



Research Article

조선지형도와 SRTM 및 Copernicus 글로벌 수치지형모델을 이용한 북한 무산광산의 채광량 및 폐석 적치량 추정

추용재 ¹⁾ · 이훈열 ^{2)*}

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

Yongjae Chu ¹⁾ · Hoonyol Lee ^{2)*}

Abstract: The Musan mine, situated in Musan County, Hamgyong Province, North Korea, stands as a prominent open-pit iron mine on the Korean Peninsula. This study focuses on estimating the mining and dumping activities within the Musan mine area by analyzing digital elevation model (DEM) changes. To calculate the long-term volume changes in the Musan mine, we digitized and converted the 1:200,000-scale third topographic map of the Joseon published in 1918 and compared with interferometric synthetic aperture radar (InSAR) DEMs, including Shuttle Radar Topography Mission DEM (2000) and Copernicus DEM (2011–2015). The findings reveal that over a century, Musan mine yielded around 1.37 billion tons of iron ore, while approximately 1.06 billion tons of waste rock were dumped. This study is particularly significant as it utilizes a historical topographic map predating the full-scale development of Musan mine to estimate a century's mining production and waste rock deposition. It is expected that this research provides valuable insights for future investigation of surface change of North Korea where the acquisition of in situ data remains challenging.

Keywords: Mining, North Korea, Digital elevation model, Change detection

요약: 함경북도 무산군에 위치한 무산 광산은 한반도의 대표적인 노천 철 광산으로 1935년부터 본격적인 채광이 이루어졌다. 본 연구에서는 지난 백 여년 동안 무산 광산 지역에서 발생한 채광량 및 적치량을 지형 고도의 변화를 통해 추정하고자 하였다. 광산의 부피 변화를 계산하기 위해 1918년에 발행된 1:200,000 축척의 조선 제3차 지형도를 디지털화(digitizing)하여 digital elevation model (DEM)화 한 후, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM (2000) 및 Copernicus DEM (2011–2015)과 비교하였다. 구해진 부피 변화에 철광석과 폐

Received September 26, 2023; Revised October 5, 2023; Accepted October 15, 2023; Published online October 31, 2023

¹⁾ 강원대학교 지구물리학과 석사과정생(Master Student, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea)

²⁾ 강원대학교 지구물리학과 교수(Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea)

* Corresponding author: Hoonyol Lee (hoonyol@kangwon.ac.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. 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.

석의 밀도와 공극률을 가정하여 질량으로 환산한 결과, 백 년 동안 약 13억 7천만 톤의 철광석이 채광되었고 약 10억 6천만 톤의 폐석이 적치된 것으로 나타났다. 본 연구는 무산 광산이 본격적으로 개발되기 이전의 자연 지형 자료를 사용함으로써 약 백 년 가량의 무산 광산의 활동을 정량적으로 산정했다는 데 의의가 있으며, 향후 자료 획득이 제한된 북한의 장기적 지형변화 탐지에 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어: 광업, 북한, 수치지형모델, 변화탐지

1. 서론

철, 금, 은, 아연 등의 광물 산업은 북한 경제에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히 2008년부터 2017년까지 북한의 철 수출액은 전체 수출액의 13.8%를 차지할 만큼 북한은 철 광산업의 의존도가 높은 편이다(Chung, 2019). 북한지하자원넷(Information System for Resources of North Korea, I-RENK; <https://www.e-ia.co.kr/sonosa/newsletter/201708/index.html>)의 북한자원 뉴스레터 2017년 여름호 발표에 따르면 북한의 철 매장량은 약 50억 톤으로 남한의 철광석 매장량의 약 135배 수준으로 추정된다. 북한은 매년 150~300만 톤의 철광석을 수출하고 있으며 남한이 연간 약 7,000만 톤 가량의 철광석을 수입하는 것과는 대조된다(Information System for Resources of North Korea, 2017).

북한의 대표적인 철 광산으로는 무산, 리원, 풍산, 허춘, 단천 광산 등이 있다. 그 중 북한 최대 규모의 철 광산은 무산 광산이다(Koh et al., 2013). 무산 광산은 한반도의 대표적인 노천 광산으로서 광체가 지표면에 드러나 있는 대규모의 광산이다. 노천 광산은 사면 안정성 저하 문제, 작업 과정에서 배출되는 분진, 오수로 인한 환경 오염 문제 및 유용한 광물들을 추출하고 남은 폐석을 사면이나 계곡, 분지 등에 적치함으로써 발생 가능성이 있는 지반 침하 문제는 오랜 기간 동안 문제점으로 지적되어왔다(Sjöberg, 1996; Shu et al., 2001; Monjezi et al., 2009; Chen et al., 2015). 특히 북한의 경우 철강 산업의 의존성이 높은 반면에 광산 및 광업 인프라의 현대화가 미비하며 전력 공급 부족, 장비의 노후화 등 광업에 대한 투자가 부족한 실정이다. 이는 향후 무분별한 개발로 인한 인적·물적 자원에 잠재적인 위협이 될 수 있다. 따라서 북한 지역 광산을 대상으로 채광량 및 적치량 등을 추정하는 것은 북한의 광업 경제 발전의 중요한 과

정 중 하나이다. 더불어 북한 자원에 대한 이해와 분석은 장기적인 관점에서 한반도의 경제적 상생과 통일 편익 등 다양한 부문에서 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다(Bae et al., 2015; Park and Joung, 2017). 다만 북한은 현장 조사 자료가 매우 제한되어있기 때문에 본 연구에서는 원격탐사를 통해 북한 무산 광산의 질량 변화를 추정하고자 한다.

광산 지역에 원격탐사기법을 적용하여 광산의 활동성과 산출량을 추정한 선행 연구 사례는 다음과 같다. Moon and Lee (2021)는 interferometric synthetic aperture radar (InSAR) coherence 기반의 활동성 지수를 통해 무산 광산 지역의 2015년부터 2020년까지의 활동성을 추정한다. Lee et al. (2022)은 digital elevation model (DEM) 변화를 통해 옥계 석회석 광산의 적치량을 산정하였으며 persistent scatterer (PS)InSAR 기법을 이용해 시계열 변위를 추정하였다.

또한 본 연구와 유사한 선행연구로서 Bae et al. (2015)은 1976년 구 소련에 의해 제작된 1:50,000 지형도 및 2007년 SPOT-5 영상기반으로 제작된 수치지형도를 이용해 30년 동안의 무산 광산 일대의 자원량 및 생산량을 추정한다. 이에 반하여 본 연구에서는 기존 연구에서 다루지 않은 무산광산 개발 초기부터 현재까지 백여 년 간의 광산 활동을 정량적으로 추정하기 위하여 1918년 발행된 조선지형도와 2000년 및 2011~2015년에 제작된 두 개의 InSAR DEM을 이용하고자 한다. 본 논문의 2절에서는 무산 광산의 소개 및 각 DEM과 조선지형도에 대한 정보를 제공한다. 3절에서는 종이지도를 디지털화하여 DEM화 하는 과정을 설명하며, 세 가지 시점의 DEM 간의 고도 변화를 통해 시기별 폐석 적치량과 철광석 채광량을 산출하였고 그에 대한 분석과 토의 내용을 4절에서 설명한다.

2. 연구지역 및 자료

2.1. 연구지역

북한 함경북도 무산군 무산읍에 위치한 무산광산(129° 15′ 21″E, 42° 14′ 05″N)은 한반도에서 가장 큰 규모의 노천 철광산이다. 원광 품위는 약 25~35%, 선별 품위는 최대 65%까지 상승하는 것으로 알려져 있다(Bae et al., 2015). 무산 광산은 북한 내 최대 철광석 생산지이며 북한에서 생산하는 철광석의 약 70%는 무산광산연합기업소에 집중되어 있다(Park and Joung, 2017). 최신의 Google Earth 광학 위성을 통해 계산된 무산 광산은 넓이는 약 6.7 km²이다. 중앙에 채광장을 기준으로 적치장이 사방으로 둘러싸고 있다. 아래 Fig. 1은 무산 광산의 위치와 전경을 보여준다.

2.2. 연구자료

2.2.1. 수치지형모델

DEM은 수목 및 인공구조물 등을 제외하여 순수한 지형의 고도 정보를 수치화한 래스터(raster) 데이터로 지형의 높낮이를 나타내는데 사용된다. 래스터 데이터의 장점은 다양한 공간 연산이 가능하며 정보의 시각화가 간편하며 픽셀 기반의 데이터 처리 방식을 통해 특

정 위치의 데이터의 추출 및 분석이 용이하다는 점이다. 래스터 데이터인 DEM을 활용한 고도 변화, 경사도 등의 지형 분석은 여러 분야에서 널리 사용되고 있다 (James et al., 2012; Mora et al., 2018). 대표적인 DEM 제작 방식으로 서로 다른 시기에 촬영된 한 쌍의 SAR 영상 간의 간섭도를 통해 고도 정보를 획득하는 InSAR DEM 이 있다.

본 연구에서는 InSAR DEM인 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM, Copernicus 30 m global DEM을 사용하였다(Fig. 2). SRTM DEM은 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration)과 미국 국가지리정보국(National Geospatial-Intelligence Agency)의 합작 프로젝트를 통해 2000년 2월 11일부터 총 12일 동안 획득된 Endeavor 우주왕복선의 C-band InSAR 데이터를 기반으로 생성된 DEM이며, 공간해상도는 1-arc second로 약 30 m이다(Earth Resources Observation and Science Center, 2018). Copernicus DEM은 유럽 우주국(European Space Agency)에서 운영 및 제공하는 InSAR DEM으로 X-band 기반의 TanDEM-X 미션을 통해 2011년부터 2015년 사이에 데이터가 획득되었다. 본 연구에서는 30 m global 모델을 사용하였다(AIRBUS, 2022). 두 자료 모두 오픈소스로 제공받을 수 있으며 오픈토포그

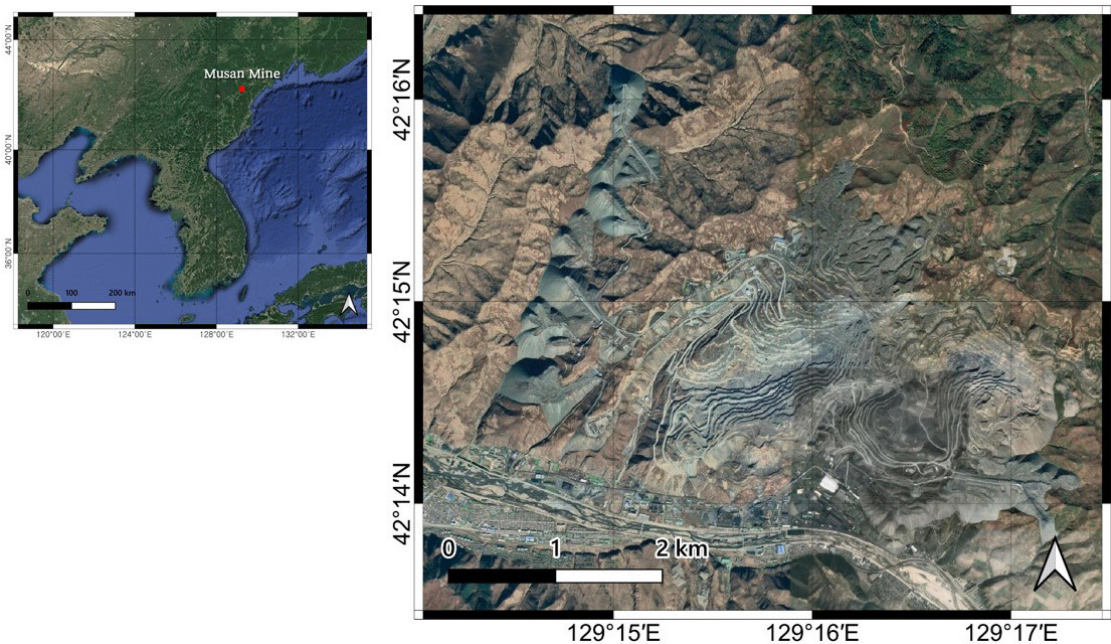


Fig. 1. The location and a Google Earth image of the Musan mine.

래피(OpenTopography) 홈페이지(<https://opentopography.org/>)에서 무상으로 제공 받을 수 있다.

2.2.2. 조선 제3차 지형도

연구 지역인 북한은 공개자료의 획득이 매우 제한적이다. 위에서 소개된 InSAR DEM은 글로벌 DEM이지만, 최대 15년간의 고도 차이만 이용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공개 DEM 이외의 추가적인 지형 정보를 획득하기 위해 한반도의 과거 지형도를 수집하였다. 본 연구에서 수집한 무산 지역 지형도는 두 가지이다. 국토지리정보원의 국토정보플랫폼(<https://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do>)에서 획득한 1:50,000 축척의 지형도(무산 도엽, 진화동 도엽)와 국립중앙박물관 소장 조선총독부박물관 문서(<https://www.museum.go.kr/modern-history/main.do>)에서 획득한 1:200,000 지형도(회령 도엽)가 있다(Fig. 2). 두 지도 모두 1918년에 발행된 조선 제3차 지형도로서, 1:200,000 지형도는 영인본으로 원본인 1:50,000 지형도를 바탕으로 제작된 것으로 추정된다(Park, 2019). 그러나 1:50,000 지형도는 연구 지역인 무산광산의 동쪽 적치장과 채광장 일부에 해당하는 진화동 도엽에만 20 m 간격의 등고선 자료가 남아있고, 연구 지역의 서쪽인 무산 도엽은 등고선이 없고 지형의 높낮이가 개략적으로 채색된 조선교통도의 형태로만 남아있다.

전체 연구 지역의 등고선이 남아있는 것은 1:200,000 지형도가 유일하기 때문에, 비록 등고선 간격이 50 m로 정밀도는 떨어지지만 자료의 연속성으로 인해 이를 이용할 수밖에 없었다. 이 지형도를 아래에 기술한 방법으로 지오코딩(geocoding)하고 등고선을 디지털화하여 부정삼각망네트워크(triangulated irregular network, TIN) 보간을 통해 래스터 자료로 DEM화 하였다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 DEM 간의 차분을 통해 획득한 고도 변화량을 이용해 체적 변화량을 산출하고 최종적으로 약 백 년 간의 철광석 채광량과 폐석 적치량을 계산하고자 한다. 1918년에 발간된 1:200,000 조선지형도는 이미지 형태로 되어 있어서 이를 디지털화하고 고도 보정을 하여 DEM의 형태로 만들었고, 이를 2000년에 얻어진 SRTM DEM 및 2011-2015년에 얻어진 Copernicus DEM과 차분하여 부피 변화를 계산하였다.

먼저, 이미지 형태의 조선지형도를 DEM화 하는 과정이 필요하다. 지형도에서 얻어진 투영 정보와 좌표 정보를 바탕으로 개략적으로 지오코딩하여 EPSG:3857 (WGS84/ Pseudo-Mercator) 좌표계로 재투영하였다.

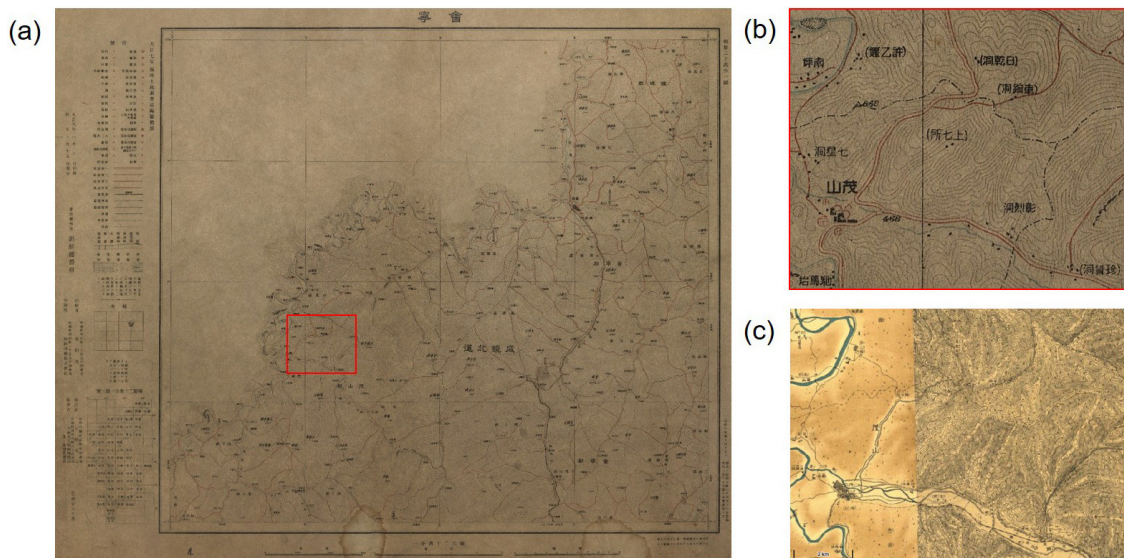


Fig. 2. Historical map of the study area published in 1918. (a) Historical topographic map of Hoeryeong, 1:200,000 scale with 50 m contours. (b) Musan mine area in the red box in (a). (c) 1:50,000 scale historical map of the same area as (b) where 20 m contours are only available on the right (Jinwhadong map) and none on the left (Musan map).

Bessel 측지계의 오차를 보정하기 위하여 최근의 Google Earth 광학 위성 영상과 비교하여 과거와 현재의 능선 및 계곡선을 참조하여 비교적 변화가 없는 15개의 지상 기준점(ground control point, GCP)을 설정하였다. 정밀도 검증을 위하여 1:200,000과 1:50,000 두 가지 축척의 지형도를 모두 지오코딩한 후 비교하고 추가로 GCP를 설정하여 보정하였다. 지오코딩 된 1:200,000 지형도를 디지털화 하여 등고선을 벡터(vector)로 추출하였다. 이때 등고선 간격은 50 m이며, 등고선의 높이는 무산광산 남쪽의 평지에서 측정한 SRTM 및 Copernicus DEM의 고도 값을 기준으로 최저 지점의 높이를 결정하여 Bessel 준거타원체의 오차를 보정하였다. 벡터 형태로 획득한 등고선에 TIN 보간을 수행하여 최종적으로 1918년 지도 발간 당시의 추정 DEM을 획득하였다. 모든 자료 처리는 오픈소스 지리정보시스템 소프트웨어인 Quantum Geographic Information System (QGIS)을 이용하여 수행하였다.

이를 비교적 최근에 획득한 SRTM DEM과 Copernicus DEM과 비교하여 시간 순서로 인접한 DEM 간의 래스터 연산을 통해 고도 변화량을 산출하였다. 이 과정에서 광산 활동이 발생하지 않은 지역, 즉 고도 변화가 없어야 할 지역에서 최근 지점의 DEM과 조선지형도 DEM 간의 일정한 고도 차이가 존재하는 것을 발견하였다. 무산군 일대는 광산을 제외하고 거의 산간지역으로 광산이 아닌 다른 지역에서는 고도 변화가 발생할 메커니즘이 없다. 과거 Google Earth 영상을 확인한 결과, 1985년부터 현재 시점까지 광산 이외의 지역에 지표 활동이 전혀 발견되지 않았다. 또한 이 지역들에 대해 SRTM 및 Copernicus DEM 간의 차분 값은 거의 0에 가깝게 나타났기에 이를 전제로 과거로부터의 고도 변화가 거의 없을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 오차는 조선지형도 자체의 낮은 정밀도, DEM 제작 방법 차이, 지오코딩 오차 등의 다양한 원인에 의한 것으로 추측된다. 비변화 지역에서 나타나는 오차는 광산 지역에서 발생하는 고도 변화량 해석에도 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 이러한 오차를 보정하기 위해 몇 가지 후처리를 수행하였다. 먼저, SRTM과 Copernicus DEM change 결과에서 광산 지역을 제외한 비변화지역에 대한 평균 고도를 획득하였다. 이후 조선지형도 DEM과의 차이의 평균을 계산하여 비변화 지역에서의 수직 오차를 추정하였다. 최종

적으로 조선지형도 DEM의 고도를 해당 오차만큼 낮추어 보정하였다.

그 후, QGIS 소프트웨어의 volume calculation tool을 통해 각 시기별로 채광 및 적치로 인해 발생한 체적 변화량을 산출하였다. 체적 변화량은 암석의 밀도와 공극율을 추정하여 질량으로 환산해 채광량 및 적치량을 산정할 수 있다. 질량으로 환산한 채광량(M_{mine}) 및 적치량(M_{dump})의 산정은 다음 식(1) 및 (2)를 따른다.

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

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

무산 광산은 중국 북동부에 위치한 안산층과 동일한 암상으로 간주되며, 안산층 광석의 평균 밀도를 통해 무산 광산 일대의 평균 밀도(ρ_{mine})를 3.4 g/cm^3 로 추정하였다(Bae et al., 2015). 해당 밀도와 채광지 체적 변화량(V_{mine})을 이용하여 최종적으로 채광량(M_{mine})을 산출하였다. 적치되어 버려지는 폐석은 주로 유용한 광물을 뽑아내고 남은 암석 덩어리로 함철 광물보다는 밀도가 낮을 것으로 추정된다(Bae et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 적치량 산정 과정에서 지각 평균 밀도(ρ_{crust}) 2.7 g/cm^3 를 적용하여 적치장 체적 변화량(V_{dump})과 함께 계산하였다. 그 과정에서 적치된 폐석 터미에 인위적인 압착 과정이 진행되지 않았다는 가정하에 공극율(n)을 추가로 고려해야 한다. 그러나 연구 지역인 북한에서의 현장 조사가 불가능하며, 공개된 자료 역시 부족한 편이므로 본 연구에서는 공극율을 30%로($n=0.3$) 설정하여 적치량을 산정하였다(Bae et al., 2015; Lee et al., 2022).

4. 연구결과 및 토의

4.1. 시기별 DEM과 고도 변화

Figs. 3(a-c)는 Copernicus DEM, SRTM DEM 그리고 1918년 조선지형도를 이용하여 만든 DEM이고, Fig. 3(d)는 DEM끼리 차분하여 고도 변화가 발생한 부분을 시기별로 색을 달리하여 나타낸 그림이다. 또한 DEM change를 통해 고도 변화가 발생한 지역과 현재 시점의 Google Earth 광학 영상에서 식별되는 적치장 및 채광장의 모습을 종합적으로 참조하여 각 적치장과 채광장의 경계를 구분하였다.

Fig. 3(d)에서 녹색으로 표시된 영역은 1918년부터 2000년 사이(1 시기)에만 적치가 진행된 지역을 나타내며, 적색은 2000~2015년 사이(2 시기)에만 적치가 진행된 지역이다. 검은색으로 표시된 영역은 두 시기 모두 적치가 이뤄진 지역을 의미한다. 청록색으로 표시된 영역은 1 시기에만 채광으로 인해 고도 감소가 나타난 영역이며, 자주색은 2 시기에만 채광이 진행된 영역을 의미한다. 파란색으로 표시된 영역은 두 시기 모두 채광이 진행된 영역이다.

Fig. 4는 각 영역별 DEM 단면도를 나타낸다. 조선지형도 DEM을 SRTM 및 Copernicus DEM과 비교했을 때, 비

변화 지역에서 최근 시점 DEM보다 고도가 더 높게 나타남을 발견하였다. 순수한 광산 활동에 의해서만 고도 변화가 나타나도록 조선지형도 DEM의 보정을 수행하였다. 비변화 지역의 DEM change의 오차는 평균적으로 약 47.6 m로 나타났으며, 이는 조선지형도의 정확도가 등고선 한 개 정도의 오차를 포함할 수 있음을 암시한다. 따라서 조선지형도 DEM의 고도를 47.6 m만큼 전반적으로 낮춰 보정하였다. 그 결과, 광산 활동에 의한 고도 변화만 남고 활동성이 없는 지역은 SRTM 및 Copernicus DEM의 고도와 비슷하게 나타나도록 보정되었다.

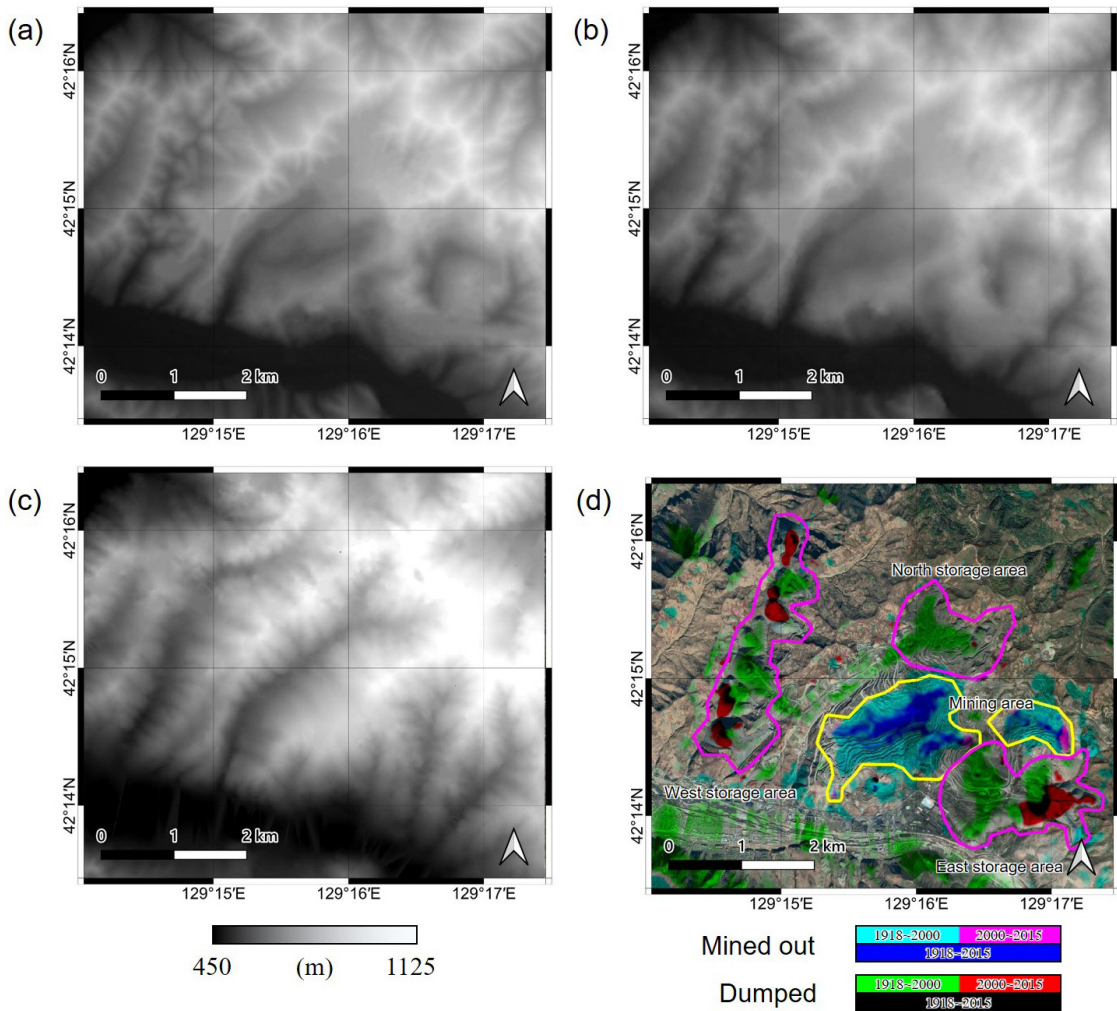


Fig. 3. The DEMs used in this study. (a) Copernicus DEM (2011–2015). (b) SRTM DEM (2000). (c) 1918 DEM derived from a historical map. (d) Color-coded DEM changes of mining sites (yellow polygons) and dumping sites (magenta polygons).

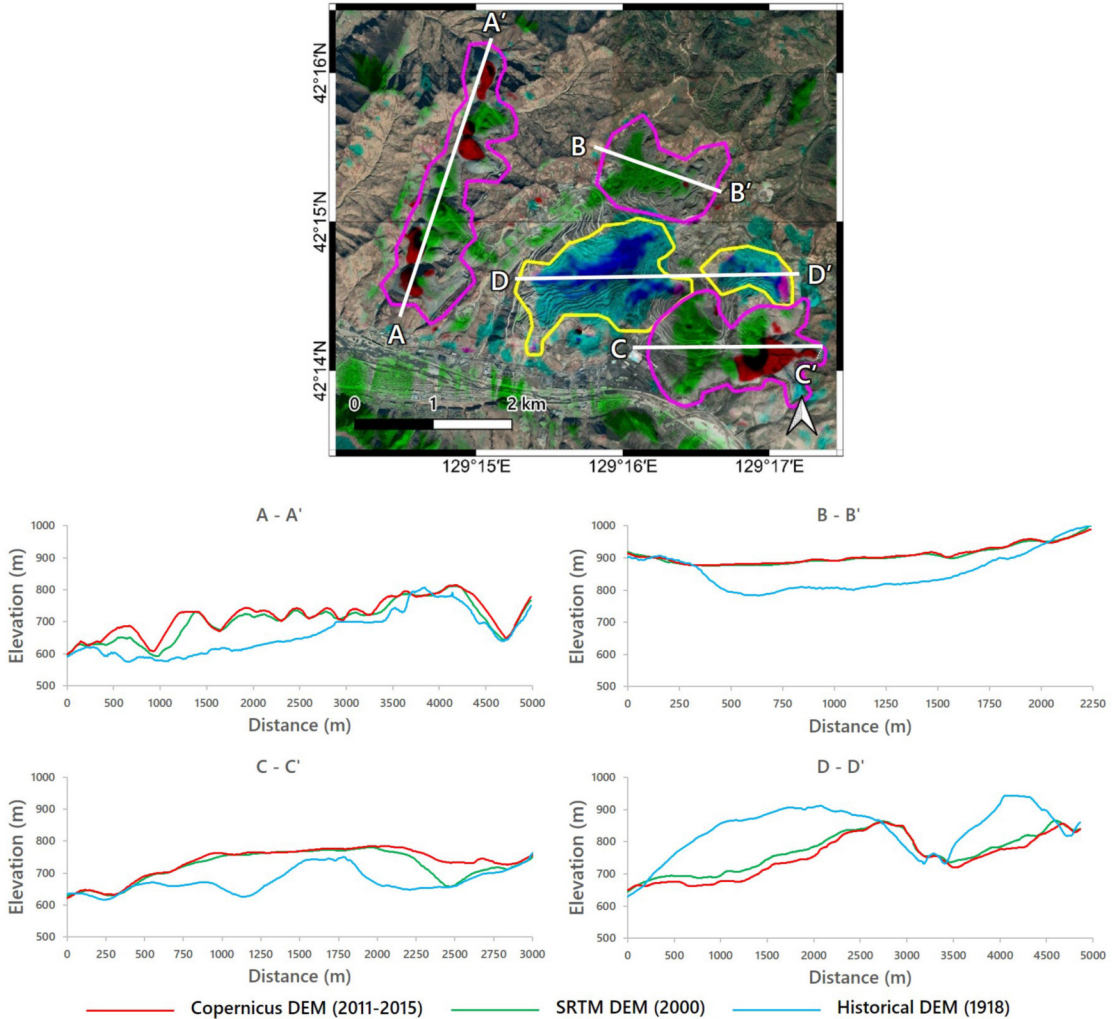


Fig. 4. Each area is represented by a DEM cross-section, where the Copernicus DEM is shown in red, the SRTM DEM in green, and the historical DEM in blue, with each corresponding to its respective profile.

4.2. 적치장 고도 변화

서쪽 적치장은 남북으로 길이 약 4 km, 너비 약 0.5 km로 좁고 긴 모양으로 적치장이 형성되어 있다. 적치장을 북쪽에서부터 세 부분으로 분할하여 북쪽은 1 시기에 최대 약 120 m의 폐석이 적치되었다(Fig. 5a). 이후 2000년대에 들어 초기에 쌓은 폐석 더미의 남쪽과 북쪽으로 각각 최대 약 90 m, 85 m의 폐석이 추가적으로 적치되었다. 특히 서쪽 적치장의 최북단 지역은 Google Earth 광학 영상을 확인한 결과, 2009년 이후부터 폐석이 적치된 것으로 보이며 짧은 시간 동안 많은 폐석이 쌓인 것으로 판단된다. 서쪽 적치장의 중심부에서는 1 시기에 최대 약 130 m의 고도 상승이 발생하였다(Fig. 5b).

이후 중심부에서는 추가적인 폐석 적치 활동은 없는 것으로 나타난다. 서쪽 적치장의 남쪽 지역은 1985년경 Google Earth 광학 위성영상에서 아직 적치가 발생하지 않았으며, 다른 지역에 비해 비교적 개발이 늦게 진행된 것으로 보인다(Fig. 5c). 이 영역은 1 시기 후반부터 2 시기 전반에 걸쳐 최대 약 110 m 이상의 폐석이 적치되었다. 종합적으로 서쪽 적치장에서는 약 백 년 간 평균적으로 약 48 m의 적치가 발생하였다.

북쪽 적치장은 둘레 약 5 km의 분지에 폐석을 메워 넓게 형성된 적치장이다(Fig. 5d). 1985년 Google Earth 영상을 기준으로 이미 적치가 완료되었으며 이로 인해 2 시기에는 고도 변화가 전혀 감지되지 않았고, 1 시기에

최대 약 120 m가량의 적치가 발생하였다.

동쪽 적치장은 전체 연구 지역 중 폐석 적치량이 가장 크고 가장 넓은 면적에 폐석이 매립 되어있다. 동쪽 적치장은 다시 동~서 방향으로 적치 시기가 다른 두 부분으로 나뉜다. 동쪽 적치장 영역에 대해 조선지형도와 Copernicus DEM을 비교한 결과, 이 지역에는 과거에 크게 두 개의 계곡이 존재하였으며 두 계곡 위에 폐석을 버려 현재는 평평하게 메워진 상태인 것으로 나타난다. 두 계곡 중 왼쪽에 위치한 계곡은 1 시기에 적치가 발생하였다(Fig. 5g). 1985년 광학 영상에서 이미 적치가 완료되었으며 2 시기에는 고도 변화는 감지되지 않았고, 1 시기에 최대 약 160 m의 고도 변화가 감지되었다. 이는 1 시

기에 감지된 적치 활동 중에서 가장 큰 수준의 고도 변화량을 나타낸다. 오른쪽에 위치한 계곡은 과거부터 현재 까지 지속적인 적치 활동이 감지되었다(Fig. 5h). 특히 두 계곡의 사이에서 두 시기에 걸쳐 지속적인 적치가 진행된 부분이 존재하며, 해당 영역에서는 최대 약 150 m 정도의 적치가 발생하였다. 동쪽 적치장의 최동단에 위치한 계곡은 2000년 이후부터 본격적으로 적치가 발생한 것으로 나타난다. 이 지역은 2 시기에 최대 약 120 m가량의 고도 상승이 발생하였으며, 최근 시점의 Google Earth 광학 위성을 확인한 결과 현재까지도 적치 활동이 있는 것으로 보인다. 대체로 채광장에서 가까운 지역들이 1 시기에 적치가 완료된 모습을 볼 수 있다.

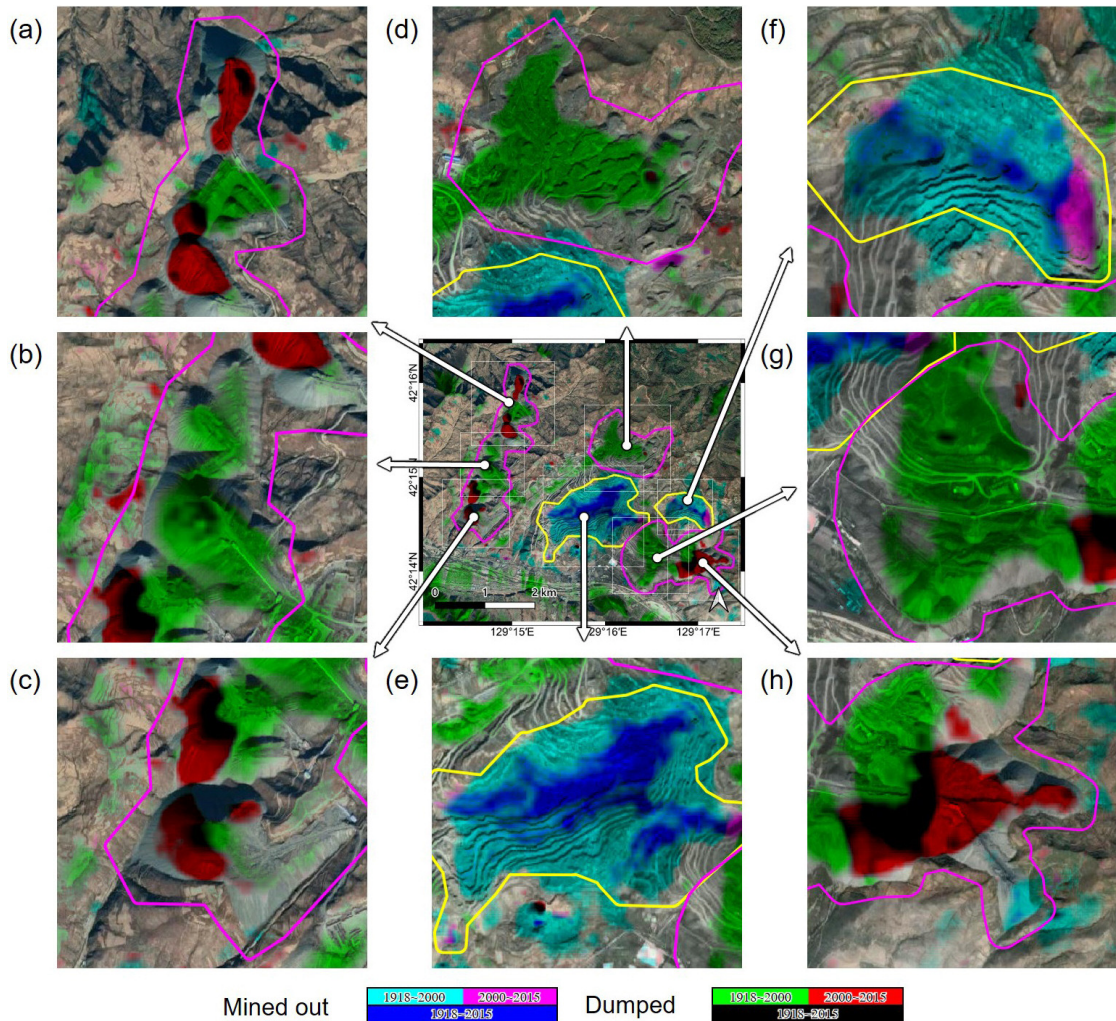


Fig. 5. Enlarged images of Fig. 3(d) for mining and dumping sites: (a–c) west storage areas from north to south, (d) the north storage area, (e, f) mining areas, and (g, h) east storage areas from west to east.

4.3. 채광장 고도 변화

채광장의 경우 광산의 중심부에 둘레 약 6 km, 너비 약 2 km 이상의 큰 규모로 분포하며 동쪽 적치장의 북쪽으로 비교적 작은 규모로 하나 더 위치하고 있다. 먼저 광산 중심부의 채광장은 1 시기에 최대 약 190 m의 고도 감소가 나타난다(Fig. 5c). 가장자리부터 중앙으로 조금씩 채굴해간 것으로 보이며, 채광장의 중앙부에는 2 시기에서도 채광 활동이 감지된다. 2000년 이후에는 약 15년 간 최대 34 m의 고도 감소가 감지되었으며 광학 위성 분석 결과, 현재는 채광 활동이 거의 나타나지 않는 것으로 나타난다. 중앙 채광장 오른쪽의 작은 채광장은 1 시기에 최대 약 180 m의 채광이 이뤄졌으며, 2 시기에는 약 30 m가량의 추가적인 고도 하강이 감지되었다(Fig. 5f).

4.4. 부피 및 질량 변화 추정

앞서 획득한 고도 변화 값을 이용하여 부피 변화량을 구하고 밀도와 공극을 고려하여 질량 변화량으로 추정해보았다. Table 1은 각 시기별 부피 변화량의 결과 값을 나타낸다. 먼저 채광장 전체에서는 1 시기에 약 344 km³의 부피 감소가, 2 시기에 60 km³의 부피 감소가 발생하였다. 따라서 채광장 전체 시기에 총 404 km³의 철광석이 채석된 것으로 나타난다. 적치량은 전체적으로 1 시기에 약 406 km³, 2 시기에 약 103 km³로 백년 간 총 564 km³에 달하는 부피의 폐석이 매장된 것으로 추정된다. 다만 이 부피는 압착 과정을 거치지 않은 폐석 더미의 부피로서 공극의 부피를 포함한 수치이다. 또한 노천 채굴 과정에서 제거한 표토의 부피도 일부 포함되어 있을

가능성이 존재한다. 따라서 적치된 부피가 채석된 부피보다 더 크게 나온 것으로 판단된다.

Table 2는 각 시기별 질량 변화량을 추정된 표이며, 3장의 연구방법에서 기술한 바와 같이 원암의 밀도 및 적치된 암석의 밀도와 공극률을 추정하여 계산하였다. 채광량은 1 시기에 약 11억 6천만 톤, 2 시기에 약 2억 톤으로 추정된다. 폐석은 1 시기에 전체 적치장에서 약 8억 7천만 톤, 2 시기에 약 1억 6천만톤이 적치된 것으로 추정된다. 약 백년 간 총 채광량은 13억 7천만 톤, 총 적치량은 약 10억 6천만 톤으로 추정된다. 채광된 철광석에서 순수한 철만을 추출하고 남은 폐석을 표토와 함께 버렸다고 가정할 때, 1918년부터 2015년까지 총 추정 철생산량은 약 3억 톤에 달한다. 이는 무산 광산의 연간 철생산량인 300~800만 톤(Koh et al., 2013)과 비교했을 때 의미 있는 값으로 판단된다. 그러나 이 결과는 현장 자료의 부재로 인하여 밀도와 공극율의 추정치를 사용했기 때문에 실제 값과 큰 차이를 가질 수 있다. 조선지형도 DEM의 정밀도에 따른 오차 역시 고려해야한다. 광산 활동이 없는 비변화 지역에 대해 Copernicus DEM과 조선지형도 DEM 간 고도 차이의 표준 편차는 약 18.6 m 정도로 계산되었다. 이러한 편차는 고도 변화로부터 체적 변화, 질량 변화순의 연산 과정에서 오차가 그대로 전파된다. 해당 값을 이용해 질량 변화량의 오차 범위를 계산하였다. 서쪽, 북쪽, 동쪽 적치장에 대해 각각 ±8,600만 톤(20%), ±4,800만 톤(23%), ±7,600만 톤(18%)의 오차 범위를, 채광장에 대해서는 ±1억 6,700만 톤(12%)의 오차 범위를 갖는다. 추정치를 사용함으로써 잠재적으로 발생 가능한 오차는 향후 명확한 현장 자료를 통해 충분히

Table 1. Volume changes of the Musan mine calculated by DEM changes (km³)

	Mined out	Dump_east	Dump_west	Dump_north
Period 1 (1918–2000)	344	180	175	106
Period 2 (2000–2015)	60	44	51	8
Total	404	224	226	114

Table 2. The estimated mass change of the Musan mine (×10⁶ ton)

	Mined out	Dump_east	Dump_west	Dump_north	Estimated iron production
Period 1 (1918–2000)	1,169	340	332	199	298
Period 2 (2000–2015)	204	84	96	16	8
Total	1,373	424	428	215	306
		1,067			

히 보정이 가능하나, 지형도의 정밀도 자체로 인해 발생 가능한 오차 범위는 결과의 해석 과정에서 유의하여 분석해야한다.

이 연구는 조선지형도를 이용하여 무산 광산 개발 전 자연 지형으로부터 최근 광산개발까지의 변화를 추출했다는 데에 의미가 있다. 그러나 연구 지역의 1:50,000 무산 도엽이 발견되지 않아 1:200,000 조선지형도를 사용할 수밖에 없었다. 한반도 대부분의 지역에서는 1:50,000 조선지형도가 존재하기 때문에, 이를 활용하면 근대 산업발전으로 인한 지형변화 연구로의 활용 가치가 클 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 1918년 발행된 1:200,000 조선지형도(회령 도엽)와 InSAR DEM인 SRTM DEM (2000) 및 Copernicus DEM (2011-2015)을 이용하여 1935년부터 본격적인 개발이 시작되었던 함경북도 무산 노천광산의 지형변화를 살펴보았다. 조선지형도는 InSAR DEM과의 분석을 용이하게 하기 위해 DEM화 되었으며, 광산 외 지역에서 발생한 고도 변화량에 대한 통계 값을 활용해 수직 오차를 보정하고 오차 범위를 산출하였다.

무산 광산 중앙의 채광지를 기준으로 서쪽, 북쪽, 그리고 동쪽에 각각 적치장이 위치하고 있다. 고도 변화 값을 이용해 부피 변화량을 산출하고 연구 지역 일대의 암종 밀도와 폐석의 공극률 추정치를 이용하여 전체 기간(1918년~2015년)의 질량 변화량을 산출한 결과, 백여 년 동안 13억 7천만 톤의 철광석이 채굴되었고 10억 7천만 톤의 폐석이 매립되었다. 두 값의 단순 차로써 철 생산량을 추정해 보면 약 3억 톤으로 계산되며, 이는 기존에 알려진 연평균 생산량을 고려할 때 의미 있는 결과로 사료된다.

본 연구의 결과는 DEM 정밀도에 크게 의존할 뿐만 아니라 계산 과정에서 암석의 밀도와 공극률에서 추정치를 사용하였기 때문에 부정확할 가능성이 있다. 비변화 지역에 대한 고도 변화량의 표준 편차를 통해 약 20% 내외의 오차를 포함할 것으로 추정하였다. 단, 본 연구는 역사 지도인 조선지형도를 사용하여 무산광산 개발 전부터 현재까지 약 백 년 간의 변화를 살펴볼 수

있다는데 의의가 있다. 비록 본 연구지역은 자료의 부재로 인하여 1:200,000 조선지형도를 사용하였으나 한반도 대부분 지역에서는 보다 정밀한 1:50,000 조선지형도를 사용하여 근대 산업활동으로 인한 지형변화 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 행정안전부의 지진방재 전문인력 양성사업과 한국연구재단(No. 2019R1 A6A1A03033167, NRF-2022R1F1A1071054)의 지원을 받았습니다. 또한 2023년도 강원대학교 대학회계의 지원을 받았습니다.

Conflict of Interest

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

References

- AIRBUS, 2022. Copernicus DEM product handbook. Available online: https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-Copernicus-DEM-SPE-002_ProductHandbook_I4.0.pdf (accessed on July 24, 2023).
- 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. <https://doi.org/10.9719/EEG.2015.48.5.391>
- Chen, J., Li, K., Chang, K. J., Sofia, G., and Tarolli, P., 2015. Open-pit mining geomorphic feature characterisation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.001>
- 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. <https://doi.org/10.32390/ksmer.2019.56.2.204>
- Earth Resources Observation and Science Center, 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 July 25, 2023).
- Information System for Resources of North Korea, 2017. Newsletter for resources of North Korea. Available online: <https://irenk.net/index.html?menu=83> (accessed on July 22, 2023).
- James, L. A., Hodgson, M. E., Ghoshal, S., and Latiolais, M. M., 2012. Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, 137(1), 181–198. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.039>
- Koh, S. M., Lee, G. J., and Yoon, E., 2013. Status of mineral resources and mining development in North Korea. *Economic and Environmental Geology*, 46(4), 291–300. <https://doi.org/10.9719/EEG.2013.46.4.291>
- Lee, H., Moon, J., and Lee, H., 2022. Activity of Okgye limestone mine in South Korea observed by InSAR coherence and PSInSAR techniques. *Remote Sensing*, 14(24), 6261. <https://doi.org/10.3390/rs14246261>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1509-4>
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs13091861>
- Mora, O. E., Lenzano, M. G., Toth, C. K., Grejner-Brzezinska, D. A., and Fayne, J. V., 2018. Landslide change detection based on multi-temporal airborne LiDAR-derived DEMs. *Geosciences*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.3390/geosciences8010023>
- 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. <https://doi.org/10.21807/JNAS.2017.12.85.73>
- 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.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00017-4)
- Sjöberg, J., 1996. Large scale slope stability in open pit mining: A review. Available online: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-22512> (accessed on July 25, 2023).