하였다. 전체 기간을 따져보면 총 404 km³의 철광석 원석이 채석된 것으로 추정된다. 적치활동에 의한 체적 변화량은 서쪽, 북쪽, 동쪽 적치장 순으로 P1에서 약 175 km³, 106 km³, 180 km³로 나타나고, P2에서 각각 51 km³, 8 km³, 44 km³로 나타난다. 전체 체적 감소량은 P1에서 406 km³, P2에서 103 km³의 폐석과 표토가 매립된 것으로 보인다. 한편, 이 부피는 따로 압착을 거치지 않은 폐석 더미의 부피로서, 공극을 포함한 부피로 가정한다. 그렇기에 전체 채광 부피보다 적치 부피가 더 크게 산출되는 것으로 판단된다.

질량 변화량은 연구방법에서 설명한대로, 원암의 밀도 및 적치된 폐석 더미의 밀도, 공극률을 추정하여 계산하였다. 총 채광량은 P1에서 약 11억 6천만 ton, P2에서 약 2억 ton으로 추정된다. 폐석은 P1과 P2에서 각각 8억 7천만 ton, 1억 6천만 ton이 적치된 것으로 보인다. 적치장 별로 나누어 보면 서쪽, 북쪽, 동쪽 적치장에서 P1에 각각 약 3억 3천만 ton, 2억 ton, 3억 4천만 ton의 폐석이, P2에 각각 약 9,600만 ton, 8,400ton, 1,600만 ton의 폐석이 적치된 것으로 추정된다. 약 백 년 간 총 채광량은 약 13억 7천만 ton으로, 총 적치량은 약 10억 6천만 ton으로 추정된다. 철광석에서 유용한 철 성분만을 추출하고 남은 폐석을 적치했다고 가정할 때, 전체 기간 동안 추정 철 생산량은 약 3억 ton에 육박한다. 연간 평균적으로 약 300억 ton의 철광석이 생산된 것으로 볼 수 있으며, 선행 연구에서 무산 광산의 연간 철 생산량을 300~800만

ton으로 추정된 것과 비교하여 의미 있는 값으로 판단된다.

추가적으로, 조선지형도 DEM의 정밀도에 따른 오차 전파량을 고려해야한다. 변화가 없는 지역에서 발생하는 수직 오차는 고도 변화, 체적 변화, 질량 변화 순의 일련된 연산 과정에서 오차가 그대로 전파되기에 오차 범위를 제시해 결과의 신뢰성을 확보하고자 한다. 광산 활동이 없는 안정한 지역에 대해 Copernicus DEM과 조선지형도 DEM 간의 고도 차이의 표준편차가 약 18.6 m로 나타난다. 이를 이용해 질량 변화량의 오차 범위를 계산한 결과, 서쪽, 북쪽, 동쪽 적치장에 대해 각각 $\pm 8,600$ 만 ton(약 20%), $\pm 4,800$ 만 ton(약 23%), $\pm 7,600$ 만 ton(약 18%)의 오차 범위가 있다. 채광장은 약 ± 1 억 7천만 ton(약 12%)의 오차 범위를 갖는다.

2. PSInSAR 결과

Fig. 4는 각 궤도별로 획득한 5년 분량의 영상을 모두 사용한 PSInSAR 결과이다. Asc 궤도에서는 11,041개의 PS가, Dsc 궤도에서는 9,778개의 PS가 산출되었다. 하지만 지반 침하가 예상되는 지역 즉, DEM change 결과에서 고도 변화가 발견된 지역에 대해서는 매우 적은 양의 PS가 산출되었다. 우선 가장 큰 수준의 고도 변화가 감지된 동쪽 적치장 영역에서 획득한 PS를 통해 전체적인 지반 침하 패턴을 파악하고자 하였다. 동쪽 적치장에서 유의미한 PS는 Asc 궤도에서 약 3개, Dsc 궤도에서 약 1개 관찰되었으며, Fig. 4에서 붉은색으로 표시된 지역에 대한 시계열 지표 변위를 Fig. 6에 도시하였다. 초기 결과는 5년간 Asc 궤도에서 약 377 mm, Dsc 궤도에서 약 248 mm의 지속적인 지반 침하가 관찰되었다. 그러나 누적 침하가 발생하는 것은 식별이 되지만 시간 영역에서의 절대위상복원 오류가 발생한 것을 알 수 있다. 특히, Dsc 궤도에서 발생하는 절대위상복원 오류가 더욱 잦은 빈도로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 적은 수의 PS로 인해 발생하는 것으로 판단된다. StaMPS 알고리즘은 3차원 즉, 2차원 공간과 시간 영역에서의 절대위상복원을 수행한다. 본 연구 결과와 같이 낮은 PS 밀도로 인해 인접한 PS 간의 거리가 멀 경우 공간적인 연속성이 저하되며 결과적으로 3차원 언래핑 성능이 저하될 수 있다. Dsc 궤도에서 phase jump가 더 심하게 발생하는 이유도 이를 통해 설명할 수 있다. Asc 궤도에서는 해당 지점에 인접한 PS가 약간 분포하기에 공간적인 위상 변화 정보를 더 확보할 수 있지만, Dsc 궤도는 단일 PS로 존재하기 때문에 인접 PS와의 공간 정보가 없기 때문에 phase jump가 더 심화되어 나타나는 것으로 보인다.

우선 해당 PS를 통해 침하 양상을 대략적으로 파악하기 위해 절대위상복원 오류가 발생한 부분을 직접 이어 수동으로 절대위상복원을 수행하였다. SAR 신호는 위상 정보를 $-\pi$ 부터 π 까지 2π 간격의 wrapped phase를 기록한다. 2π 에 해당하는 위상은 SAR 시스템의 절반 파장 즉, Sentinel-1의 경우 약 27 mm에 해당하는 변위 정보를 포함한다. 따라서 하나의 phase jump가 발생한 지점에서의 변위 오차는 약 27 mm로 나타난다. 따라서, phase jump가 발생한 지점의 시계열 변위를 27 mm씩 누적해서 내려주었다. Fig. 7은 각 궤도별 수동 절대위상복원 결과를 초기 결과와 비교한 그림이다.

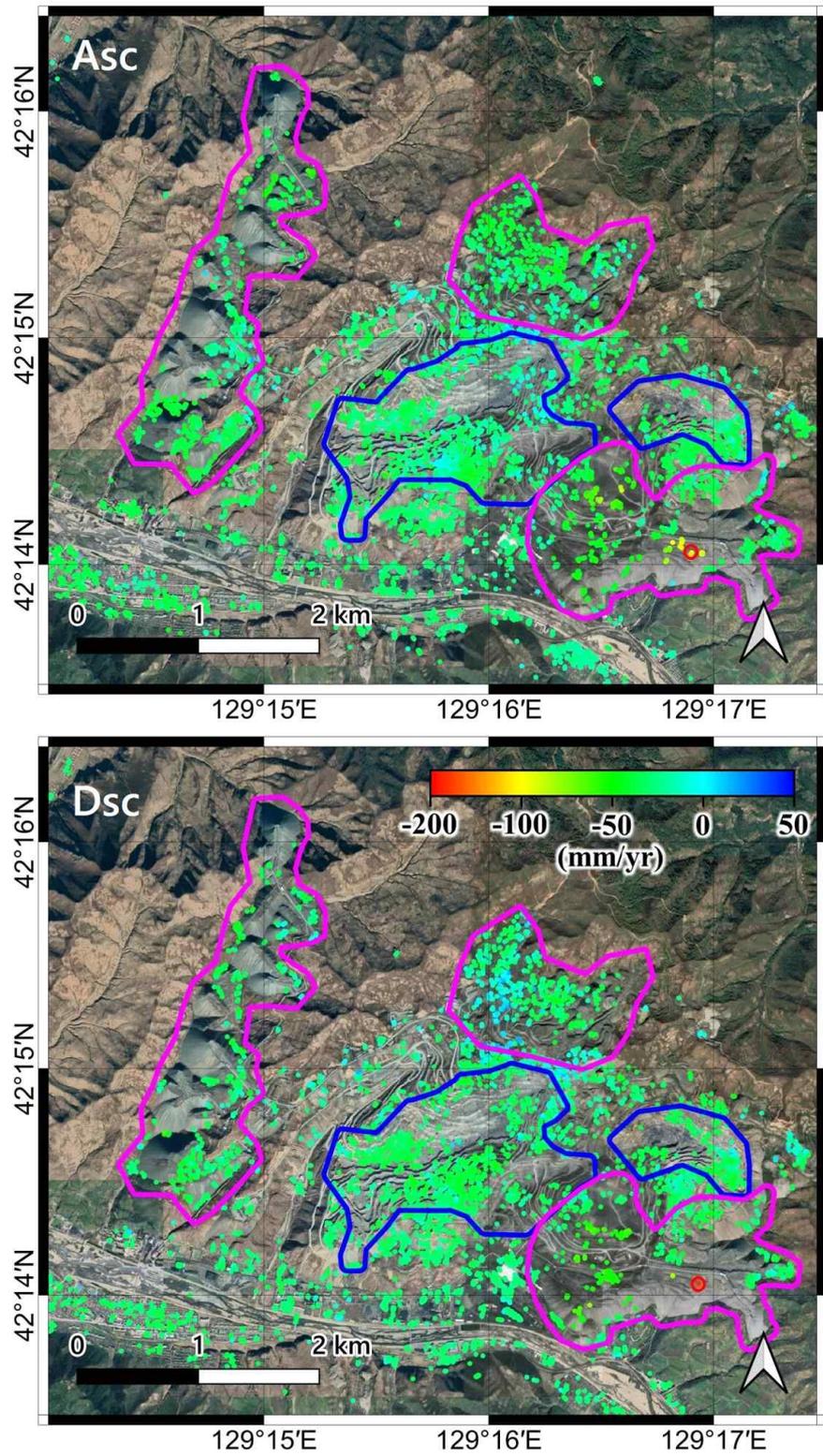


Fig. 5. Results of the PSInSAR for 5 years.

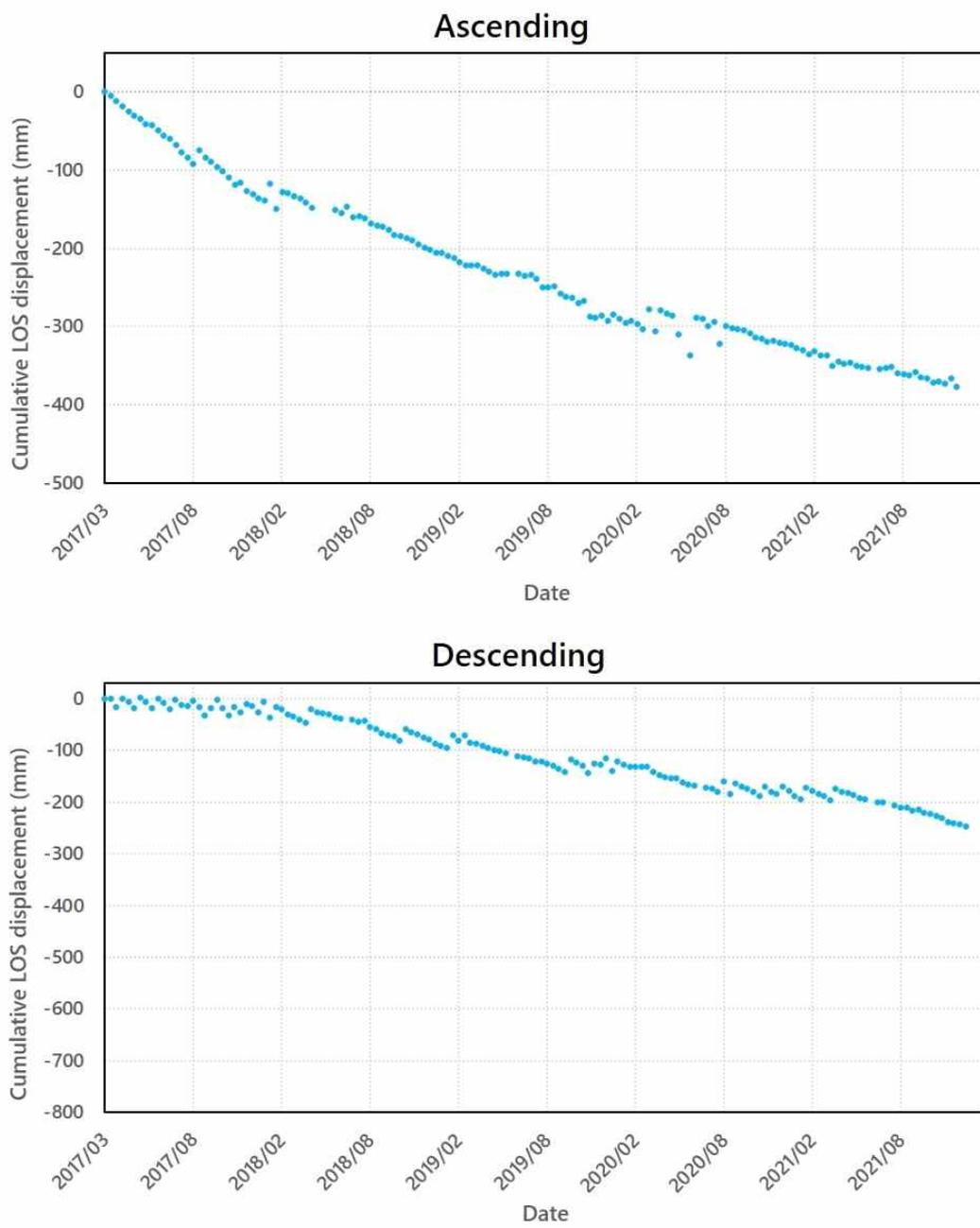


Fig. 6. The time series displacement of the PSs marked on Fig. 5.

Fig. 7에서 파란색 점으로 표시된 부분은 초기 결과이며 붉은색 점으로 표시된 부분은 수동 절대위상복원 결과이다. Phase jump가 발생한 지점과 바로 직전 시계열의 변위 차이는 27 mm와 근사하게 나타났으며, 수동 절대위상복원 수행 후의 그래프는 끊어진 지점 없이 부드러운 곡선을 갖는 그래프를 나타낸다. Asc 궤도에서는 추가적인 81 mm의 추가적인 LOS 방향 변위가 나타난다. Phase가 더 많은 간격에서 jump가 발생한 Dsc 궤도에서는 486 mm의 더욱 많은 양의 추가 변위가 발생하였다. 즉, 수동 언래핑 결과가 시계열 지표 변위를 제대로 반영한 결과라면 해당 지점에서는 2017년부터 약 5년 간 Asc 궤도에서 약 460 mm, Dsc 궤도에서 약 747 mm의 LOS 방향 누적 변위가 발생한 것이다.

하지만, 모든 PS에 대해 수동으로 절대위상복원을 수행하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 장기간의 무산 광산 지표 변위 관측에 있어 절대위상복원 오류를 완화하기 위한 최적의 파라미터를 찾고자 StaMPS 알고리즘에 사용되는 파라미터 중 하나인 `unwrap_time_win` 파라미터를 조절해가며 PSInSAR를 다시 수행하였다.

초기의 결과는 기본값인 24일로 설정한 결과이며 `unwrap_time_win`을 12일, 6일로 두 배씩 줄여가며 수행하였고, 48일로 두 배 증가시켜 총 3번의 PSInSAR를 재수행하였다. 아래 Fig. 8은 `unwrap_time_win`이 각각 6일, 12일, 24일(초기결과), 48일 일 때의 PSInSAR 결과와 수동 절대위상복원 결과(Fig. 7)를 모두 도시한 그래프이다. `unwrap_time_win`의 크기가 클수록 phase jump가 심화되며, 작아질수록 수동 절대위상복원 결과와 유사해짐을 알 수 있다. 이를 통해 연구 대상 지역인 무산 광산에서는 `unwrap_time_win`의 크기를 작게 설정해야 한다고 판단하였으며 다음 장에서 소개할 TS-PSInSAR의 자료처리는 `unwrap_time_win`을 6일로 설정하여 수행하였다.

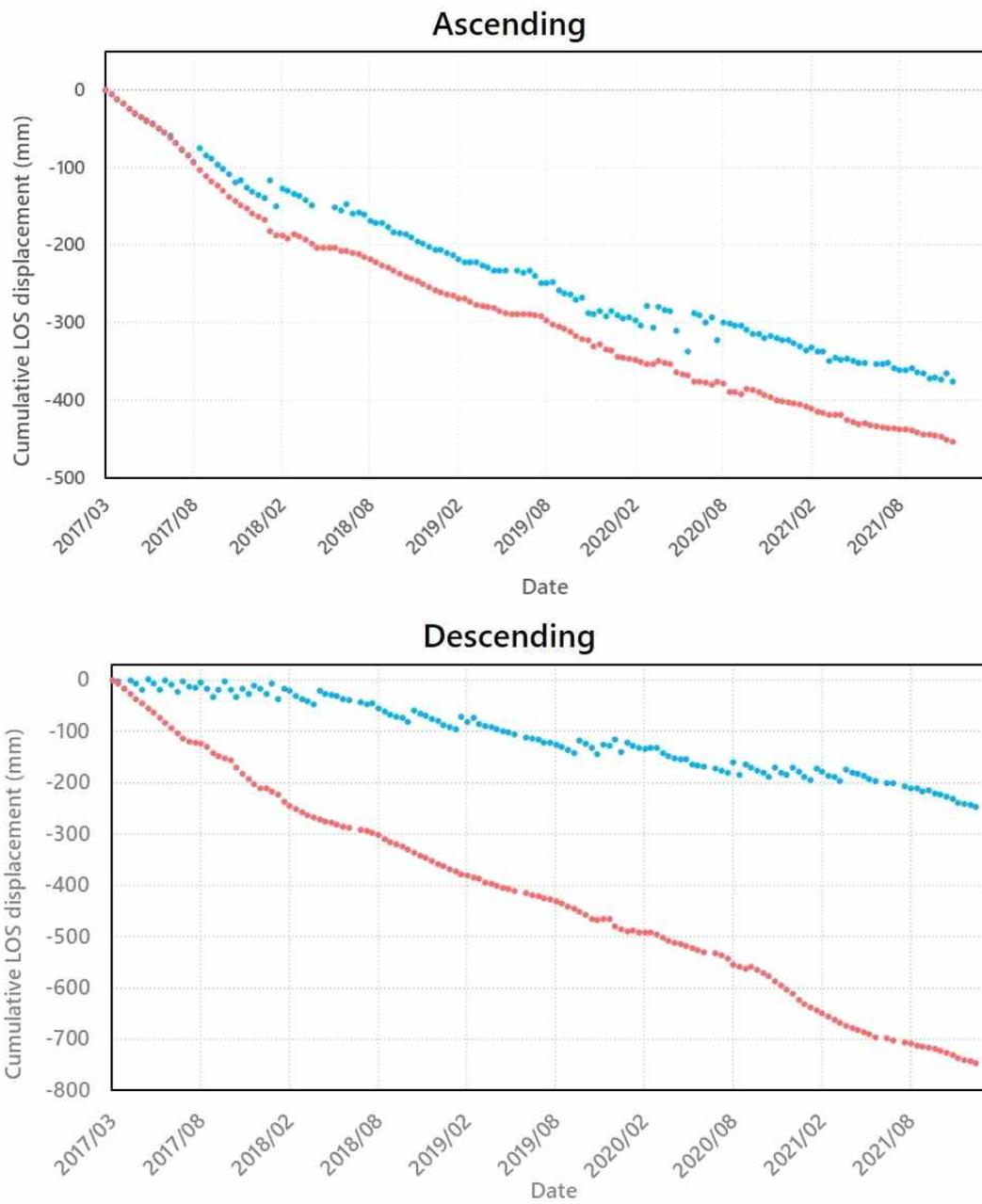


Fig. 7. Cumulative displacement for each orbit of the PS shown in Fig. 5. The blue dotted line is the initial result of PSInSAR, and the red dotted line is the manual phase unwarping result.

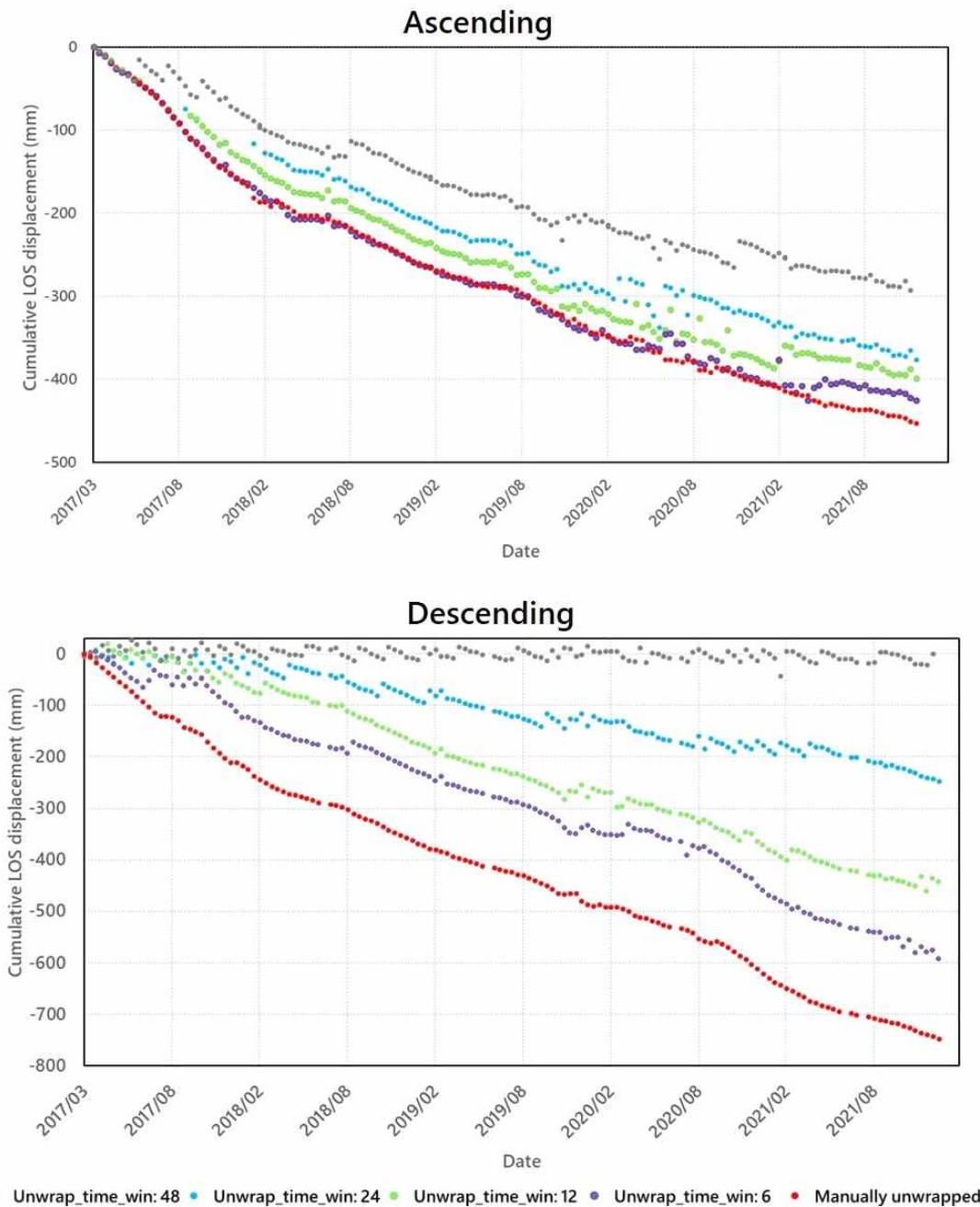


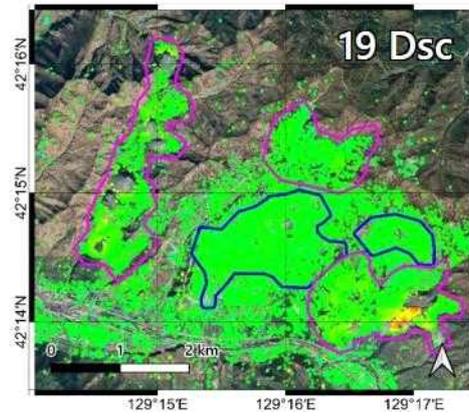
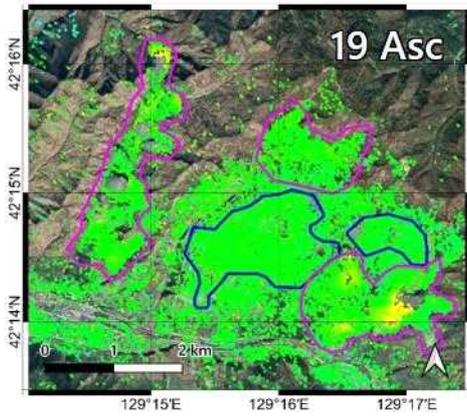
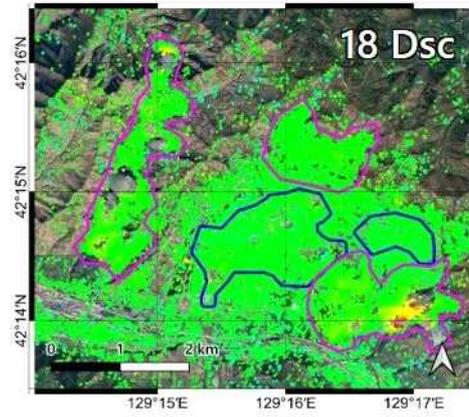
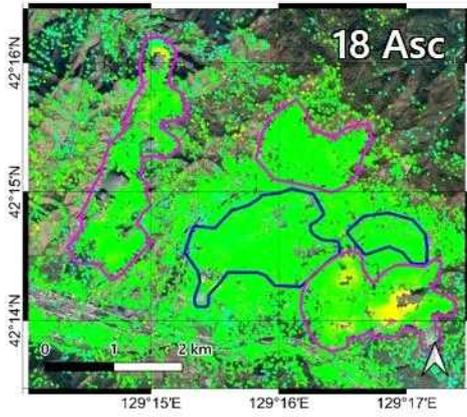
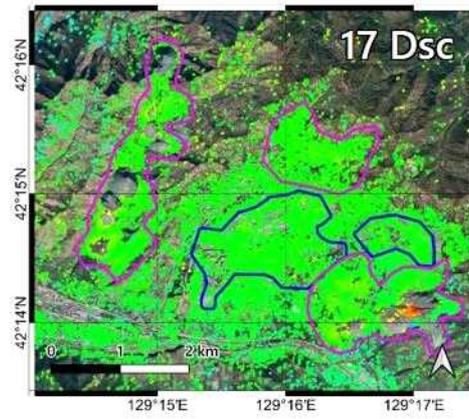
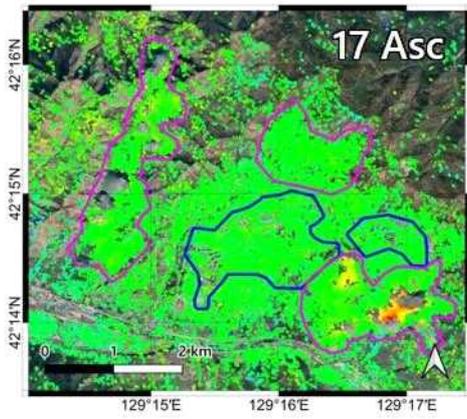
Fig. 8. PSInSAR results for the PSs shown in Fig. 5. The `unwrap_time_win` parameter was varied, including settings of 48 (the gray one), 24 (initial result, the blue one), 12 (the green one), and 6 days (the purple one), along with the manual phase unwrapping result.

3. TS-PSInSAR 및 2차원 변위 분석

앞 절에서 두 가지 방법을 통해 절대위상복원 오류를 완화시켜 무산 광산의 동쪽 적치장의 지반 침하 양상을 확인하였다. 하지만 근본적으로 양질의 PS를 많이 산출할 필요성이 있었다. 수동 절대위상복원은 물리적인 한계가 있었으며, unwrap_time_win 파라미터 조절 역시 절대위상복원 및 변위 분석에 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 PS의 개수를 더 많이 확보하기 위해 5년 분량의 SAR 영상의 시간적 범위를 약 1년 단위로 분할한 TS-PSInSAR를 수행하였다. 연도별로 산출된 PS의 개수는 평균적으로 Asc 궤도에서 80,595개, Dsc 궤도에서 74,232개로 전체 기간 PSInSAR에 비해 약 8배 가량 많은 PS가 산출되었다. 아래 Fig. 9는 각 궤도별로 획득한 연도별 TS-PSInSAR 결과 영상을 도시한 그림이다.

이후 2차원 공간분석을 위해 각 PS의 위치를 일치시키고 시계열 변위를 궤도별로 이었다. Fig. 10은 각 궤도마다 5년 간의 시계열 변위 정보를 포함하는 TS-PSInSAR 최종 결과이다. 모든 segment에서 공통적으로 발견할 수 있는 특징이 침하를 나타내는 지역을 중심으로 속이 빈 원 모양의 PS 그룹을 나타내는 것이다. 이 그룹의 반경은 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 즉, PS의 밀도가 시간에 따라 높아지는 경향을 나타낸다. 이는 시간에 따라 점차 지표가 안정화 되는 것으로 유추할 수 있다. 이와 관련한 내용은 다중 시기 DEM과의 연계 해석 과정에서 더 자세히 다룬다. DEM change 결과에서 적치가 발생한 지역의 중심부와 그룹의 중심부가 매우 유사하게 나타남 역시 확인할 수 있었다. 또한 그룹의 중심으로 갈수록 침하 속도가 빨라지는 것으로 확인되었다.

추가적으로, TS-PSInSAR로 획득한 5년 간의 누적 변위와 1절에서 획득한 수동으로 절대위상복원한 PSInSAR 결과(Fig. 7)를 비교하였다. Fig. 11은 각각 PSInSAR와 TS-PSInSAR로 획득한 궤도별 누적 지표 변위를 도시한 그림이다. 두 그래프는 형태가 매우 유사하며 수치적으로도 5년 간의 누적 변위의 차이는 Asc 궤도에서 약 8 mm, Dsc 궤도에서 약 22 mm로 거의 차이가 없게 나타난다. 두 그래프가 거의 일치함은 TS-PSInSAR의 결과가 시간적, 공간적인 측면에서 더욱 강점을 드러내는 증거가 될 수 있다. 다음 절에서 TS-PSInSAR의 결과를 DEM change와 함께 위치별로 더욱 상세히 분석하였다.



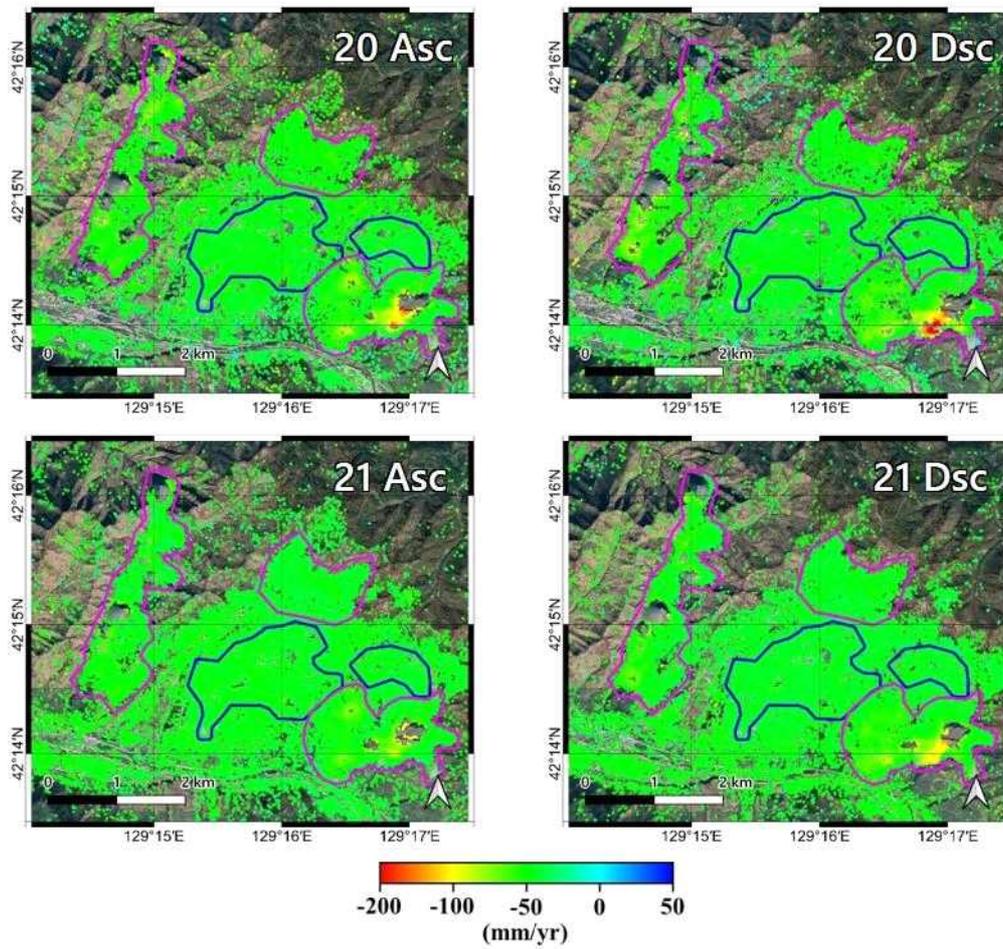


Fig. 9. TS-PSInSAR results for each orbit by year.

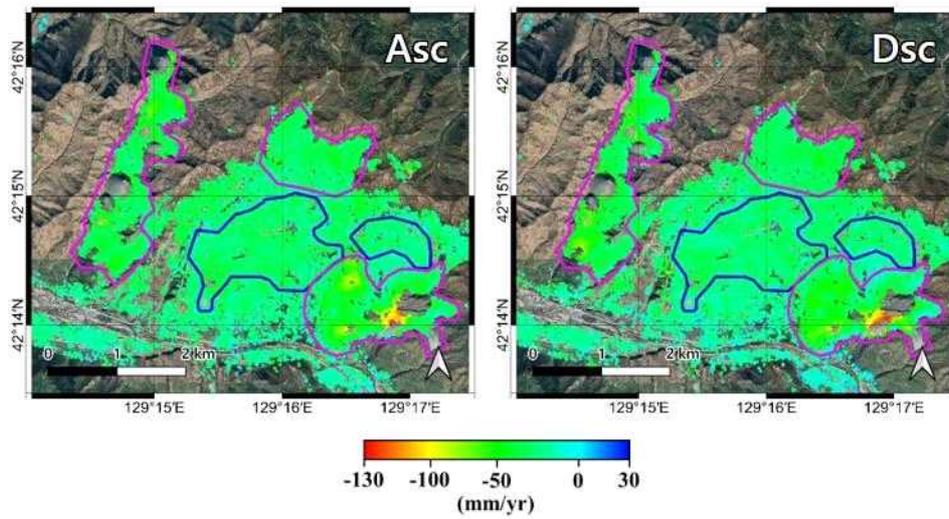


Fig. 10. TS-PSInSAR displacement rate map of each orbit, integrating the position of PS for each orbit.

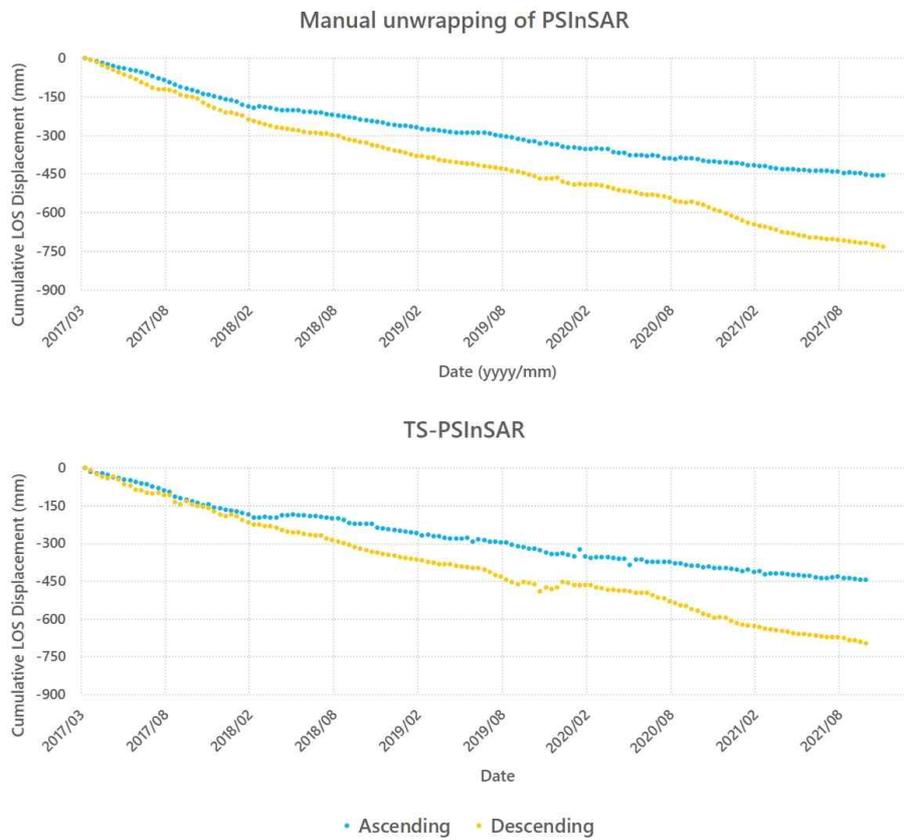


Fig. 11. Comparison between the results of manual phase unwrapping and TS-PSInSAR.

1) 동쪽 적치장 결과 분석

동쪽 적치장은 Fig. 12와 같이 3 가지의 PS 그룹으로 구분하여 설명한다. 각 그룹은 E1, E2, E3로 명명하였다. 각 그룹에 단면도를 그려 3가지 시점의 DEM을 통해 적치장 발달 과정을 도시하였다. 그리고 TS-PSInSAR를 통해 획득된 5년 간의 시계열 지표 변위를 추적하는 화살표를 만들어 가장 최근 시점인 Copernicus DEM 단면도 위에 그려주었다. 화살표는 x-z 평면 상의 시계열 변위를 나타내며, 비교의 편의성을 위해 실제 변위에 대해 100배 증폭하여 제작되었다.

먼저 E1은 전체 연구 지역 중 가장 큰 수준의 수직 변위가 발생하였다. E1은 현재 시점까지도 적치 활동이 계속 진행중인 관계로 연간 긴밀도가 낮아 PS 그룹의 빈 공간의 반경이 크다. E1은 과거 북동-남서 방향의 큰 계곡 위에 폐석을 쌓아 현재 평평한 지형을 형성하고 있다. Fig. 13에서 E1에 해당하는 단면도 A-A'에서 수평 변위의 방향은 SRTM의 사면의 방향 보다는 조선지형도 DEM의 사면 방향에 더 따르는 것으로 보인다. 즉, 폐석을 쌓기 전, 자연 상태의 계곡의 중심 방향을 향해 수평 변위가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 계곡의 중심부에 가까워질수록, 폐석이 쌓인 두께가 두꺼워질수록 수직 변위가 우세해짐 역시 확인 가능하다. 단면도 상에서 계곡의 중심부에서는 약 667 mm의 지표 변위가 관찰되었다. E1에서의 조선지형도 DEM과 Copernicus DEM의 고도 차이는 약 150 m에 이른다. SRTM의 사면을 기준으로 보았을 때 2000년대 초에는 단면도 A-A'의 오른쪽 사면은 아직 적치가 발생하지 않은 것으로 보인다. 이는 2000년의 광학 영상에서도 확인이 가능하다. 이 지역들은 비교적 최근에 쌓였으며 거의 수평 변위에 영향을 받는 것으로 보인다. 반면, 왼쪽 사면의 경우 비슷한 수준의 폐석 적치량을 가지고 있으나, 1985년 이전부터 2015년까지 매우 장기간에 걸쳐 폐석이 쌓인 탓에 수직 변위에 영향을 받는 것으로 판단된다.

E2는 동쪽 적치장의 남부에 위치한 그룹으로 대체로 평탄한 지역 위에 폐석을 볼록하게 쌓은 형태의 적치장이다. E1은 과거부터 약 100 m 내외의 폐석이 적치된 지역이다. 폐석은 2000년대 초 경 적치가 완료된 것으로 보인다. 1985년 Google Earth 영상에서도 적치의 흔적이 보이며 SRTM과 Copernicus DEM 간의 차이는 최대 약 15 m에 불과하다. 하지만 많은 양의 폐석 적치로 인해 최대 약 327 mm의 침하량을 나타낸다. 이 지역의 수평 변위의 거동 양상은 E1과는 약간 다른데, E1의 경우 과거 사면의 방향을 따라 중심부로 모여드는 형태의 수평 변위가 발생했지만, E2의 경우 현재 사면의 방향을 따라 양 옆으로 퍼지는 형태의 수평 변위가 발생한다. E2 지역의 단면도 B-B'에서 사면이 양 옆으로 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다. 왼쪽 사면은 오른쪽 사면에 비해 상대적으로 적치량이 적기에 수평 변위에 영향을 더 받는 것으로 보인다. 하지만, 오른쪽 사면은 적치량이 많아 수직 변위가 우세해진 것으로 판단된다.

E3는 E1와 비슷하게 계곡 위에 폐석이 투기되었으나, 평평하게 메워진 것이 아닌, 사면의 경사면을 따라 폐석을 쌓아놓은 형태의 적치가 진행되었다. E3는 최대 약 110 m 가량의 폐석이 매립되었으며, E2와 마찬가지로 SRTM DEM 획득 시점에 적치가 이미 완료된 상태이다. 이 지역의 지표 변위는 앞서 E1, E2와는 다소 다른 양상을 보인다. 수직 변위의 영향이 거의 적고 사면의 방향을 따라 수평적인 흐름만을 나타내는 것으로 보인다. 특히, 변위의 발생 각도가 사면의 안식각과 매우 유사하게 나타난다. 변위량은 5년간 최대 약 322 mm로 나타난다.

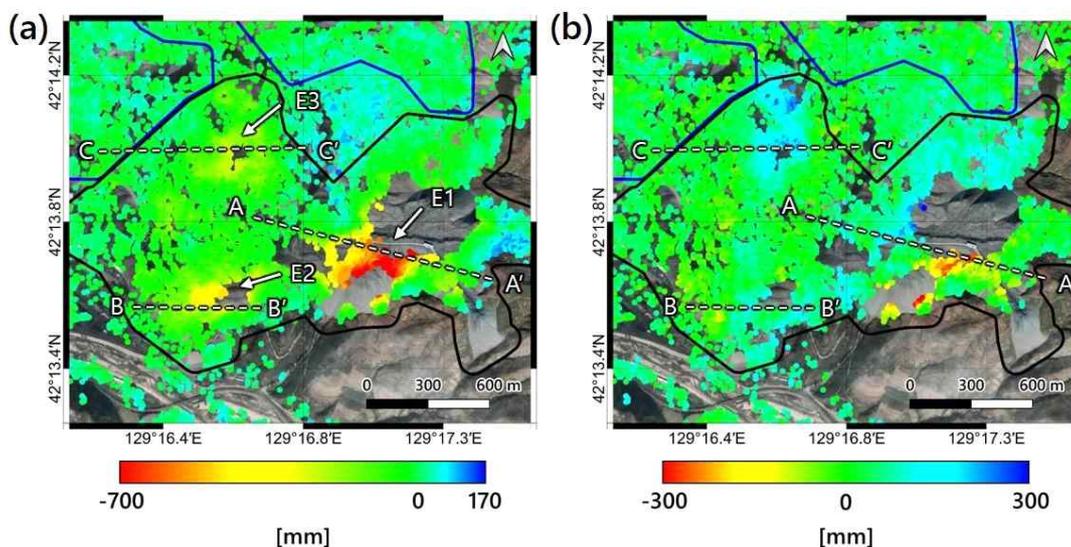


Fig. 12. Converted TS-PSInSAR results for the east storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction.

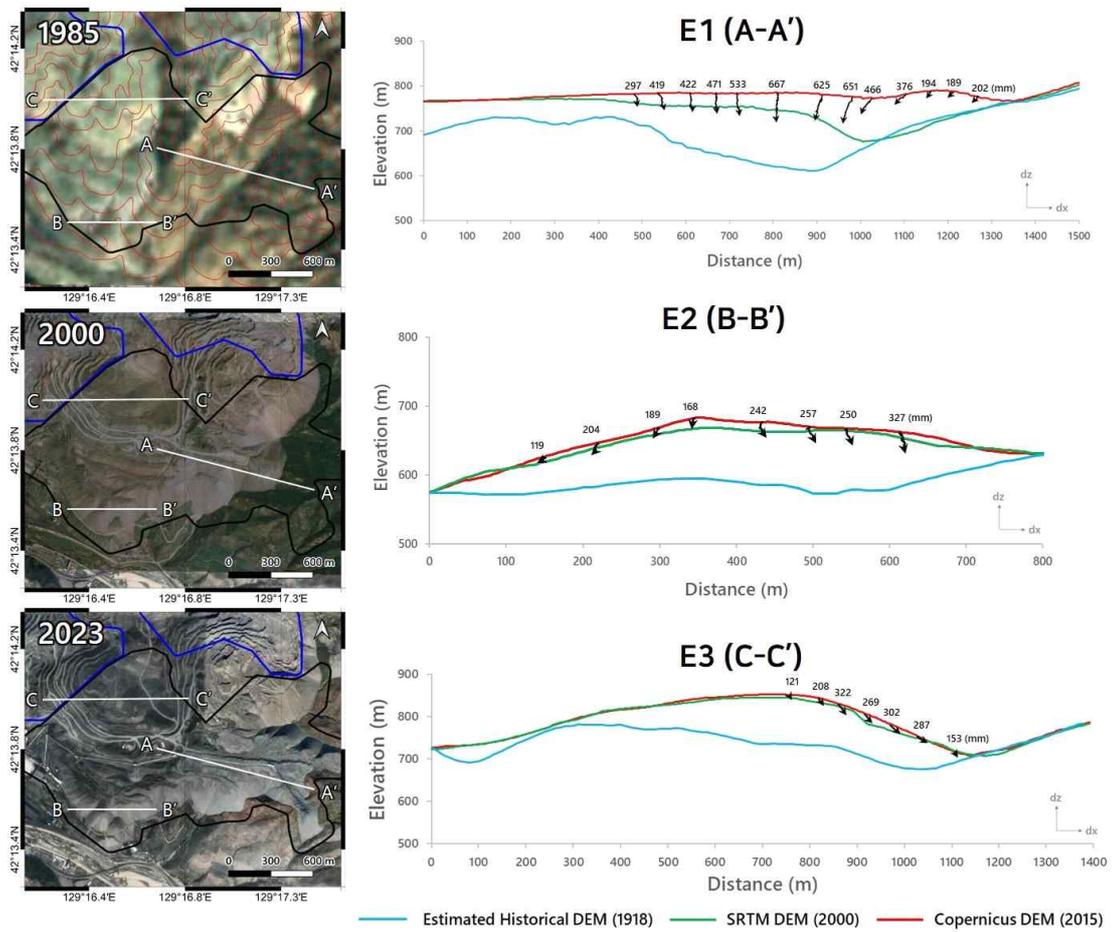


Fig. 13. Google Earth optical satellite images of the east storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 12. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows.

2) 북쪽 적치장 결과 분석

북쪽 적치장(N)은 Google Earth 광학 위성 영상 관독 결과 1985년 이전에 이미 적치가 완료된 것으로 추정된다. 상당히 오랜 시간이 지난 탓에 지표 및 폐석 더미가 매우 안정되어있다. N 지역은 대체로 평탄한 지역위에 폐석을 평평히 쌓아 올린 형태의 적치가 발생했다. 최대 적치높이는 약 120 m, 평균적으로 약 82 m 가량의 고도 상승이 발생하였음에도 지표 변위는 5년 간 100 mm가 채 되지 않는다. 평평한 형태의 적치가 이루어졌으므로 수평 변위의 영향을 거의 받지 않고 대부분 수직 변위만 나타난다. 이처럼 적치가 완료된 지 오래 지난 지역은 적치량이 많더라도 지표 변위가 상당히 낮게 나오는 것을 알 수 있다.

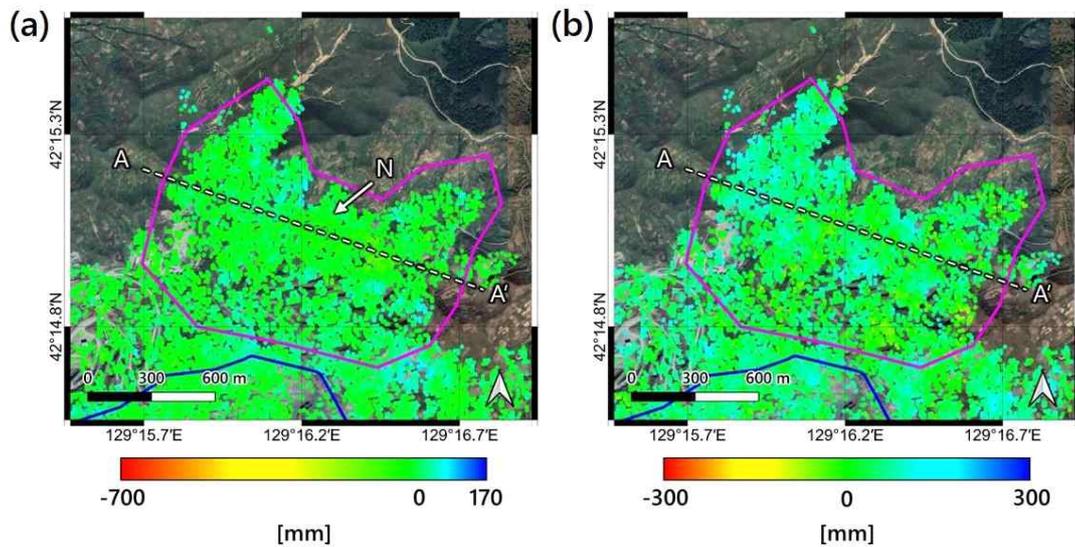


Fig. 14. Converted TS-PSInSAR results for the north storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction.

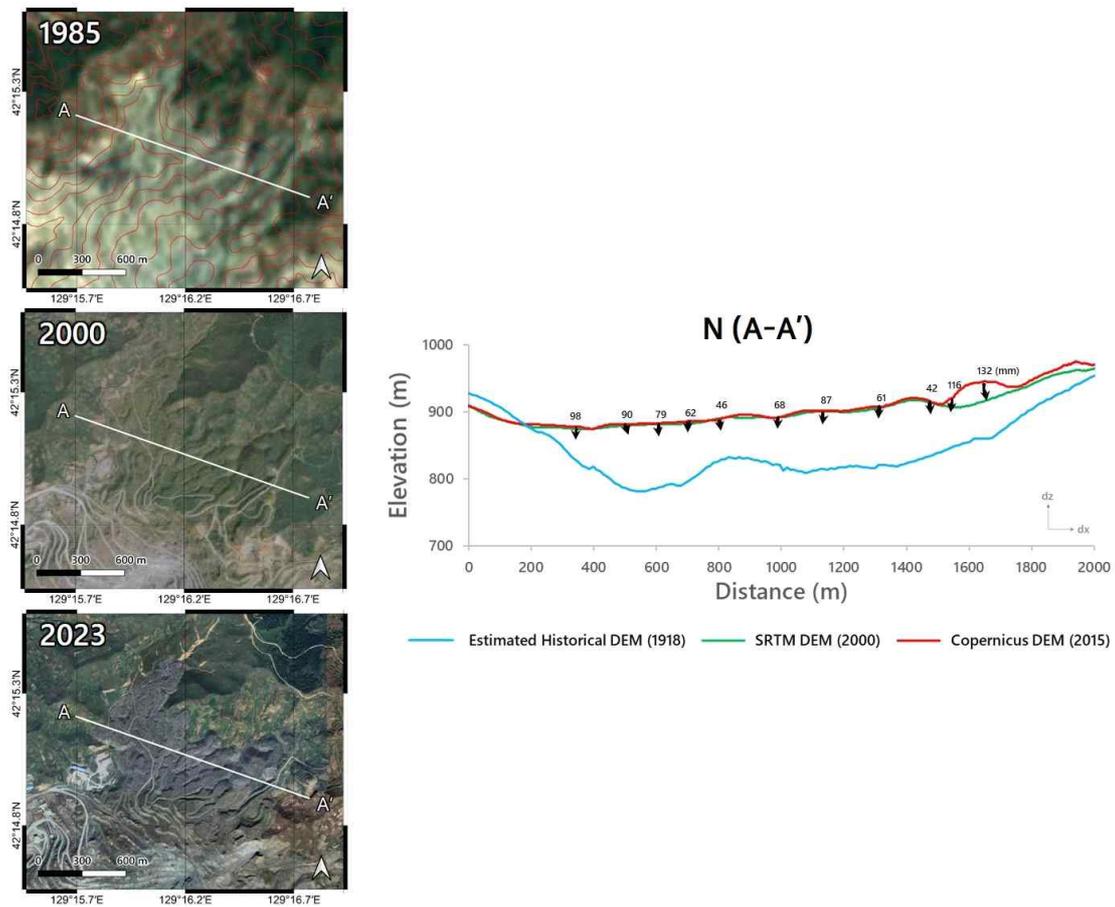


Fig. 15. Google Earth optical satellite images of the north storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 14. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows.

3) 서쪽 적치장 결과 분석

서쪽 적치장은 4개의 그룹으로 구분하여 북쪽에서 남쪽으로 각각 W1부터 W4로 명명하였다. 서쪽 적치장은 남북으로 긴 지형을 가지고 있으므로 각각 북부와 남부로 나누어 설명한다. Fig. 16과 18은 서쪽 적치장 북부에 위치한 W1과 W2에서 획득한 수직, 수평 변위와 각 그룹의 단면도를 보여준다.

서쪽 적치장의 최북단에 위치한 W1은 채광장에서 가장 멀리 떨어져 있어 비교적 최근에 적치가 시작되었다. Google Earth 광학 위성 영상 분석 결과 2009년 이후 적치활동이 시작된 것을 확인하였으며, 현재까지도 적치 활동이 감지된다. 따라서 SRTM DEM에서 보여지는 사면 모습은 이 지역의 자연 상태의 사면을 보여주며 조선지형도 DEM과 거의 일치하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 현재까지 활발히 발생하는 적치활동에 의해 연간 긴밀도가 매우 낮아 PS의 개수가 다른 지역에 비해 눈에 띄게 적은 것을 알 수 있다. 가장 중요한 중심부에 PS가 모든 segment에 대해 전혀 산출되지 않았으며, 적치 사면의 가장자리에만 일부 산출되었다. 특히 A-A'의 오른쪽 가장자리에서 집중적으로 산출되었으며, W1의 PS들의 수평 변위는 모두 동쪽 방향을 향하는 것으로 나타난다. W1은 평탄한 지형 위에 볼록한 형태로 폐석이 적치되었다. 따라서 오른쪽 사면의 방향을 따라 수평 변위가 발생하는 것으로 알 수 있다.

W2는 다른 그룹과는 다소 다른 특징을 갖는다. 이 지역은 과거 커다란 계곡이 위치했으며 1985년 이전부터 적치가 시작되어 2000년 경에는 평탄한 지형을 형성하고 있다. 그 이후 W1처럼 볼록한 형태로 추가적인 적치가 발생한 것을 알 수 있다. P1 시기에 최대 적치 높이는 계곡의 중심부에서 약 120 m 가량으로 확인되며 P2 시기에 쌓인 폐석 더미의 높이는 최대 약 35 m이다. 추가로 쌓인 왼쪽 사면도 조선지형도 DEM과 비교하면 적치 높이가 약 100 m 내외이지만, 이 지역에서는 P1에서 쌓인 폐석의 영향은 매우 적은 것으로 보인다. 1985년 이전부터 이미 적치가 어느정도 진행되어 있었으므로 해당 폐석 더미는 거의 안정화 되었으며, P2 시기에 새로 쌓인 폐석에 대해서만 영향을 받는 것으로 보인다. 마찬가지로 이유로 오른쪽 사면에서는 PS의 시계열 변위가 거의 없는 것으로 나타난다. 왼쪽 사면에 대한 PS들의 변위 양상은 E2, W1과 같이 평탄한 지형 위에 볼록히 쌓인 경우와 유사하게 각 사면의 방향을 향하는 것으로 나타난다.

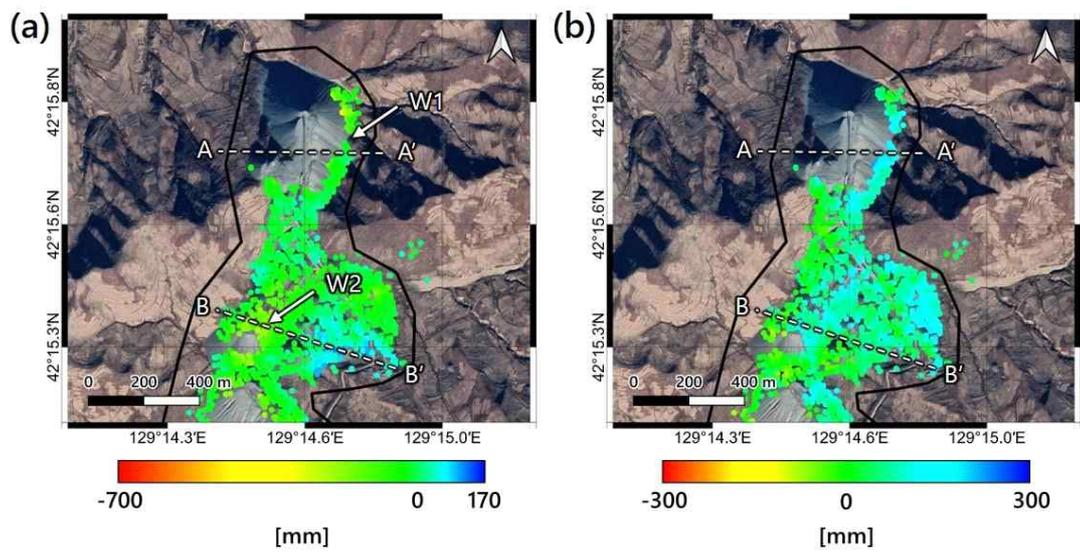


Fig. 16. Converted TS-PSInSAR results for the north part of the west storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction.

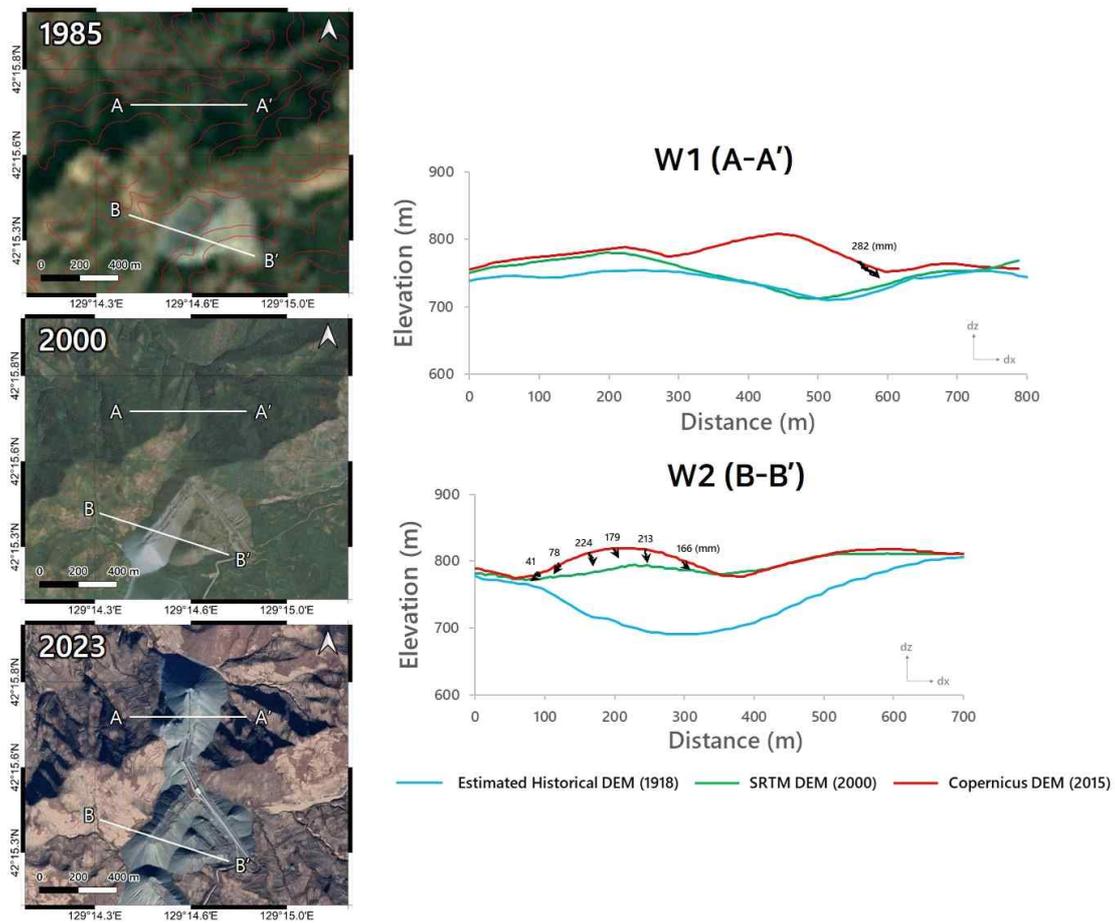


Fig. 17. Google Earth optical satellite images of the north part of the west storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 16. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows.

W3와 W4는 서쪽 적치장 남부에 위치한다. 이 두 지역은 넓고 완만한 계곡 위에 폐석을 쌓았다. 두 지역 모두 1985년 이후 적치가 시작된 것으로 보인다. 동쪽에서부터 서쪽으로 조금씩 폐석을 적치해나간 것으로 보인다. W3의 오른쪽 사면은 2000년대까지 적치되어 현재까지 변화가 없으며, 변위는 대부분 사면의 안식각 방향을 따라 수평 방향 성분만 존재하는 것으로 보인다. 반면, 왼쪽 사면은 P2 기간에 적치가 시작되었으며 이 영역은 수직 변위의 영향을 우세하게 받는다. 두 사면은 적치 높이가 약 55 m로 비슷하지만, 더 먼저 쌓인 부분은 수평 성분만 나타나고, 나중에 쌓인 부분은 수직 변위를 포함한다. 하지만 공통적으로 E1의 경우처럼 수평 변위의 방향이 계곡의 중심부를 향한다.

W4의 경우 P1과 P2에 걸쳐 지속적으로 폐석이 적치되어왔으며, 완전한 서향의 사면 이룬다. 수평 방향 변위는 계곡의 중심부를 따라 사면의 방향과 일치하게 나타난다. B-B'에서 폐석의 두께는 사면의 상부로 갈수록 두꺼워지는 것을 확인할 수 있는데, 폐석 두께가 두꺼워질수록 수직 변위에 영향을 더 받는 것을 확인할 수 있다. 사면의 하부에서는 변위가 거의 사면의 안식각과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

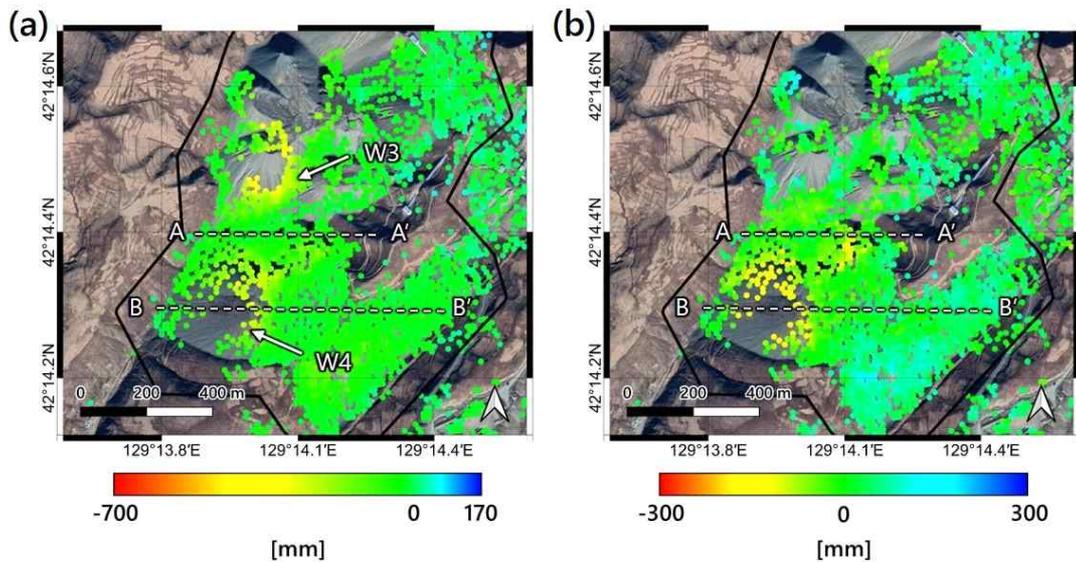


Fig. 18. Converted TS-PSInSAR results for the south part of the west storage area into (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement in east-west direction.

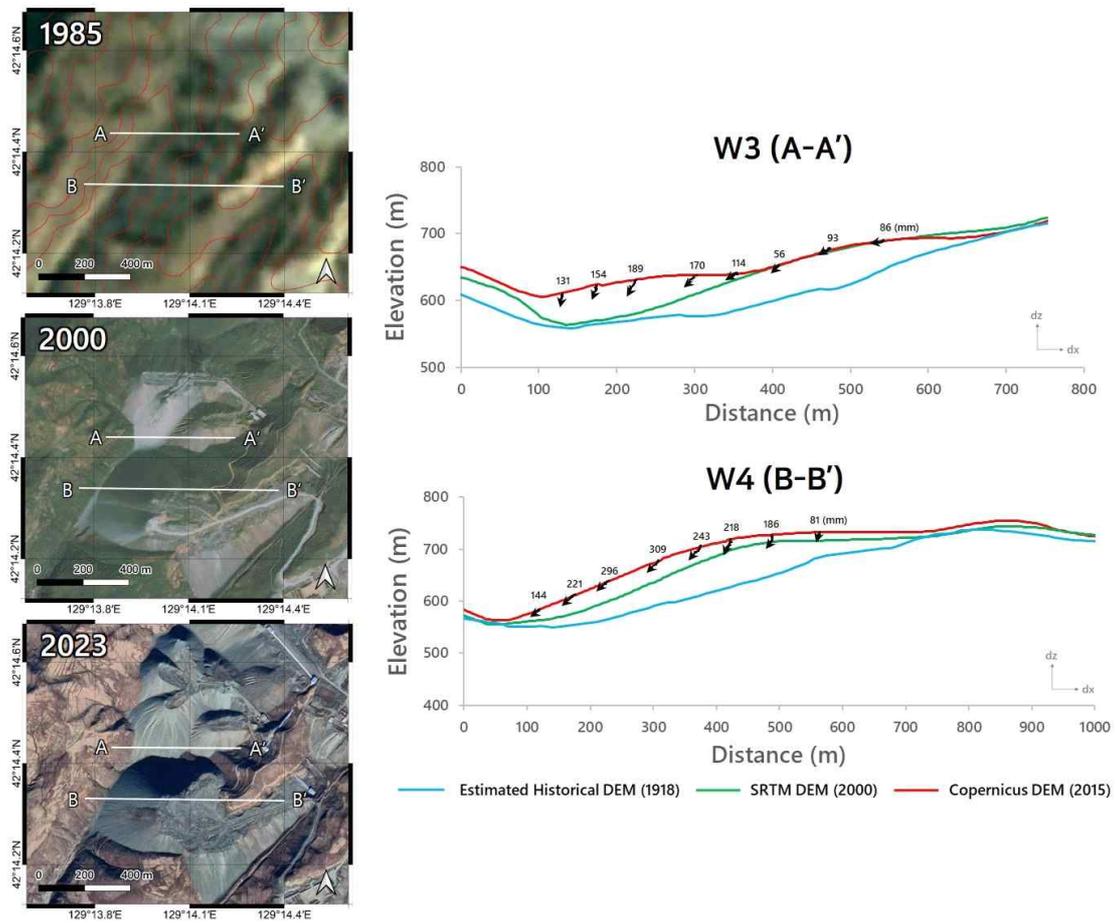


Fig. 19. Google Earth optical satellite images of the north part of the west storage area and DEM profiles corresponding to each cross-section. The cross-section is shared with Fig. 14. The 5-year cumulative displacement of PS on each cross-section is shown in the Copernicus DEM by arrows.

4) 적치량과 지표 변위 간 정량적 관계 분석

앞서 구한 모든 단면도 상의 PS와 해당 위치에 상응하는 총 누적 적치두께 즉, 조선지형도 DEM부터 Copernicus DEM까지의 고도 변화를 추출하여 각 PS의 누적 지표 변위와 누적 적치 두께 간의 관계를 분석하였다. 앞서 적치 발생 시기를 DEM에 의존하여 P1과 P2로 나누었으나, 이 절에서는 1985년의 Google Earth 광학 위성 영상을 참조하여 적치 발생 전후로 P1을 다시 P1-1, P1-2로 나누었다. P1-1은 1985년 이전에 적치가 완료된 지역을 의미하며, P1-2는 1985년부터 SRTM DEM 생성 당시인 2000년 사이에 주로 적치 활동이 있었던 것으로 추정되는 지역들이 해당된다. P1-1은 1985년 이전에 적치가 완료된 북쪽 적치장의 N지역만 해당된다. 이 지역은 폐석 두께에 관계 없이 지반 침하량이 일정하게 낮은 값을 나타낸다.

P1-2는 E2, E3, W2지역과 W3의 오른쪽 사면이 해당된다. 이 지역들은 대부분 2000년 전후로 적치활동이 종료되어 SRTM DEM과 Copernicus DEM과의 차이가 거의 나지 않는 지역들이다. W2의 경우, 2000년 이후에 적치 활동이 감지되기는 하였으나, Google Earth 광학 위성 영상에서 2000년과 현재의 사면 모습이 차이가 거의 없으며, P1 시기에서의 적치량이 지배적이므로 P1-2에 할당하였다. P1-2의 PS들은 폐석 두께에 따른 적치량이 뚜렷한 양의 상관관계를 나타내지는 않는다. 지표 변위는 P1-1보다는 일반적으로 크게 나타나며, 두께에 따른 지표 변위량에 상한이 있는 것처럼 보인다.

P2에 해당하는 지역은 E1과 W1, W4, 그리고 W3의 왼쪽 사면이다. E1과 W4는 P1 시기에도 적치활동이 감지되기는 하였으나, 그와 비슷한 수준으로 P2에도 적치가 진행이 되었으므로 P2에 할당하였다. P2의 PS들은 적치 두께와 지표 변위 사이에 양의 상관관계가 존재하는 것을 볼 수 있다. 정리하자면, 폐석이 오래 전에 쌓인 지역은 대부분 변위가 거의 없거나 매우 적게 나타나며, 반대로 비교적 가까운 시점에 적치 활동이 시작된 지역은 폐석 두께에 비례해서 변위가 발생하는 것을 알 수 있다.

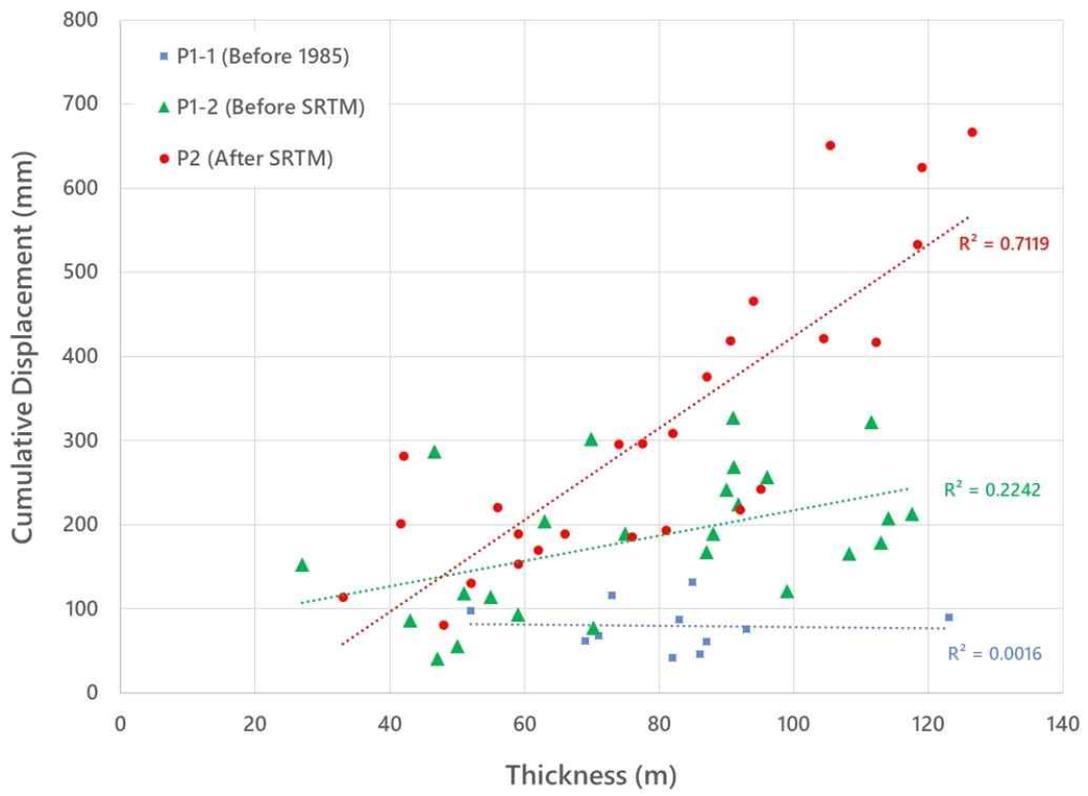


Fig. 20. Correlation between waste rock pile thickness and surface displacement.

V. 결론

이 논문은 북한의 최대 규모의 노천 철 광산인 무산광산의 지표 변화를 PSInSAR 및 DEM과 수치지형 자료를 활용해 분석하였다. 연구의 주된 목적은 (1) 무산광산에서 채광 및 적치가 발생한 영역을 특정하고 자원 및 폐석의 이동량을 정량적으로 산출하는 것, (2) 폐석 적치장에서 발생하는 지반 침하량을 산출하는 것, (3) 적치장의 발달 과정(적치량, 적치 양상)이 지표 변위에 미치는 영향 등을 알아내는 것이다.

먼저, 무산광산의 채광 및 적치 활동을 표면 고도 변화량을 이용해 탐지하였다. 노천 광업과 폐석의 적치가 이루어지는 연구지역 특성상 DEM과 수치지형 자료를 이용하여 자원 이동량을 산출할 수 있었다. 사용된 자료는 글로벌 DEM인 SRTM 및 Copernicus DEM을 포함한다. 해당 DEM은 비교적 최근 시점에 제작되었고, 무산광산의 개발 기간에 비해 간격이 비교적 짧아 충분한 분석이 어려울 것으로 판단되어 1918년 제작된 제3차 조선지형도를 추가로 활용하여 초기 지형 상태를 파악했다. 이를 통해 광산 활동이 발생한 영역을 파악하고, 고도 변화량을 산출하여 체적 변화량과 질량 변화량을 추정하였다. 무산광산에서는 약 백 년 간 총 3억 ton의 철이 생산되었으며, 광업 부산물로 생성된 표토 및 폐석 적치량은 총 약 10억 6천만 ton으로 추정된다.

또한 PSInSAR 기법을 이용하여 2017년부터 2021년까지 약 5년 간의 무산광산에서 발생한 지표 변위를 산출하였다. InSAR stack의 시간 범위를 각 1년 단위로 분할한 TS-PSInSAR를 도입하였으며, unwrap_time_win 파라미터의 크기를 조절하여 최적의 결과를 얻고자 하였다. TS-PSInSAR의 결과는 전체 영상을 사용한 PSInSAR 결과보다 약 8배 많은 PS를 산출하였다. 연구지역에 대한 unwrap_time_win 파라미터는 그 크기가 작을수록 더 우수한 절대위상복원 성능을 보였다.

무산광산의 적치장은 동쪽, 북쪽, 서쪽 적치장으로 구분된다. 동쪽 적치장의 E1은 지반 침하가 가장 큰 적치장으로, 5년간 약 700 mm 내외의 지표 변위가 발생하였다. 북쪽 적치장은 최대 약 120 m의 폐석이 적치되었고, 1985년 이전에 이미 적치가 끝난 것이 확인되었다. 이 지역은 지반이 안정화되어 있어 5년간 100 mm 이내의 변위가 발생했다. 서쪽 적치장은 남북으로 길게 이어져 있으며, 적치가 중심부에서 가장 오래되었고 남북방향으로 멀어질수록 최근 시기에 적치된 것으로 나타난다.

폐석이 쌓인 시기나 양상에 따라 변위의 크기와 방향이 달라지는 것으로 보인다. 폐석이 계곡 위에 평탄히 쌓일 경우 수평 방향 변위는 과거 계곡의 중심부를 향하며, 평탄한 지역 위에 불룩히 쌓일 경우 수직 변위를 동반한 사면 방향으로의 수평 변위가 발생한다. 또한 자연 사면에 폐석을 버려 형성된 사면의 경우 수직 변위보다는 중력으로 인한 사면 방향으로의 수평 흐름이 지배적이며, 변위의 각도는 사면의 안식각과 비슷하게 발생한다. 적치 시기에 따른 폐석 두께와 지표 변위 사이의 관계는 적치 시점

이 짧을수록 강한 양의 상관관계가 나타난다.

본 연구는 다양한 원격탐사 기법을 이용해 무산광산의 적치량, 채광량, 지표 변위 등을 산출하고 이를 통합하여 광산의 지반 침하 현상을 다각도로 분석하였다. 향후 현장 자료가 더 풍부한 지역에 대해 적용 및 검증을 통해 비교적 짧은 시간 내에 발생한 지형 변화로 인해 유발되는 지반 안정성을 더욱 정밀하게 예측하고 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구 결과는 북한의 광업에 대한 이해를 향상시키고, 지반 침하 관리 및 대응에 효과적인 방안을 제시하는 데 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- Agarwal, V., Kumar, A., Gee, D., Grebby, S., Gomes, R. L., & Marsh, S. (2021). Comparative study of groundwater-induced subsidence for London and Delhi using PSInSAR. *Remote Sensing*, 13(23), 4741.
- AIRBUS, 2022. Copernicus DEM product handbook.
- Altimi, H., R. Alrawashdeh, and H. Alnawafleh, 2021. Mining techniques: Past, present and future 3-24, *IntechOpen*, London, United Kingdom
- Bae, S., Yu, J., Koh, S., and Heo, C., 2015. 3D Modeling Approaches in Estimation of Resource and Production of Musan Iron Mine, North Korea. *Economic and Environmental Geology*, 48(5), 391 - 400.
- Chen, J., Li, K., Chang, K. J., Sofia, G., and Tarolli, P., 2015. Open-pit mining geomorphic feature characterization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 76 - 86.
- Chu, Y. and Lee, H., 2023, Estimation of the Amount of Mining and Waste Rocks at Musan Mine in North Korea Using a Historical Map and SRTM and Copernicus Global Digital Elevation Models, *Korean Journal of Remote Sensing*, 39(5-1), 495-505.
- Chung, W. J., 2019. Mineral resource industry of North Korea and two Korea's cooperation. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56(2), 204 - 211.

Earth Resources Observation and Science Center, 2018. USGS EROS archive - digital elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc-second global.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 31(23).

Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M. C., Arkan, M., & Oyen, A. (2010). StaMPS/MTI manual. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluyverweg, 1, 2629.

Kim, S. M., Suh, J., Song, J., & Park, H. D. (2021). Prediction of the Contamination Area at the Musan Mine in North Korea using InSAR Analysis and Multiple Flow Direction Analysis. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 58(6), 536-546.

Klemm, H., Quseimi, I., Novali, F., Ferretti, A., & Tamburini, A. (2010). Monitoring horizontal and vertical surface deformation over a hydrocarbon reservoir by PSInSAR. *First break*, 28(5).

Koh, S. M., Lee, G. J., and Lee, E., 2013. Status of mineral resources and mining development in North Korea. *Economic and Environmental Geology*, 46(4), 291 - 300.

- Lee, H. J., Yang, S. R., & Lee, K. M. (2008). Ecological restoration monitoring of open-pit mines using airborne laser scanning. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 16(4), 101-107.
- Lee, H., Moon, J., & Lee, H. (2022). Activity of Okgye Limestone Mine in South Korea Observed by InSAR Coherence and PSInSAR Techniques. *Remote Sensing*, 14(24), 6261.
- Monjezi, M., Shahriar, K., Dehghani, H., and Samimi Namin, F., 2009. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environmental Geology*, 58, 205 - 216.
- Moon, J., and Lee, H., 2021. Analysis of activity in an open-pit mine by using InSAR coherence-based normalized difference activity index. *Remote Sensing*, 13(9), 1861
- Park, J., and Joung, E., 2017. Study on North Korea's iron ore trade toward China: Focusing on the development situation of Musan mine. *Journal of Northeast Asian Studies*, 85, 73 - 98.
- Park, S., 2019. The collection and characteristics of the topography maps of Korea made between the end of 19th and the middle of 20th century. *Journal of the Korean Research Association of Old Maps*, 11(1), 93 - 116
- Sari, M., E. Ghasemi, and M. Ataei, 2014. Stochastic Modeling Approach for the Evaluation of Backbreak due to Blasting Operations in Open Pit Mines. *Rock Mech Rock Eng* 47: 771 - 783.

- Shu, W. S., Ye, Z. H., Lan, C. Y., Zhang, Z. Q., and Wong, M. H., 2001. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, 26(5 - 6), 389 - 394.
- Sjöberg, J., 1996. Large scale slope stability in open pit mining: a review.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24
- Wang, Z., Zhou, W., Jiskani, I. M., Ding, X., & Luo, H. (2022). Dust pollution in cold region Surface Mines and its prevention and control. *Environmental Pollution*, 292, 118293.
- Yoon, S., Jang, H., Yun, S. T., & Kim, D. M. (2018). Investigating the status of mine hazards in North Korea using satellite pictures. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(6), 564-575.

Analysis of Surface Displacement of the Musan mine using PSInSAR

Yongjae Chu

Department of Geophysics

Graduate School, Kangwon National University

Abstract

North Korea's iron mining industry is one of the most important industrial sectors, accounting for approximately 13.8% of total exports. However, North Korea has insufficient investment in mining infrastructure, which can result in poor productivity and a limited response to accidents. Therefore, the importance of monitoring and continuously researching mineral resources in North Korea is significant. In this study, we estimate resource movement, calculate surface displacement for Musan Mine, and analyze the mine's time series surface activity using various remote sensing techniques.

The directions of this paper are largely divided into two parts. First, we use multi-period elevation information to estimate iron ore production and waste rock accumulation from the development stage of Musan Mine to the most recent point. Second, the time series surface displacement of Musan mine is calculated using the Persistent Scatterer Interferometric SAR (PSInSAR) technique. Finally, the two results will be linked to discuss the quantitative relationship between accumulation and ground subsidence.

Before observing ground subsidence, we attempted to identify areas where mining and accumulation activities occurred and estimated the amount of resource

movement. Access to Musan Mine is limited, resulting in a lack of field data. Therefore, in this study, altitude information from 2000 to 2015 was collected using two InSAR DEMs: Shuttle Radar Topography Mission 1 sec HGT (SRTM) and Copernicus 30m global DEM. However, since the development of Musan Mine began in earnest in 1935, it was judged that conducting a sufficient analysis using only relevant data would be difficult. Therefore, the Joseon topographic map produced in 1918 was digitized and converted into a DEM. As a result, approximately 100 years of elevation information was obtained, and mining and accumulation amounts were estimated. At Musan Mine, about 1.37 billion tons of iron ore were mined from the beginning of development, and about 1.06 billion tons of waste rock were accumulated.

PSInSAR was performed by collecting Sentinel-1 SAR satellite images for about 5 years from 2017 to 2021. In the process, to acquire a sufficient amount of PSs to analyze surface displacement, Time Segmented PSInSAR (TS-PSInSAR) was introduced, dividing the temporal range of the InSAR stack size by 1 year, resulting in approximately 8 times more PS than 5 years of PSInSAR. Analysis was performed by converting the displacement obtained in the Line of Sight (LOS) direction into vertical and horizontal displacements in the east-west direction. The cumulative displacement of Musan Mine acquired over 5 years is up to approximately 730 mm in the east storage area, indicating the largest level of vertical settlement in the study area.

As a result of a comprehensive analysis of the two-dimensional displacement and multi-temporal elevation change derived through PSInSAR, it is estimated that the size of the vertical displacement is affected by various factors such as the amount of waste rock accumulated and the time when the waste rock was accumulated. The more waste rock is piled up, the greater the vertical displacement occurs, and as the longer the waste rock is piled up, the ground stabilizes, and the displacement tends to weaken. The direction of horizontal displacement depends on the waste rock pile-up pattern. When waste rock is buried in an area that was previously a valley, the direction of horizontal displacement is

toward the center of the valley. On the other hand, when waste rock is piled up on a natural slope, the horizontal displacement tends to follow the direction of the slope, and the angle of the displacement vector with respect to the vertical axis appears to follow the angle of repose over time.

keywords

SAR, PSInSAR, DEM, change detection, open-pit mine, surface displacement