



Article

Sentinel-1 InSAR 긴밀도 영상을 이용한 3월5일청년광산의 지표 변화 탐지

문지현 ¹⁾ · 김근영²⁾ · 이훈열 ³⁾ †

Surface Change Detection in the March 5 Youth Mine Using Sentinel-1 Interferometric SAR Coherence Imagery

Jihyun Moon ¹⁾ · Geunyoung Kim²⁾ · Hoonyol Lee ³⁾ †

Abstract: Open-pit mines require constant monitoring as they can cause surface changes and environmental disturbances. In open-pit mines, there is little vegetation at the mining site and can be monitored using InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) coherence imageries. In this study, activities occurring in mine were analyzed by applying the recently developed InSAR coherence-based NDAI (Normalized Difference Activity Index). The March 5 Youth Mine is a North Korean mine whose development has been expanded since 2008. NDAI analysis was performed with InSAR coherence imageries obtained using Sentinel-1 SAR images taken at 12-day intervals in the March 5 Youth Mine. First, the area where the elevation decreased by about 75.24 m and increased by about 9.85 m over the 14 years from 2000 was defined as the mining site and the tailings piles. Then, the NDAI images were used for time series analysis at various time intervals. Over the entire period (2017-2019), average mining activity was relatively active at the center of the mining area. In order to find out more detailed changes in the surface activity of the mine, the time interval was reduced and the activity was observed over a 1-year period. In 2017, we analyzed changes in mining operations before and after artificial earthquakes based on seismic data and NDAI images. After the large-scale blasting that occurred on 30 April 2017, activity was detected west of the mining area. It is estimated that the size of the mining area was enlarged by two blasts on 30 September 2017. The time-averaged NDAI images used to perform detailed time-series analysis were generated over a period of 1 year and 4 months, and then composited into RGB images. Annual analysis of activity confirmed an active region in the northeast of the mining area in 2018 and found the characteristic activity of the expansion of tailings piles in 2019. Time series analysis

Received June 8, 2021; Revised June 22, 2021; Accepted June 22, 2021; Published online June 28, 2021

¹⁾ 강원대학교 지구물리학과 박사과정생 (PhD Student, Department of Geophysics, Kangwon National University)

²⁾ 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임 연구원 (Senior Researcher, Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

³⁾ 강원대학교 지구물리학과 정교수 (Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University)

† Corresponding Author: Hoonyol Lee (hoonyol@kangwon.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

using NDAI was able to detect random surface changes in open-pit mines that are difficult to identify with optical images. Especially in areas where in situ data is not available, remote sensing can effectively perform mining activity analysis.

Key Words: Sentinel-1, SAR, InSAR coherence, Open-pit mine, March 5 Youth Mine, NDAI

요약: 노천 채광을 수행하는 광산은 지표 변화와 환경 교란을 발생시킬 수 있기 때문에 지속적인 모니터링이 필요하다. 노천 광산은 채광 작업장에 식생이 거의 분포하지 않아 InSAR 긴밀도 영상을 이용한 모니터링이 가능하다. 본 연구는 최근 개발된 InSAR 긴밀도 영상 기반의 Normalized Difference Activity Index(NDAI)를 적용하여 광산에서 발생하는 활동을 분석하였다. 3월5일청년광산은 2008년 이후 본격적으로 개발이 확장된 북한의 광산이다. 3월5일청년광산을 촬영한 12일 간격의 Sentinel-1 SAR 영상을 이용하여 획득된 InSAR 긴밀도 영상으로 NDAI 분석을 진행하였다. 우선 2000년부터 약 14년간 발생한 75.24 m의 고도 하강 지역과 약 9.85 m의 고도 상승 지역을 채광 작업장 및 광미 적치장으로 정의하였다. 이후 NDAI 영상을 이용하여 기간별 활동 분석을 진행하기 위해 전체 기간의 평균 영상, 1년 단위의 평균 영상, 및 4개월 단위의 평균 영상을 제작하였다. 2017년부터 2019년까지 광산 활동은 평균적으로 채광 작업장의 중심에서 비교적 활발하였다. 보다 자세한 광산의 활동 변화를 확인하기 위해 시간 간격을 좁혀 1년간의 활동을 알아보려고 하였다. 2017년은 지진과 자료의 정보와 NDAI 영상을 이용하여 인공 지진의 발생 시점과 그 전후에 대하여 RGB 합성 영상을 제작하고 채광 작업장의 활동 변화를 분석하였다. 2017년 4월 30일 발생한 대규모 발파 이후 채광 작업장의 서쪽에서 활발한 활동이 감지되었다. 9월 30일의 두 차례의 발파 이후에는 채광 작업장의 크기가 확장된 것으로 추정된다. 2018년 및 2019년의 활동 변화는 4개월 단위의 시간 평균 영상을 RGB 영상으로 합성하여 분석하였다. 연도별 활동을 분석한 결과, 2018년은 채광 작업장의 북동쪽에서 활발하게 활동하는 영역을 찾을 수 있었으며, 2019년은 광미 적치장에서 확장에 따른 특징적인 활동이 확인되었다. NDAI를 이용한 시계열 분석으로 광학 영상으로는 확인하기 어려운 노천 광산의 무작위적인 지표 변화를 탐지할 수 있었다. 특히 현장 자료를 획득할 수 없는 지역의 광산 활동을 원격 탐사를 이용하여 효과적으로 수행할 수 있었다.

1. 서론

광산의 모니터링은 환경 교란이나 불법 채굴 등을 확인하기 위해 다양한 방법으로 이루어지고 있다. 주로 광학 위성 영상을 이용하여 토지 피복 분류 기법을 사용하는 방법이 널리 활용되고 있으며(Charou *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012; Padmanaban *et al.*, 2017), 그밖에도 다양한 변화 탐지 기법이 사용된다(Suresh and Jain, 2013; Wang *et al.*, 2020). 특히 노천 광산 개발의 경우 지표 교란이 직접적으로 발생되어 이에 따라 야기되는 환경 문제를 감시하기 위한 연구를 지속적으로 수행할 필요가 있다.

노천 광산의 채광 작업장은 지표면에 노출되어 있으며, 채광이 진행되면 지표에서 급격한 변화가 발생하게 된다. 이러한 변화는 Interferometric SAR(InSAR) 긴밀도 영상을 이용하여 탐지할 수 있다. 위성 SAR 영상은 위성에서 직접 송수신하는 마이크로파 신호를 이용하여 획득

되기 때문에 기상 조건에 영향을 받지 않으며 주야와 관계없이 일정한 지상의 영상을 얻을 수 있다(Ferretti *et al.*, 2007). 특히 위성 SAR 시스템을 이용하면 현장 접근에 한계가 존재하는 지역을 모니터링할 수 있다. InSAR 기법은 동일한 지역에서 서로 다른 시기에 획득된 2장 이상의 SAR 영상의 공분산 상관계수(complex correlation coefficient, γ)를 이용하는 방법으로, 복소 상관계수의 진폭(amplitude)이 긴밀도(coherence, $\rho=|\gamma|$)로 정의된다(Lee, 2001). 일반적으로 간섭도(interferogram)의 질을 평가하는데 널리 활용되고 있는 긴밀도는 산란체의 후방 산란에 대한 시간적 변화와 관련된 지표면의 안정성에 대한 정보를 제공한다(Han *et al.*, 2015).

노천 광산은 지표와 가까운 곳에 위치한 광체를 채광하기 위해 표토를 걷어낸 후 광산 개발을 진행한다. 따라서 광산의 채광 작업장에 식생이 거의 분포하지 않아 InSAR 긴밀도 영상을 이용하였을 때 식생에 의한 자료 왜곡 없이 광산 활동에 의해 발생하는 표면 변화를 뚜렷

하게 탐지할 수 있다. 일반적으로 광산 표면은 활동이 나타나지 않을 때 높은 긴밀도 값을 가지고, 광산 활동이 이루어지면 지표에 무작위적인 표면 변화가 발생되고 이에 따라 해당 위치의 긴밀도 값은 낮아지게 된다.

본 연구의 목적은 지속적으로 획득되는 Sentinel-1 SAR 영상을 기반으로 하여 북한의 3월5일청년광산이 시간에 따라 얼마나 활동적인가를 분석하고자 하였다. 이를 통해 현장 접근이나 자료 획득이 제한적인 지역의 지표 변화 양상을 원격 탐사를 이용하여 효과적으로 탐지하는 방법을 제시하고자 한다. 본격적인 분석에 앞서 global DEM(Digital Elevation Model) 자료를 이용하여 광산에서 채광 작업장과 광미 적치장을 구분하였다. 이후 InSAR 긴밀도 영상에 NDAI를 적용하여 광산의 활동성을 시간에 따라 분석하였다. 2017년에는 대규모 발파로 인한 인공 지진의 발생 시점을 기준으로 광산의 활동을 분석하였고 2018년 및 2019년에는 평균 NDAI 영상을 RGB 합성하여 특징적인 변화가 나타나는 영역 및 시간에 따른 12일 간격의 NDAI 변화 그래프를 분석하였다. 2절에서는 연구 지역을 소개하고 3절에서는 본 연구에 사용된 DEM, InSAR 긴밀도 영상, 지진파 자료와 자료에 따른 분석 방법 대하여 설명하였다. 4절에서는

각 분석의 결과와 결과에 대한 토의를 기술하였다. 5절에서는 결론을 도출하였다.

2. 연구지역

북한 자강도 중강군 호화로동자구에 위치한 3월5일청년광산은 몰리브덴과 동을 채광하는 오픈 피트 광산으로 주 광종은 동으로 알려져 있다(Koh *et al.*, 2015). 광산이 세워진 것은 1960년대이나 2008년 이후 현대화 및 확장으로 크게 발전되고 있다(Joseph and Bermudez, 2015). 3월5일청년광산은 최근 개발이 활발하게 이루어짐에 따라 대규모 발파로 인한 지진파가 지속적으로 감지되는 지역이기도 하다. 해당 지역은 한국지질자원연구원 지진연구센터에서 본격적으로 한반도 북부의 지진파 분석을 시작한 1999년 이래로 인공지진원에 의한 지속적인 이벤트가 감지되었으며 특히 규모 2 이상의 지진파가 2004년부터 2018년까지 100회에 가깝게 탐지되었다. 감지된 지진파는 지진파-공중음파 융합 분석으로 지진이 아닌 대규모 발파로 인한 인공 지진에 의해 발생된 것으로 분류되었다. 실제 발생한 지진파의 발생

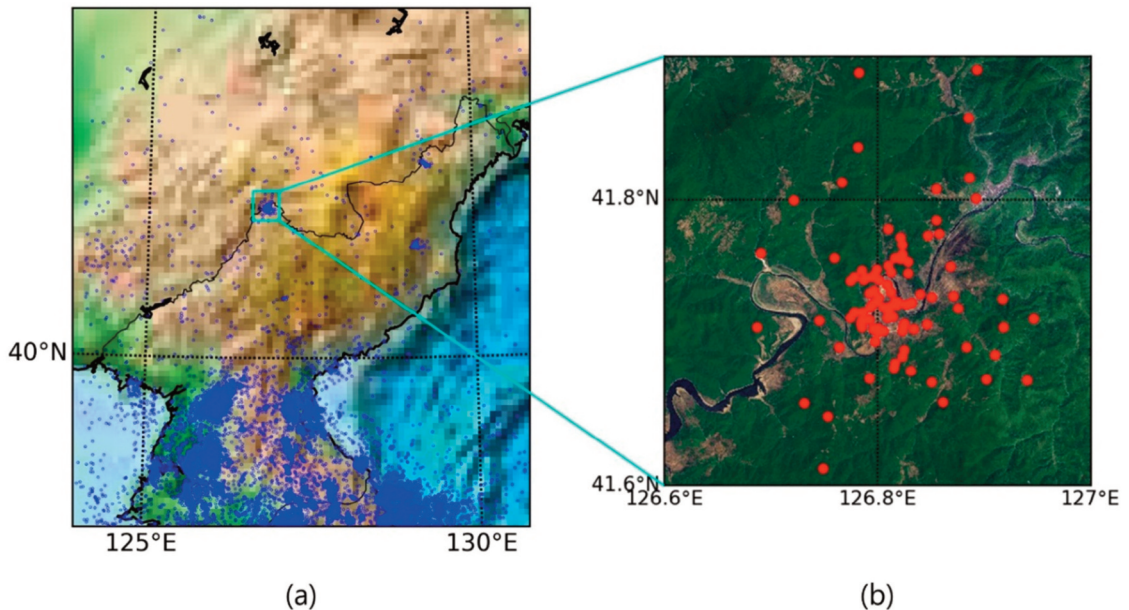


Fig. 1. Earthquake distribution map and study area. (a) Earthquakes and related events in the northern part of the Korean Peninsula since 2000 and (b) March 5 Youth Mine event distribution map. Seismic wave analysis was provided by Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Earthquake Research Center (ERC). The cyan box indicates the location of the March 5 Youth Mine and the blue and red dots indicate the epicenters.



Fig. 2. Images from Google Earth taken on (a) 13 December 2008, (b) 26 May 2013, (c) 29 April 2014, (d) 21 May 2016, and (e) 17 May 2019.

위치를 지도상에 도시하였을 때 3월5일청년광산 인근에서 집중적으로 발파가 발생하는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 이러한 대규모 발파가 꾸준히 감지되는 것을 통해 최근까지도 광산 개발이 지속적으로 진행 중인 것으로 사료된다.

Google Earth의 고해상도 영상을 이용하여 2008년 12월 13일부터 가장 최근의 2019년 5월 17일까지의 채광 작업장의 크기를 비교해 보면 광산의 규모가 급격히 변화하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2). Google Earth에서 측정된 2008년 채광 작업장의 면적은 약 0.08 km²이고 11년 후인 2019년 채광 작업장의 면적은 약 0.4 km²로 5배 가까이 면적 확장이 이루어 졌다. 또한 채광 작업장의 북쪽에서 광미 적치장이 형성되는 모습도 함께 확인할 수 있다.

3. 연구자료 및 분석방법

1) Global DEM을 활용한 광산의 고도 변화 분석

광산의 채광 작업장과 광미 적치장을 구분하고 InSAR 긴밀도 영상 획득 이전의 초기 광산 활동을 파악하기 위해 DEM 자료를 이용한 광산 분석을 진행하였다. 서로 다른 두 시기에 획득된 DEM 자료를 비교하여 고도 변화 정보를 획득하는 방법은 다양한 연구에서 활용되고 있다(Lee, 2017; Malz *et al.*, 2018; Grohmann, 2018). 본 연구는 기존에 공개된 global DEM 자료를 활용하여 고도 변화 영역을 확인하고, 단면도를 통해 DEM 자료를 비교하였다.

2000년 2월 11일부터 22일까지 데이터를 수집하여 제작된 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM 자료는 고정된 기선 거리를 유지하는 두 개의 C-band SAR 안테나를 이용하여 획득되었다(Farr *et al.*, 2007). 적도 기준 약 30 m의 해상도의 1 arc-second global DEM 자료는 USGS(United States Geological Survey)의 Earth explorer에 공개되어 있다(<https://earthexplorer.usgs.gov/>). TanDEM-X DEM 자료는 TerraSAR-X 위성과 TanDEM-X 위성이 편대비행을 하며 X-band SAR 안테나로 획득한 자료를 이용하여 제작되었다(Rizzoli *et al.*, 2017). TanDEM-X 90 m DEM 자료는 2018년 9월부터 DLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)의 EOC(Earth Observation Center)

Geoservice에서 배포되고 있다(<https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/>).

두 DEM 자료 모두 연구 지역을 포함하도록 위도 41°에서 42°, 경도 126°에서 127° 공간 범위에 대해 DEM 자료를 수집하였다. SRTM DEM 자료는 2014년 9월 23일 배포된 자료이며 TenDEM-X DEM 자료는 2011년 4월 13일부터 2014년 9월 7일까지 31회에 걸쳐 획득된 84 scene을 평균하여 2015년 6월 12일 생성된 자료이다.

본 연구의 자료처리는 ESA(European Space Agency)에서 개발하여 배포하고 있는 SNAP(SeNtinel Application Platform) 소프트웨어를 이용하였다. 두 DEM 자료의 고도 차이를 계산하기 위해 자료의 해상도가 동일하도록 이중선형 보간법을 사용하여 리샘플링하였다. 그 후 두 자료의 차를 계산하여 10년 이상의 고도 변화를 나타내는 영상을 획득하였다.

2) NDAI 영상을 활용한 기간별 지표 변화 탐지

긴밀도 영상은 Sentinel-1 SAR 영상을 이용하여 생성되었다. ESA의 Sentinel-1 위성 영상은 2014년 4월 및 2016년 4월에 각각 발사된 Sentinel-1A와 Sentinel-1B 위성을 이용하여 수집된다. 두 위성은 모두 C-band SAR 시스템을 탑재하고 있으며 동일한 궤도에서 각각 12일의 재방문 주기를 갖는다(Torres *et al.*, 2012). 본 연구는 IW(Interferometric Wide-swath) 모드로 획득된 SLC(Single Look Complex) 자료를 사용하였다. 2017년부터 2019년 사이 3월5일청년광산을 포함하는 descending track의 SAR 영상 82개는 모두 Sentinel-1B 위성으로 얻어졌으며 Copernicus Open Access Hub(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) 및 ASF(Alaska Satellite Facility, <https://search.asf.alaska.edu/#/>)에서 확보할 수 있다.

긴밀도 영상 제작에는 12일 간격의 VV 편파 SAR 영상 쌍(pair)이 이용되었다. SNAP 소프트웨어를 사용하였으며 Master와 slave 영상에 각각 정밀 궤도 정보를 업데이트 한 후 coregistration 과정을 거쳐 InSAR 기법을 적용하였다. 긴밀도의 window size(range × azimuth)는 7 × 2로 설정하여 긴밀도 영상의 해상도는 range와 azimuth 방향 모두 약 40 m가 되도록 하였다. 이후 deburst, 필터링과 지형 보정을 순차적으로 수행하였고, 최종적으로 12일 간격의 긴밀도 영상 83개가 제작되었다. Master 영상의 획득 날짜를 기준으로 제작된 긴밀도 영상을 연도별로

분류하면 2017년 28개, 2019년 29개, 2020년 26개로 나눌 수 있다.

광산의 활동을 분석하기 위해 Moon and Lee (2021)에서 제안된 NDAI(Normalized Difference Activity Index)를 InSAR 긴밀도 영상에 적용하였다. NDAI는 다음과 같은 수식으로 정의된다(Moon and Lee, 2021).

$$NDAI = \frac{\rho^{stable} - \rho^{target}}{\rho^{stable} + \rho^{target}} \quad (1)$$

공간 평균을 통해 계산된 안정한 지점의 긴밀도 값 ρ^{stable} 을 정의하고 관찰 대상 영역의 긴밀도 값 ρ^{target} 과 함께 대입하면 두 긴밀도 값에 포함된 잡음을 완화할 수 있다(Moon and Lee, 2021). NDAI를 적용할 때에는 관찰 대상 영역과 안정한 지점의 위치, 지형 조건 및 산란 메커니즘이 함께 고려되어야 한다. Moon and Lee (2021) 연구와 마찬가지로 본 연구에서도 동일한 기상 조건의 영향을 받을 수 있도록 안정된 지점은 광산 근처에서 선택되었으며, 지형의 경사와 산란 메커니즘의 영향을 완화시키기 위해 한 포인트가 아닌 안정한 여러 지점의 공간 평균 값을 계산하여 ρ^{stable} 을 도출하였다. ρ^{stable} 값이 충분히 안정한 값을 나타내지 않아 NDAI 적용이 부적절한 27개의 긴밀도 영상은 분석에서 제외하였다. NDAI 영상은 2017년 18개, 2018년 17개, 2019년 21개로 전체 56개의 영상이 생성되었다.

획득된 영상은 잡음을 제거하여 명확한 활동 영역을 구분하기 위해 시간 평균한 후 RGB 합성을 진행하였다. 먼저 1년씩 평균 된 영상을 RGB 합성하여 3년간의 활동을 알아보고자 하였고, 한 해 동안 특징적인 활동이 감지되는 영역을 보다 자세하게 분석하기 위해서 4개월씩 평균 된 영상을 합성하여 1년간의 활동을 알아보고자 하였다. 1년간의 활동을 확인할 수 있는 NDAI 합성 영상은 활동의 변화를 명확하게 확인하기 위해 항상 활동하는 지역의 white 픽셀을 제거하였다. 추가로 해당 영상에서 특징적인 색상이 나타나는 지점에 대하여 1년간의 NDAI 변화를 그래프로 도시하였다. 지점별 NDAI 변화 그래프를 통해 각 지점의 활동이 상대적으로 활발해지는 시기 및 안정화되는 시기를 확인할 수 있다.

3) 지진파 감지 시점의 지표 변화 탐지

한국지질자원연구원 지진연구센터에서 감지된 인공지진원에 대한 지진파 자료의 정보를 이용하여 발파

Table 1. Seismic events used in the study

Time	Longitude (°)	Latitude (°)	Depth (m)	Magnitude (M_L)
2017-04-30 05:05:51	126.7998	41.7105	2.0	2.7
2017-09-30 06:47:30	126.7314	41.6582	0	2.5
2017-09-30 07:43:56	126.8320	41.7282	0	2.8

에 의한 지표 변화를 탐지하였다. 지진파 자료 중 지진파 발생 시점이 NDAI 영상에 포함되어 있는 자료를 선별하여 분석하였다. 2017년부터 2018년까지의 자료 중 2017년에 발생한 2개의 발파 신호에 대해 발파일 전후의 지표 변화를 확인할 수 있는 12일 간격의 NDAI 영상과 그 전후 영상을 RGB로 합성하여 활동 영역을 확인하고 변화를 분석하였다(Table 1).

4. 연구결과 및 토의

1) 2015년 이전의 광산 고도 변화

2011년부터 2014년까지의 평균 고도를 나타내는 TanDEM-X DEM과 2000년의 고도를 나타내는 SRTM

DEM 자료의 차이를 확인해 보면(Fig. 3(a)), 광산의 채광 작업장 중심부의 북서쪽 방향에서 최대 약 75.24 m의 고도 감소와 광산 주변부에서 최대 약 9.85 m의 고도 상승이 나타났다. 고도의 감소는 광물을 채광하면서 낮은 심도까지 도달하게 되는 광산 활동의 결과로 발생되었고, 고도 상승은 광미를 적치하면서 발생된 것으로 볼 수 있다. 따라서 고도가 감소한 지역은 채광 작업장으로, 고도가 상승한 지역은 광미 적치장으로 정의할 수 있다. DEM 자료와 정확하게 일치하는 기간은 아니지만 가장 과거의 Google Earth 고해상도 영상(Fig. 2(a)) 및 TanDEM-X DEM 획득 시기의 Google Earth 영상(Fig. 2(c))을 참고하면 더욱 정확하게 채광 작업장의 영역이 확장되는 모습과 광미 적치장이 형성되는 모습을 확인할 수 있다. SRTM이 획득되는 시기의 Google Earth 영

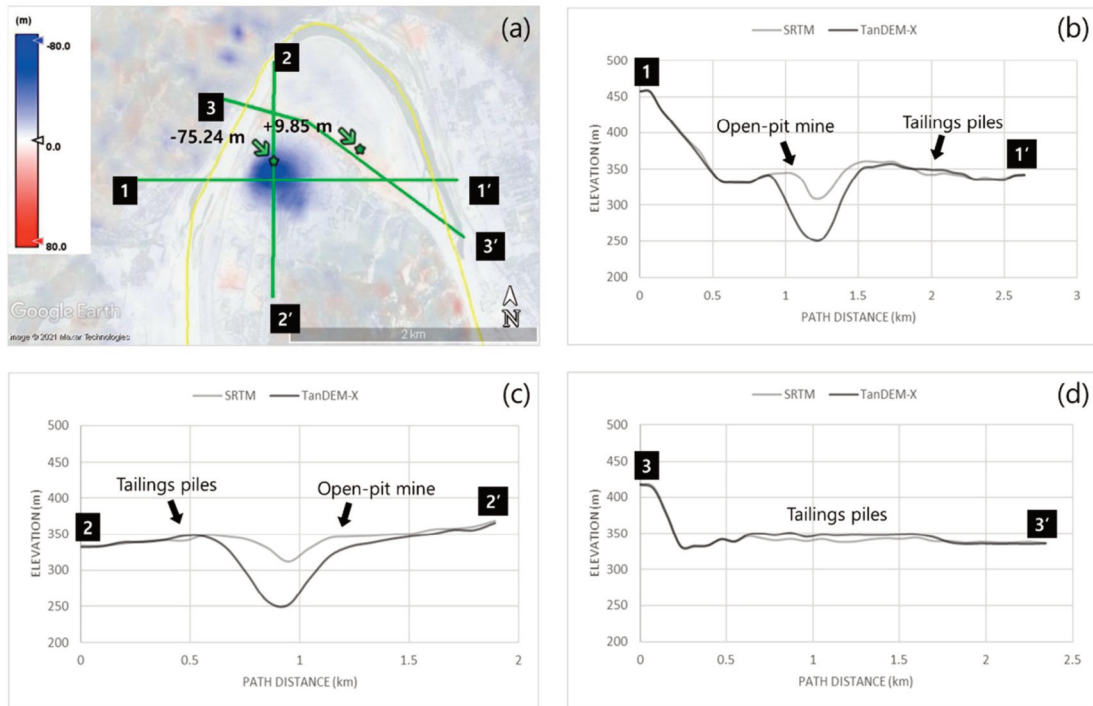


Fig. 3. (a) Result image showing elevation change and graph showing cross-sectional views for profile lines (b) 1, (c) 2, and (d) 3.

상이 존재하지 않아 획득할 수 있는 가장 과거의 고해상도 영상을 참고하였다.

두 DEM 자료를 직관적으로 비교하고자 단면도를 확인하였다(Fig. 3(b)-(d)). 채광 작업장의 중심을 지나도록 동서 방향과 남북 방향으로 2개의 기준선을 잡았으며, 광미 적치장의 고도 상승 영역 중심을 따라 1개의 기준선을 추가로 잡았다. 첫번째 기준선과 두번째 기준선 모두에서 중심으로 갈수록 폭이 좁아지는 오픈 피트 광산의 특징적인 형태가 잘 나타난다. 광미 적치장의 고도 상승은 채광 심도에 비해 고도 변화량은 작지만 두 단면도 모두에서 명확하게 확인할 수 있다. 세번째 기준선을 따라 확인되는 광미 적치장의 형태는 시간이 지남에 따라 동쪽으로 갈수록 평탄한 모양으로 바뀌었다.

2) 2017년 이후의 광산 지표 변화

(1) 2017년부터 2019년까지의 광산 활동

광산 및 인근 지역의 지표 변화를 탐지하여 3월5일청년광산의 활동 양상을 분석하였다. 분석에 앞서 비슷한 시기의 Google Earth 영상 Fig. 2(d)와 (e)를 참고하여 광산의 표면 변화를 대략적으로 관찰하였다. 광산의 채광 작업장은 직경이 약간 커진데 반해 광미 적치장은 상당히 확대된 것을 확인할 수 있었다. Google Earth 영상으로 지표의 변화를 일부 확인할 수 있었지만 활동의 규모는 전혀 확인되지 않는다. 3년동안 획득된 NDAI 영상을 시간 평균하여 2017년부터 2019년까지의 전반적인 활동 상태를 확인하였다. NDAI는 활동성을 나타내는 지수로 지표면의 변화를 유발하는 다양한 활동을 탐지할 수 있다(Moon and Lee, 2021). Fig. 4(a)에서는 특징적인 평균 NDAI 값이 나타나는 위치를 찾을 수 있다. 변화가 전혀 나타나지 않는 건물 등 인공구조물은 나지에서 선택된 ρ^{stable} 값보다 더 높은 긴밀도 값을 갖기 때문에 식 (1)에 따라 NDAI 값이 음수가 될 수 있다. 흐르는 강물이나 식생 지역 또는 광산 활동과 같은 인간의 활동이 이루어지는 곳에서는 비교적 낮은 긴밀도 값을 갖기 때문에 높은 NDAI 값을 갖는다.

광산의 채광 작업장을 자세히 살펴보면 광산의 중심에서 활발한 활동을 하고 있으며 주변부 중 특히 북동쪽과 남서쪽에서는 비교적 활동이 활발하지 않다. 3월5일청년광산은 2017년부터 2019년까지 중심부의 심도를 낮추기 위한 채광 활동이 주로 이루어졌다는 것을 예

상할 수 있다.

광산의 남동쪽에서는 다양한 명도의 색상 띠가 교대로 나타나는데, 이는 오픈 피트 광산의 특징인 계단식의 벤치 형태를 보여주는 것이다. 색상 띠는 지형 기복에 따라 발생하는 SAR의 특성인 shadow 효과에 의한 것으로 볼 수 있다. Shadow는 안테나가 바라보는 방향과 동일한 방향을 바라보는 경사면의 경사각이 look-angle보다 급할 경우 SAR 신호가 도달하지 않아 생기는 왜곡이다. Shadow 효과가 발생하는 영역에서는 낮은 긴밀도 값을 갖게 되고 NDAI 값은 높아진다. 3월5일청년광산은 오픈 피트 형태의 노천광산으로 여러 개의 원형의 벤치가 계단식으로 구성된다. 목적 심도에 도달하기 위해 심도가 낮아질수록 더 작은 직경의 벤치가 개설되어 최종적으로 원뿔을 뒤집어놓은 형태를 갖는다(Yang *et al.*, 2016). 각 벤치의 bench face angle은 암석의 종류에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 55°-80° 사이이다(Nancel-Penard *et al.*, 2019). 급한 경사를 갖는 오픈 피트 광산의 특징으로 인해 광산의 남동쪽에 위치한 bench face에서는 shadow 현상이 발생할 수 있다. 따라서 이 영역은 NDAI 값을 비교하여 활동성을 정의할 수 없고 shadow 영역에 따라 활동 위치만 정의하도록 유의해야 한다.

광미 처분장에서는 덩핑이 이루어지면서 만들어진 사면에서는 낮은 NDAI 값이 나타난다. 안정해진 사면에서는 더 이상의 활동이 발생하지 않아 NDAI 값이 낮게 나타나게 된다. 사면의 형태가 희미해지는 부분도 있지만 대체로 사면에서는 어두운 색상의 픽셀들이 위치한다. 사면의 형태가 선명한 영역은 2017년 이전에 광미 더미가 안정한 사면을 이루었고 그 후 추가적인 덩핑이 이루어지지 않은 곳이다. 희미한 색상이 나타나는 영역은 일정기간에는 안정한 사면을 유지했지만 이후 처분장을 확장하고 사면을 따라 광미를 추가로 적치하면서 평균 NDAI 값이 낮아진 지역이다.

3년동안의 활동을 1년 단위로 나누어서 자세한 시기별 분석을 수행하고자 연도에 따라 분류한 영상을 각각 시간 평균한 후 RGB 색상으로 합성하였다(Fig. 4(b)). 2019년 평균 NDAI 변화 영상은 red 채널에, 2018년의 평균 영상은 green 채널에, 2017년의 평균 영상은 blue 채널에 각각 입력하여 합성 영상을 도출하였다. 합성 영상에서 2019년에만 활동이 발생하였다면 red 색상으로 나타나고 2018년만 활동하면 green, 2017년만 활동하면 blue

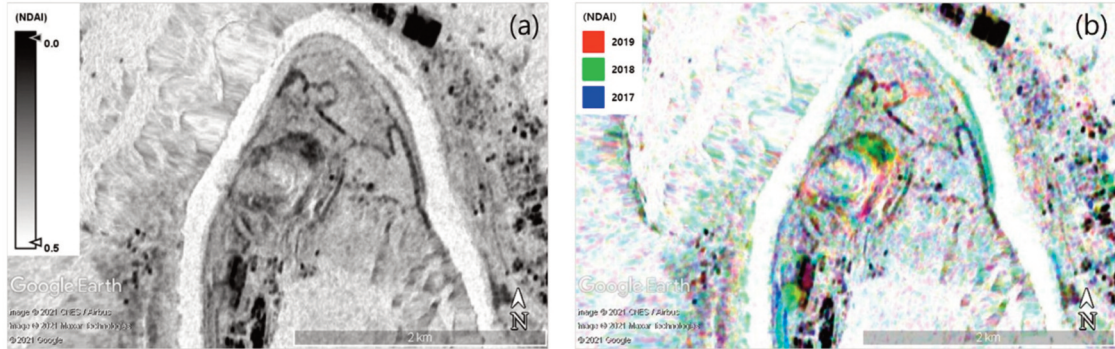


Fig. 4. (a) Averaged NDAI image during 2017-2019 and (b) RGB composite image of annual averaged NDAI images.

색상이 나타난다. Cyan, magenta, yellow 색상은 2019년, 2018년, 2017년에 각각 활동이 발생하지 않은 곳에 도시 된다.

3년간의 활동을 나타내는 RGB 합성 영상(Fig. 4(b))에서는 단일 색상의 평균 영상에서는 얻을 수 없는 정보가 나타난다. Shadow 효과 발생 위치가 시간에 따라 변화하는 모습을 확인할 수 있다. 채광 작업장의 중앙에서 바깥쪽으로 가면서 cyan, magenta, white, yellow 순서의 색상 띠가 나타나는 것으로 보아 벤치의 직경이 점차 늘어나면서 shadow 효과가 발생하는 영역의 직경도 커졌다는 사실을 알 수 있다. 그 밖에도 활동이 거의 없었다고 판단하였던 북동쪽의 영역에서 green 색상이 나타나는 것을 통해 2018년의 활동이 있었음을 알 수 있었고, 광미 적치장의 NDAI 값이 약간 높아져 흐리게 나타난 사면에서 red 색상이 나타나고 북동쪽으로도 같은 색상이 나타나는 것을 통해 적치장의 확장이 2019년에 발생한 것을 알 수 있다. (3)절과 (4)절에서 각 연도별로 군집을 이루는 두 색상을 유의 깊게 살펴보고자 한다.

(2) 2017년 광산 발파 활동

광산 인근에서 발생한 인공 지진의 발생 시점과 NDAI 영상을 이용하여 2017년에 발생한 광산 발파 이후 표면 활동 변화 양상을 분석하고자 하였다. Red 채널에 발파일을 포함하는 NDAI 영상을 입력하고, green 채널에 발파일 약 1달 전의 NDAI 영상을, blue 채널에 발파일 약 1달 후의 NDAI 영상을 입력하였다. 발파일에만 활동이 발생하였을 경우, red 색상이 나타난다. 항상 활동하는 지역의 white 색상은 제외하고 활동의 변화 양상에 대해 초점을 맞춰 분석하고자 하였다. InSAR 긴밀도를 기반으로 하는 NDAI는 지표의 무작위적인 변화를 매우 민감하게 감지하여 발파 발생 시 광범위한 영역에서 지반의 손상이 발생하기 때문에 NDAI 영상 분석으로 정확한 발파 위치를 특정하는 것은 어렵지만 영상 분석으로 광산의 활동 반경을 추정하여 광산 활동 변화 양상을 관찰하였다.

첫번째로 분석한 발파는 2017년 4월 30일 5시 5분 51분에 감지된 인공지진이다. 발파 전후의 변화를 확인할

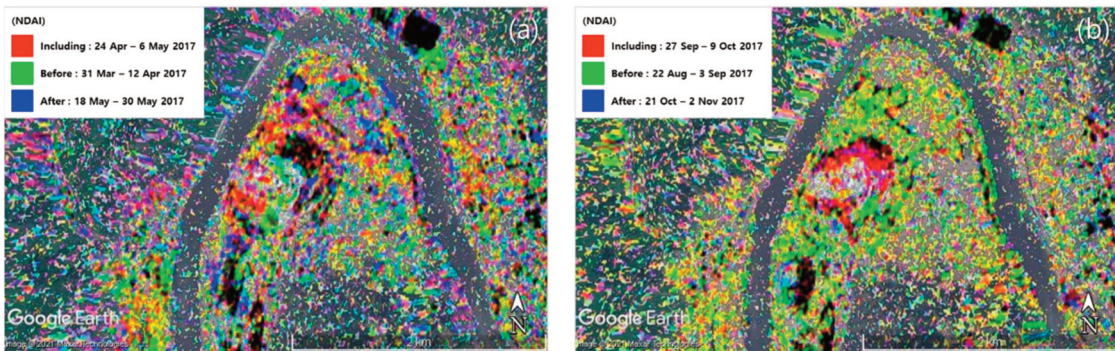


Fig. 5. Activity changes due to blasting that occurred on (a) 30 April 2017 and (b) 30 September 2017.

수 있는 2017년 4월 24일과 2017년 5월 6일의 NDAI 영상과 이전 및 이후의 NDAI 영상을 RGB 합성하여 변화를 관찰하였다(Fig. 5(a)). 발파에 영향을 받은 광산 활동은 채광 작업장의 서쪽에서 주로 발생하였다. 결과 영상을 통해 채광 작업장의 서쪽에서 대규모 발파가 발생하였으며 발파 이후 약 6일동안 적재 작업이 활발하게 이루어짐에 따라 넓은 범위에 걸쳐 활동이 나타난 것으로 예상된다.

두번째로 분석한 발파는 2017년 9월 30일 6시 47분 30초와 7시 43분 56초 2회에 걸쳐 발생하였다. 채광 작업장의 가장자리에서 red 색상으로 나타나는 2017년 9월 27일과 10월 9일 사이의 광산 활동을 확연히 구분할 수 있다(Fig. 5(b)). 가장자리 부근은 활발한 기간보다 안정한 기간이 더 긴 영역이다. 특히 작업장의 경계가 명확하게 드러나는데, 광산의 직경을 확장하는 대규모 폭발이 있었을 것으로 예상된다. 2회에 걸친 대규모 발파로

인해 적재 과정이 긴 시간 지속된 것을 magenta 색상의 픽셀 분포를 통해 확인할 수 있었다.

(3) 2018년 채광 작업장의 활동

3년간 획득된 NDAI 영상들을 모두 평균한 영상에서는 NDAI 평균 값이 급격하게 변동하는 구간에 대해 시간 정보를 찾을 수 없다. RGB 합성 영상을 이용하여 시간 정보를 찾고자 한다. 3년간의 광산 활동을 분석한 결과, 채광 작업장에서는 green 색상의 픽셀의 군집이 발견되었다(Fig. 4(b)). 해당 지역에서는 2018년 활동이 발생하였고 2017년과 2019년에는 활동이 거의 발생하지 않았다. 보다 자세한 해당 지점의 활동 시기를 파악하기 위해 4개월 간격으로 평균한 NDAI 영상들을 이용하여 2018년 한 해 동안의 활동을 나타내는 RGB 합성 영상을 제작하였다(Fig. 6(a)). 결과 영상에서는 두 가지 색상으로 명확하게 구분되어 나타났다. 북쪽에서는

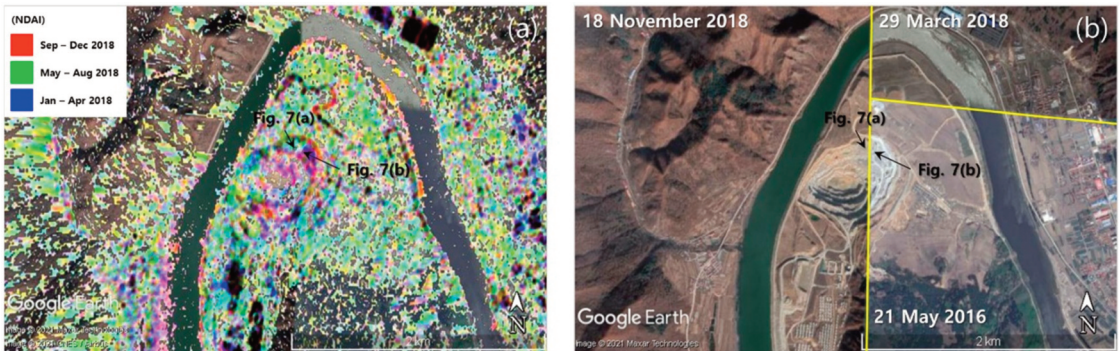


Fig. 6. (a) Activity changes of mining site in 2018 using RGB composite of the 4-months averaged NDAI images and (b) mosaic Google Earth images from 18 November 2018 (left), 29 March 2018 (top right), and 21 May 2016 (bottom right) images.

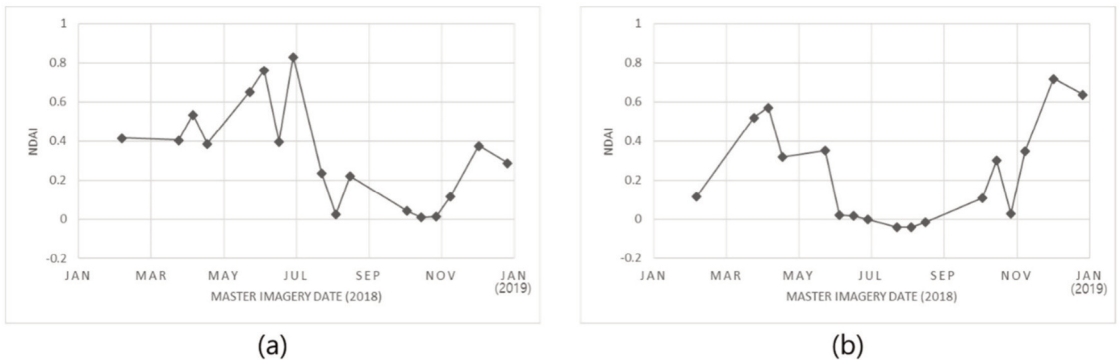


Fig. 7. Activity changes of mining site in 2018 using NDAI graph. The reference points are (a) the cyan pixel and (b) the magenta pixel at the center of each active region shown in Fig. 6.

cyan 색상이 나타났고, 동쪽에서는 magenta 색상이 나타났다. 해당 지점의 활동을 색상에 따라 분석한 결과, 2017년 1월부터 4월까지의 전체 범위에 대해 활동하였으나 5월부터 8월까지는 북쪽, 9월부터 12월까지는 동쪽에서의 활동이 더욱 활발하였다. NDAI 영상을 이용한 RGB 합성 영상을 통해 5월부터 광산 활동 영역이 시계방향으로 이동하는 모습을 확인하였다.

두 영역의 활동 변화 시기를 확인하기 위해 2018년의 NDAI 그래프를 제작하였다(Fig. 7). Cyan 색상의 픽셀에서는 6월 18일부터 30일 사이 가장 큰 NDAI 값이 나타나기 이전까지 활발한 활동이 나타나고 그 이후 비교적 약한 활동이 감지된다. Magenta 색상의 픽셀에서는 3월 이후 일시적인 활동이 나타나고 9월부터 점진적으로 활동이 활발해진다. 광산 활동 영역은 9월을 기준으로 cyan 픽셀의 위치에서 magenta 픽셀의 위치로 전환되었다.

(4) 2019년 광미 적치장의 활동

Fig. 4(b)에서 확인되는 광미 적치장의 사면은 안정하기 때문에 대체로 black에 가까운 어두운 색으로 나타나지만 중간 일부 구간에서 red 계열의 색상이 나타난다. 사면 동쪽에서도 비슷한 색상의 픽셀이 군집되어 나타나는 것으로 보아, 2019년에 동쪽으로 광미 적치장이 확장된 것을 알 수 있다. 2019년 중 해당 위치에서 활동이 가장 활발하게 나타난 시기를 찾기 위해 4개월 간격으로 평균 NDAI 영상을 제작하고 RGB 합성하여 2019년의 활동을 나타내는 NDAI 영상을 제작하였다(Fig. 8(a)). Fig. 8(a)에서는 확장이 이루어지는 영역에 cyan 색상이 나타났다. Cyan 색상은 blue 채널에 입력한 평균 영

상의 기간과 green 채널에 입력한 평균 영상의 기간 모두에서 활동이 발생하였을 경우 도시되는 색상이다. 광미 적치장의 확장은 2019년 1월부터 8월 사이에 활발하게 이루어졌고 9월 이후 적치장의 끝 부분인 white 색상이 나타나는 지점(Fig. 8(a)에서는 제거된 지점)에서만 덩핑이 발생한 것을 알 수 있었다.

활동 변화를 시계열 분석하기 위해 한 지점에 대하여 NDAI 값을 추출하고 그래프로 도시하였다(Fig. 9). Cyan 색상이 나타나는 영역의 중심에서 하나의 픽셀을 선택하고 master 영상의 획득 날짜를 기준으로 NDAI 그래프를 그렸을 때 활동이 활발해지는 시기를 보다 정확하게 파악할 수 있었다. 해당 지점은 1월부터 8월까지 항상 활발한 활동이 이루어진 것이 아니라 3월부터 7월까지 광산 활동이 비교적 활발했다. 3월 9일과 3월 21일 사이에 가장 큰 NDAI 값이 나타났으며 이후 활동은 꾸준히 감소하는 추세가 나타났다. 광미를 적치하기 시작하는 시기에 가장 활발한 활동이 감지되고 점차 덩핑 위



Fig. 9. Activity change of tailings piles in 2019 using NDAI graph. The reference point is the cyan pixel in the center of the expanded site shown in Fig. 8.

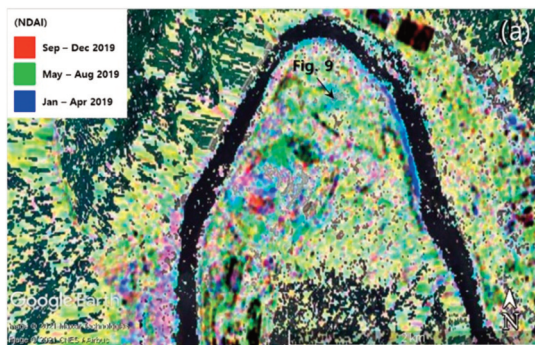


Fig. 8. (a) Activity changes of tailings piles in 2019 using RGB composite of the 4-months averaged NDAI images and (b) Google Earth image taken on 17 May 2019.

치가 옮겨가면서 활동 지수가 낮아지는 모습이 잘 표현된다.

후 결과를 발전시켜 광산의 정밀 분석 기술로 활용하고자 한다.

5. 결론

본 연구는 Sentinel-1 SAR 영상으로부터 생성된 긴밀도 자료를 이용하여 NDAI 영상을 제작하였으며 이를 통해 3월5일청년광산의 활동을 모니터링하였다. 2017년에 발생한 대규모 광산 발파로 인한 지표 변화 탐지를 통해 2017년 4월에는 채광 작업장 서쪽에서의 활동을 감지하였으며, 9월에는 광산 영역의 확장이 발생하였음을 밝힐 수 있었다. 노천 광산의 활동 변화를 탐지하기 위해 세 개의 기간으로 시간 평균한 NDAI 영상을 RGB 합성하여 시간에 따른 활동 영역의 변화 양상도 확인하였다. 2018년 1월부터 4월까지 채광작업장의 북동쪽에서 발생한 활동은 5월부터 8월에는 북쪽으로 활동 영역이 편향되었고 9월부터 12월까지 동쪽으로 활동 영역이 이동한 것을 확인하였으며, 2019년 1월부터 8월 사이에는 광미 적치장의 확장이 활발하게 이루어졌다.

NDAI 영상을 이용한 오픈 피트 광산의 표면 변화 탐지를 통해 광학위성영상으로는 확인하기 어려운 미세한 광산 표면의 활동 변화를 일정한 시간 간격으로 확인할 수 있었다. 또한 인공 지진이 발생된 시점에서의 활동 양상과 다른 시기의 활동 양상의 차이를 확인함으로써 대규모 발파가 발생하고 광산의 표면 변화가 어떻게 이루어져 왔는지 알 수 있었다. Moon and Lee (2021)을 통해 새롭게 개발된 NDAI가 다른 노천광산에서도 적용이 가능하며 활동성 분석 결과를 유리하게 이끌 수 있다는 사실을 검증하였다. 추가로 지진파 분석 결과와 함께 위성 SAR 영상의 연계 분석을 제시하였으며 이를 통한 활동 변화 탐지도 가능하다는 결론을 도출할 수 있었다. 특히 본 연구 지역은 현장방문 및 공식 자료 획득이 어려운 북한에 위치하고 있기 때문에 SAR 영상을 이용한 원격 탐사를 효과적으로 적용할 수 있었으며 ESA의 Sentinel-1 위성 SAR 영상은 주기적으로 촬영되고 있기 때문에 이를 활용하면 앞으로 지속적인 모니터링도 가능할 것이다. 자료의 공간 및 시간해상도가 좋아진다면 더 좋은 결과를 획득할 수 있을 것으로 생각한다. 추

사사

이 논문은 한국지질자원연구원 기본사업과 2021년도 한국연구재단 기본연구사업(No.2019R1A6A1A03033167, NRF-2019R1F1A1041389)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Charou, E., M. Stefouli, D. Dimitrakopoulos, E. Vasilioiu, and O.D. Mavrantza, 2010. Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources, *Mine Water and the Environment*, 29(1): 45-52.
- Farr, R.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf, 2007. The shuttle radar topography mission, *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2004.
- Ferretti, A., A.V. Monti-Guarnieri, C.M. Prati, F. Rocca, and D. Massonnet, 2007. *INSAR Principles B*, ESA publications, Noordwijk, NL.
- Grohmann, C.H., 2018. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30, *Remote Sensing of Environment*, 212: 121-133.
- Han, H., Y. Kim, H. Jin, and H. Lee, 2015. Analysis of Annual Variability of Landfast Sea Ice near Jangbogo Antarctic Station Using InSAR Coherence Images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 31(6): 501-512 (in Korean with English abstract).
- Joseph, S. and JR. Bermudez, 2015. North Korea's Expansion of Molybdenum Production, <https://www.38north.org/2015/01/jbermudez012315/>,

Accessed on May 31, 2021.

- Koh, S.M., 2015. *DB construction of mineral resources and analysis of mineralized areas in North Korea, Research report of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, JP2014-001-2015(1): 370.
- Lee, H., 2001. *Interferometric synthetic aperture radar coherence imagery for land surface change detection* (Doctoral dissertation, Huxley School, Imperial College, London 2001).
- Lee, H., 2017. Application of KOMPSAT-5 SAR interferometry by using SNAP software, *Korean Journal of Remote Sensing*, 33(6-3): 1215-1221 (in Korean with English abstract).
- Malz, P., W. Meier, G. Casassa, R. Jaña, P. Skvarca, and M.H. Braun, 2018. Elevation and mass changes of the Southern Patagonia Icefield derived from TanDEM-X and SRTM data, *Remote Sensing*, 10(2): 188.
- Moon, J. and H. Lee, 2021. Analysis of Activity in an Open-Pit Mine by Using InSAR Coherence-Based Normalized Difference Activity Index, *Remote Sensing*, 13(9): 1861.
- Nancel-Penard, P., A. Parra, N. Morales, C. Díaz, and E. Widzyk-Capehart, 2019. Value-optimal design of ramps in open pit mining, *Archives of Mining Sciences*, 64(2): 399-413.
- Padmanaban, R., A.K. Bhowmik, and P. Cabral, 2017. A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area, *ISPRS International Journal of Geo-information*, 6(12): 401.
- Rizzoli, P., M. Martone, C. Gonzalez, C. Wecklich, D.B. Tridon, B. Bräutigam, M. Bachmann, D. Schulze, T. Fritz, M. Huber, B. Wessel, G. Krieger, M. Zink, and A. Moreira, 2017. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132: 119-139.
- Suresh, M. and K. Jain, 2013. Change detection and estimation of illegal mining using satellite images, *Proc. of 2nd International conference of Innovation in Electronics and communication Engineering (ICIECE-2013)*, Andhra Pradesh, Hyderabad, IN, Aug. 9-10, pp. 246-251.
- Torres, R., P. Snoeij, D. Geudtner, D. Bibby, M. Davidson, E. Attema, P. Potin, B. Rommen, N. Floury, M. Brown, I. Navas Traver, P. Deghaye, B. Duesmann, B. Rosich, N. Miranda, C. Bruno, M. L'Abbate, R. Croci, A. Pietropaolo, M. Huchler, and F. Rostan, 2012. GMES Sentinel-1 mission, *Remote Sensing of Environment*, 120: 9-24.
- Wang, S., X. Lu, Z. Chen, G. Zhang, T. Ma, P. Jia, and B. Li, 2020. Evaluating the Feasibility of illegal open-pit mining identification using insar coherence, *Remote Sensing*, 12(3): 367.
- Yang, H., S. Kang, C. Seonwoo, M. Jang, S. Jeong, and S. Cho, 2016. *Surface Mining Engineering*, CIR, Seoul, Korea.
- Zhang, B., D. Wu, L. Zhang, Q. Jiao, and Q. Li, 2012. Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas, *Environmental Earth Sciences*, 65(3): 649-658.