연구논문

InSAR 위성영상 분석과 다방향흐름 분석을 통한 북한 무산광산 오염영역 예측

김성민¹ · 서장원¹ · 송재준^{2,3} · 박형동^{2,3*}¹강원대학교 에너지공학부(에너지자원융합공학전공) 조교수, ²서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수,³서울대학교 에너지자원신기술연구소 겸무연구원

Prediction of the Contamination Area at the Musan Mine in North Korea using InSAR Analysis and Multiple Flow Direction Analysis

Sung-Min Kim¹, Jangwon Suh¹, Jaejun Song^{2,3} and Hyeong-Dong Park^{2,3*}¹Assistant Professor, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Kangwon National University, Samcheok, Korea²Professor, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea³Adjunct Researcher, RIER, Seoul National University, Seoul, Korea

*Corresponding Author. Hyeong-Dong Park, hpark@snu.ac.kr, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Received

23 November 2021

Final version Received

20 December 2021

Accepted

27 December 2021

Abstract

North Korean mines are known to be vulnerable to mining hazards. This study evaluated the occurrence and diffusion patterns of pollutants in the Musan mine, the largest iron mine in North Korea. Based on the time-series analysis of the Landsat images, continuous mining activities were confirmed. In addition, mining areas were classified using Sentinel-2 images. Areas where pollutants were deposited by the typhoon were identified through InSAR analysis using Sentinel-1 images. As a result of the GIS-based flow analysis, it was confirmed that pollutants can diffuse in four directions and flow into nearby rivers and lower areas. Therefore, in order to prevent the spread of pollutants and pollution of rivers, it is necessary to install facilities in vulnerable areas.

Key words : SAR interferometry, Surface displacement analysis, flow direction analysis, Mining hazards

요약

북한의 광산은 시설 노후화와 방지 시설 부족으로 인해 광해 발생에 취약한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 북한 최대의 철광산인 무산광산을 대상으로 오염물질의 발생 가능성을 평가하고, 이동 경로와 확산패턴을 예측하였다. Landsat 영상의 시계열 분석 결과, 광산의 지속적인 개발을 확인할 수 있었으며 Sentinel-2 영상을 이용하여 광산 영역을 정량적으로 분류할 수 있었다. 또한, Sentinel-1 영상을 이용한 InSAR 분석을 통해 태풍 발생 이후 오염물이 적치된 영역을 파악하였다. 오염물질의 이동경로와 확산패턴을 분석하기 위해 GIS 기반의 흐름방향분석 기법을 적용한 결과, 4개 방향으로 오염물이 확산되어 인근 하천과 광산 남쪽 저지대로 유입될 수 있음을 확인하였다. 따라서 오염물의 확산과 하천 오염을 방지하기 위해서는 유출 가능지역에 확산 방지 시설의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 레이더간섭기법, 지표변위분석, 흐름방향분석, 광산재해

서 론

산업의 발전과 함께 국내외에서 광물자원에 대한 수요가 급증하고 있다. 4차산업의 핵심 광물인 리튬은 1999년 기준 전 세계 생산량이 약 14,000톤(USGS, 2001)이었던 것에 비해 2019년에는 약 86,000톤으로 급증한 것을 확인할 수 있다(USGS, 2021a). 또 다른 4차산업 핵심 광물인 텅스텐의 경우에는 동기간에 31,000톤(USGS, 2001)에서 83,800톤(USGS, 2021a)으로 전 세계 생산량이 증가하였으며 생산량뿐 아니라 수요가 급격하게 증가한 것은 자명한 사실이다. 이외에도 다양한 광물들에 대한 수요가 커지고 있으나 국내에서는 일부 비금속을 제외하면 대부분 수입에 의존하고 있는 현실이다. 한국지질자원연구원(KIGAM, 2021)의 보고에 따르면 2020년 기준 국내 광산물 자급률은 금속의 경우 0.6%, 비금속의 경우 63.0%에 해당한다. 한국광물자원공사(KORES, 2021)에서는 4차산업의 핵심 광물로 니켈, 리튬, 망간, 코발트, 텅스텐을 선정하였다. 이들 중 통계자료가 구축된 광물들의 총수요 대비 수입 의존 비율은 2020년 기준으로 각각 니켈이 100%, 망간이 95.6%, 텅스텐이 16.3%에 해당한다(KIGAM, 2021). 앞으로 광물자원의 중요도가 점점 커질 것을 고려할 때 국가 경쟁력을 높이고 균형 잡힌 발전을 이루기 위해서는 국내 생산량을 확대하는 것은 물론이고 국외에서 필수 광물을 충분히 확보하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

남한의 광산물 자급률은 매우 저조하지만, 북한의 경우 2019년 기준 총 경제 규모의 약 11.0%를 차지할 정도로 광업은 여전히 주요한 산업으로 자리하고 있다(Statistics Korea, 2020). 비금속 광물자원 생산이 대부분을 차지하는 국내 광업 현황과 다르게 북한은 다양한 광물자원이 풍부하게 부존하는 것으로 추정된다(KORES, 2017). 특히, 북한의 마그네사이트 광석 매장량은 세계 1위 규모이며 텅스텐, 흑연 매장량도 세계 10위권 수준으로 보고되었다(USGS, 2021a). 또한, 남한의 금속 광물 수입량의 약 80%를 차지하는 철, 동, 연광의 경우 북한의 매장량이 남한의 10-100배 이상에 달하는 것으로 추정되고 있다(Statistics Korea, 2021).

이처럼 북한은 풍부한 광물자원이 매장되어 있으면서 남한과 지리적으로 가장 인접한 국가이므로 자원 외교의 관점에서 상당한 잠재성을 가지고 있다. 북한 광물자원의 공동개발은 과거에도 몇 차례 협력 사례들이 있으며, 최근까지도 남북협력에 있어 매우 중요한 요소로 고려되고 있다. 이처럼 북한 광물자원 개발사업은 남한의 주요 금속광물자원 확보, 북한의 경제발전 촉진이라는 측면에서 남북한 양측에 긍정적 경제 효과를 가져올 수 있다. 하지만 이러한 이점에도 불구하고 북한의 경제적 불안정성과 광산의 인프라

부족, 설비 노후화 등의 문제로 인해 남한을 비롯한 외부 자본의 투자가 미비한 실정이다. 특히, 1990년대 이후 장기간의 경제난으로 인해 국가 인프라 감축, 광산 운영 및 관리 기술개발의 미비, 광업설비 노후화 등의 문제는 광산 개발 이익의 저감 요인이 되고 있고, 광산재해(광해) 발생 위험성을 높일 수 있다(Chung, 2019). 특히 북한은 적절한 광해방지 대책 없이 광업 활동이 이루어지는 경우가 많으므로 이에 대한 분석과 대비가 필요하다.

향후 북한 광물자원의 공동개발 가능성을 고려할 때, 안정적이고 지속적인 광산개발을 위해서는 발생 가능한 광해를 사전에 파악하고 방지할 필요가 있다. 북한의 광산을 대상으로 인프라의 현황 및 일부 광해 문제, 전력공급 방안 등을 분석한 몇몇 사례들이 보고되었으나(Oh *et al.*, 2018, Koo *et al.*, 2018, Kim *et al.*, 2020), 지역의 특성상 개별 광산에서 발생 가능한 광해 분석 사례는 부족한 상황이다. 특히, 중금속을 포함한 광물찌꺼기는 강우로 인해 유실될 경우 주변 지역에 수질오염 문제를 유발하고 주민들의 건강에 악영향을 끼칠 수 있으므로 이에 대한 면밀한 분석이 요구된다. 본 연구에서는 무산광산을 대상으로 위성영상과 지리정보시스템(Geographical Information System, GIS) 기반의 공간분석기법을 이용하여 오염물질의 유실 가능성과 이동 경로를 분석하였다. 무산광산은 북한 최대의 철광산으로 대규모 노천채광으로 인하여 환경피해가 심각하고 폐석 적치량 증가, 광물찌꺼기 유출, 식생 훼손 등의 다양한 광해에 노출된 것으로 보고되었다(Bae *et al.*, 2015, Yoon *et al.*, 2018). 특히, 2020년 8-9월에는 태풍 마이삭에 의해 무산광산의 정광이 상당량 유실되고 주변 철도 선로가 파괴되었으며, 산사태로 인해 주변 농경지도 유실된 것으로 알려졌다(SPNEWS, 2021). 이처럼 북한의 광산은 시설의 노후화와 방지 시설 부족으로 인해 광해 발생에 취약하지만, 지역의 특성으로 인해 직접적인 조사가 어려운 상황이다. 따라서 본 연구는 원격탐사 기반의 위성영상과 GIS 기술을 활용하여 오염물질의 발생 가능성을 평가하고, 이동 경로와 확산패턴을 예측함으로써 인근 하천이나 주거지의 피해를 사전에 방지하는 것을 목적으로 한다.

Landsat 영상을 이용한 무산광산의 피복 변화 분석

무산광산에서 발생한 광해의 영향을 파악하기 위해서 주변 지역에 대한 피복 변화를 분석하였다. 직접적인 접근이 어려운 북한 지역의 특성상 원격탐사 기반의 위성영상을 이용하였다. 본 연구에서는 먼저 Landsat 시리즈 위성영상을 활용하여 장기간에 걸친 광산 주변 지역의 변화를 분석하였다. Landsat 시리즈 위성은 미국 항공 우주국(NASA)

에서 개발한 다중 스펙트럼 위성으로, 1972년 발사된 Landsat 1을 시작으로 2021년 9월에 발사된 Landsat 9까지 50여 년에 걸쳐서 지표면과 지구환경의 관측에 기여하고 있다(Fig. 1). Landsat 위성은 같은 지점을 16일에 1번 돌아오는 주기 해상도를 가지며, 최신 위성인 Landsat 8과 Landsat 9의 센서가 관측할 수 있는 파장대 영역과 공간해상도를 Table 1에 나타냈다.

Fig. 2는 채광작업이 진행됨에 따른 무산광산 주변 환경의 피복 변화를 보여주고 있다. 1990년부터 2020년까지 10

년 간격의 Landsat 영상을 이용했으며, 시기에 따라 Landsat 5 TM 영상(1990년 10월 12일, 2000년 11월 8일, 2010년 11월 4일)과 Landsat 8 OLI and TIRS 영상(2020년 9월 28일)을 활용하였다. 피복의 변화를 파악하기 쉽도록 근적외선 밴드를 붉은 색상으로 표시하는 가색상(false color)을 이용하였으며, 이를 위해서 Landsat 5 영상은 4, 3, 2번 밴드를 조합하였고, Landsat 8 영상은 5, 4, 3번 밴드를 조합하였다. 식물은 근적외선 파장대의 전자기파를 잘 반사하기 때문에 붉은색에 가까운 픽셀은 일반적으로 식물이 많이 분

Fig. 1. A timeline of the Landsat satellite series.

Table 1. The band designations for the Landsat 8-9 (USGS, 2021b)

Landsat 8 Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - Short Wave InfraRed (SWIR) 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - Short Wave InfraRed (SWIR) 2	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 (resampled to 30)
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 (resampled to 30)

Fig. 2. Observation of the expansion of the mining area using false color of Landsat satellite images.

포하고 있는 지역이며, 푸른색에 가까운 픽셀은 도심지나 광산개발이 이루어진 지역을 나타낸다. 각 영상의 이전 단계(10년 전)에서 광산 개발지에 해당하는 영역을 굵은 선으로 표시하였고, 새로 개발된 영역을 붉은 선으로 표시해서 변화되는 양상을 확인하였다. 무산광산은 계속되는 개발로 인해서 노천채광장 및 광물찌꺼기 적치장을 포함한 영역이 지속해서 확장되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 무산광산에서 발생하는 광해는 현지점에서도 작업자와 지역 주민에게 영향을 줄 수 있는 문제임을 알 수 있다. 또한, 개발지역이 확장됨에 따라 오염원은 늘어나고 주변 산림이 훼손되기 때문에 광해 발생 가능성과 피해 규모가 커질 수 있음이 우려된다.

Sentinel-2 영상을 이용한 무산광산의 피복 분류

1970년대 이후 꾸준히 영상을 구축하고 있는 Landsat 시리즈를 이용하여 장기간에 걸친 무산광산의 개발 현황을 확인하였으며, 무산광산 주변 지역의 최근 피복 상황을 더 면밀하게 관찰하기 위해서 더욱 높은 공간해상도를 가지는 Sentinel-2 영상을 이용하였다. Sentinel-2는 Copernicus 육상 모니터링 서비스를 위해서 2015년 발사된 유럽 우주국(ESA) 개발 다중분광 위성이며, 같은 궤도를 따라 180도 위상차를 가지는 2개의 위성으로 구성되어 있다. Sentinel-2

위성은 관측 파장대에 따라 Table 2와 같은 공간해상도를 갖는다.

광산 개발 지역을 더욱 정량적으로 분류하기 위해서, Sentinel-2 영상의 분광신호(spectral signature)를 이용해 피복 분류를 수행하였다. 피복의 유형이 명확한 지역을 표본 지역(Regions of Interest, ROI)으로 지정하여 이에 대한 분광신호와 다른 영역의 분광신호를 비교하여 분류를 수행하는 감독분류(supervised classification) 방식을 적용하였다. 피복 분류 과정에서는 일반적으로 Minimum distance, Maximum likelihood, Spectral angle mapping, 그 외 머신러닝 기반의 알고리즘이 사용되며, 본 연구에서는 Spectral angle mapping 기법을 이용하였다. 광산 지역을 분류하는 것이 목적이므로 피복 유형은 과다하게 세분화하지 않고, 총 4개의 유형(도심지 및 광산 지역, 산림, 토양, 물)으로 분류하였다. 자료의 다운로드, 전처리, 표본설정, 분류 등의 과정은 QGIS의 Semi-Automatic Classification Plugin(SCP)을 이용하였다. 본 연구에서는 2020년 9월 9일에 취득한 Sentinel-2 영상을 활용하였다. 광산지역 Sentinel-2 영상(Fig. 3(a))에 대한 분류결과를 보면 광산 지역이 주변의 토양이나 산림과 명확하게 구분되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3(b)). 특히 최근에 개발이 이루어진 지역에 광산물이 적치되어 있으므로(Fig. 3(c)), 이러한 지점은 강우가 집중될 경우 광해 발생에 유의할 필요가 있을 것이다.

Table 2. The band designations for the Sentinel-2 (Copernicus, 2021)

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength [micrometers]	Resolution [meters]
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Fig. 3. Sentinel-2 analysis: (a) the study area, (b) land cover classification using Spectral angle mapping algorithm, and (c) recently developed area.

Sentinel-1 영상을 이용한 무산광산의 지표변위 분석

다중분광 자료인 Sentinel-2 영상을 분석하여 광산개발 영역을 파악할 수 있었다. 이러한 영역을 대상으로 태풍에 의한 영향과 광해 현황을 평가하기 위해서 Sentinel-1 영상을 이용한 태풍 발생 전후 지표 변위 분석을 수행하였다.

Sentinel-1은 기상조건과 관계없이 고해상도 이미지를 제공할 수 있는 합성구경레이더(Synthetic aperture radar, SAR) 센서를 탑재하고 있는 ESA 개발 레이더 위성이다. Sentinel-1은 2개의 극궤도 위성으로 구성되며, Sentinel-1A가 2014년, Sentinel-1B가 2016년에 발사되었다. 위성에 탑재된 안테나에서 마이크로파를 발생시키고, 대상 물체에서 후방 산란 되어 돌아오는 진폭(Amplitude)과 위상(Phase)을 수

신하여 합성하는 방식으로 SAR 시스템이 구성된다. 이때 도플러 효과(Doppler Effect)를 이용해서 짧은 안테나의 여러 신호를 합성함으로써 큰 안테나를 사용한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 레이더 간섭기법(SAR Interferometry, InSAR)을 활용하면 동일 대상에 대해서 취득한 두 장 이상의 SAR 영상을 통해 지표면의 변위와 고도를 높은 정밀도로 얻을 수 있다.

본 연구에서는 ESA에서 개발한 SNAP(The Sentinel Application Platform) 프로그램과 분석방법(SKYWATCH, 2020)을 기반으로 태풍 마이삭 발생 전후 2개의 Sentinel-1 영상(2020년 7월 20일, 9월 30일 취득)을 분석하였다. 2개의 SAR 영상을 이용해서 두 시기 사이에 발생한 변위를 계산하기 위한 InSAR 분석 순서도는 Fig. 4와 같다. 먼저 영상들의 통갯값을 사용하여 두 제품을 정렬하는 공동등록(Coregistration) 과정이 필요하며, 이를 위해서는 전체 영상에서 분석에 필요한 부분을 선택하고(TOPS split), 궤도와 관련된 보조 데이터를 적용해야 한다. 두 영상의 위상 차이를 계산해서 간섭도(Interferogram)를 생성하면 두 레이

다 신호 간의 일치성을 나타내는 정량적 지표인 coherence 값을 얻을 수 있다. 높이 변화가 크고 일관성이 없는 숲이나 바다 같은 곳에서는 coherence 값이 낮게 나타나고, 이러한 지역에서는 신뢰할만한 결과를 얻기가 어렵다는 것을 의미한다. Fig. 5(a)는 무산광산 주변의 간섭도, Fig. 5(b)는 coherence 값을 보여주고 있다. 산림의 경우에는 노이즈가 심하고, 낮은 coherence 값(어두운 색)을 갖는 것을 알 수 있다. 간섭도에서 위상(phase)은 다양한 노이즈에 의해 손상될 수 있으므로 본 연구에서는 필터링(Goldstein Phase Filtering)을 적용하여 신호 대 잡음비를 향상시켰다. 다음 과정으로 위상의 언래핑(unwrapping) 과정을 통해 인접 픽셀 간의 위상차를 통합함으로써 위상을 지형 높이와 연관시켰으며, 센서와 픽셀 사이의 가시선(line of sight)을 따라서 위상을 미터 단위의 지표면 변화로 변환하였다. 최종적으로 지형보정과 지오킨딩 과정을 거쳐서 결과를 산출하였다.

Fig. 6(a)는 InSAR 분석과는 무관하며, 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용해서 비가 올 때 물이 차올 수 있는 웅덩이 형태의 지형(파란색)을 분석한

Fig. 4. The flowchart of InSAR Analysis for surface displacement.

Fig. 5. (a) Wrapped interferogram (phase) and (b) coherence of the Musan Mine.

Fig. 6. The result of InSAR analysis using Sentinel-1B images: (a) concave areas, (b) displacement in the mining area, (c) 3D view of 1, 2 spots, and (d) 3D view of 2, 3 spots.

결과이다. 1 지역은 하천이 흐르고 도심지가 있는 상대적으로 낮은 지형이며, 3 지역은 깊게 채광이 이루어져서 빗물이나 유실된 물질이 퇴적될 수 있는 웅덩이 형태의 지형에 해당한다. 2 지역은 노천채광장입에도 좌측의 배수로로 통해 물이 흐르는 것으로 분석되어 파란색으로 표시되지 않았다. Fig. 6(b)는 InSAR 분석을 통한 지표 변위 결과를 나타내며, Fig. 6(c), (d)에 3차원 가시화 결과를 함께 나타냈다. 지표 높이가 상승한 지역일수록 붉은색에 가까운 색으로 표시하였으며, 지표 높이가 내려간 지역일수록 파란색에 가까운 색으로 표시하였다. 1, 2, 3 지역은 모두 지표가 상승한 것을 확인할 수 있는데, 특히 지대가 낮은 1 지역은 태풍에 의해 유실된 광산 지역의 토양과 광물찌꺼기가 적치되어 지표가 상승했음을 추정할 수 있다. 웅덩이 형태로 채광이 이루어진 2 지역과 3 지역도 지표가 상승하였는데, 특히 2 지역 좌측의 배수로는 유실물이 적치되어 높은 지표 상승 값을 보이는 것으로 추정된다. 광산 북부의 산림 지역은 분석 신뢰도가 떨어지므로 노이즈가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

다방향 흐름 분석을 통한 오염물질 흐름 예측

InSAR 기반의 지표 변위 분석을 통해 무산광산의 유실물이 특정 지역에 퇴적되는 현상을 확인할 수 있었으나 유실물 흐름의 방향성을 직접 제시하지는 못했다. 광물찌꺼기 유실에 의한 피해를 사전에 방지하기 위해서는 광물찌

꺼기의 유출 및 확산 패턴을 예측할 필요가 있다. 이를 위해 Sentinel-2 영상을 이용한 피복분류 결과와 기존 연구사례(Yoon *et al.*, 2018)를 기반으로 광산 지역과 광물찌꺼기 적치 지역의 경계(오염원)를 설정하였으며, 30m 공간해상도의 DEM을 이용해서 강우 시 발생할 수 있는 광물찌꺼기의 유실 경로와 확산 패턴을 예측하였다. DEM은 ASTER GDEM Version 3(ASTGTM)을 활용했으며, 전처리 및 예측분석은 ArcGIS Pro 소프트웨어를 이용하였다.

광물찌꺼기 유실물의 확산 방향을 분석하기 위해서 다방향흐름(multiple flow direction, MFD) 알고리즘을 적용하였다. 지리정보시스템(Geographical Information System, GIS) 기반의 수계분석을 위해 가장 대표적으로 활용되는 단일흐름(D8) 알고리즘은 격자 형태의 래스터 자료에서 경사가 가장 심한 하나의 방향으로 물이 흐르는 방식으로 분석이 이루어진다. 반면, MFD 알고리즘은 고도가 낮은 여러 방향으로 물의 흐름을 분석할 수 있어서 광산에서의 오염물질 확산 분석에 활용된 일부 사례가 있다(Kim *et al.*, 2012, Yi *et al.*, 2017). D8 알고리즘과 MFD 알고리즘의 개념적 차이를 Fig. 7에 제시하였다. D8 알고리즘은 유체의 대표적 흐름 방향을 빠르게 예측할 수 있는 장점이 있지만, 유체의 분산현상을 반영할 수 없으므로 본 연구에서는 무산광산 광물찌꺼기 유실물의 확산 패턴을 예측하기 위해서 MFD 알고리즘을 적용하였다. 본 연구에서는 무산광산의 전역에 걸쳐 오염원이 존재한다고 가정한 경우와 최근 개발 지역 위주로 오염원이 적치되어 있다고 가정한 경우에

대해서 두 가지 시나리오를 고려하여 분석하였다.

첫 번째로 무산광산 전체 지역을 오염원으로 가정하고 오염물질의 확산을 예측한 결과는 Fig. 8과 같다. 4개의 큰 흐름 방향을 따라서 오염물질이 확산하며, 이러한 흐름이 모두 인근 하천으로 유입되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 지대가 낮은 남쪽의 하천과 주거지로 오염물 흐름이 집중될 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 오염물의 확산을 예방하여 하천 오염을 방지하기 위해서는 흐름이 집중되는 4

개 지역 위주로 배수로를 건설하거나 확산 방지 시설을 설치할 필요가 있다.

앞서 Landsat 영상을 통한 피복변화 분석 결과에서 확인했듯이 무산광산은 계속해서 개발이 이루어지고 있고 이에 따라 광산물이나 광물찌꺼기의 적치 영역도 확장되고 있다. Fig. 9에 표시된 A, B, C 지역은 최근에 개발이 이루어진 지역과 광물찌꺼기 적치 지역을 보여주고 있으며, 이러한 3개의 지역을 오염원으로 가정한 오염물 확산 예측 결과

Fig. 7. The scheme of flow analysis based on (a) D8 algorithm and (b) MFD algorithm.

Fig. 8. Prediction of the multidirectional spread of mine tailings induced by rainfall (precipitation zone: entire mine area) in Musan Mine; tailings spread to nearby streams (no. 1, 2, 4) and residential area (no. 3).

Fig. 9. Prediction of multidirectional spread of mine tailings induced by rainfall (precipitation zone: tailing area) in Musan Mine; tailing A and B have spread into streams and tailing C has spread to the residential area.

를 Fig. 9에 나타냈다. A 지역은 북서쪽과 남서쪽으로, B 지역은 남서쪽과 일부 북쪽으로, C 지역은 남서쪽으로 오염물이 확산하여 하천 및 주거지에 유입되는 것을 확인할 수 있다. 오염물이 하천으로 유입되는 지점은 다르지만, 이는 모두 같은 하천에 해당한다.

본 연구에서는 오염물질이 이동 중에 토양으로 흡수되거나 흡착되는 현상을 고려하지는 않았으나, 장기간 강우와 바람의 영향을 받으면 이러한 정제된 오염물도 결국에는 인근의 하천에 유입될 가능성이 크다. 또한, 오염물질이 하천에 유입되지 않더라도 농작물이나 다양한 경로를 통해 지역주민에게 해로운 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 분석된 주요 오염물질 유출 지점을 대상으로 확산 방지 시설을 설치하거나 지속적인 모니터링을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 Sentinel-2 위성영상을 이용해 무산광산에 대한 토지피복분류를 수행하였으며, 그 결과 광산개발 지역의 경계를 파악할 수 있었다. 또한, 30여 년에 걸친 Landsat 위성영상들을 시계열 분석한 결과, 개발이 진행됨

에 따라 채광장과 적치장 영역이 확대되는 것을 확인하였다. 정량적인 변화량을 파악하기 위해서는 Sentinel-1 영상 기반의 InSAR 분석을 수행하였으며, 그 결과 태풍 발생 이후에 웅덩이 형태의 노천 채광장과 배수로, 하천 및 도심 부근의 변위가 증가한 것으로 나타났다. 이는 태풍에 의해 유실된 토양이나 광물찌꺼기가 웅덩이 형태의 지형이나 지대가 낮은 곳에 적치되었기 때문으로 판단된다. 이러한 분석법은 유실된 오염물질의 이동에 대한 방향성은 제시하지 못하기 때문에 GIS 기반의 다방향흐름 분석을 통해 오염물질의 이동 경로와 확산패턴을 분석하였다. 강우가 발생할 경우, 유실된 오염물질이 광산 주변의 하천과 거주지로 유입될 수 있음을 확인하였으며, 흐름이 집중되는 영역을 특정할 수 있었다. 특히, 상대적으로 지대가 낮은 무산광산의 남쪽 지역으로 오염물질의 흐름이 집중될 수 있는 것으로 분석되었는데 이는 앞선 변위 분석의 결과에 부합하는 결과이다. 따라서 광해 발생으로 인한 주변 지역의 오염을 방지하기 위해서는 흐름이 집중되는 지역에 정화시설을 설치할 필요가 있을 것이다.

본 연구에서는 정보의 부족으로 인해 태풍 마이삭에 의한 무산광산의 피해가 정확히 언제 발생했는지 특정하기가 어려웠다. 이에 따라 취득 시기에 있어 다소 차이가 있는 두

개의 영상(2020년 7월 20일, 9월 30일)을 활용하여 InSAR 분석을 수행하였는데 이는 변위 분석의 정확도 저하 원인이 될 수 있다. 분석에 사용되는 영상들의 취득 시기가 가까울수록 정밀한 분석이 가능하므로 향후 피해 날짜를 정확히 파악할 수 있다면 더 정확하고 신뢰할만한 결과를 얻으리라 기대한다. 또한, 추후 토양도 등 다양한 자료를 확보할 수 있다면 토양의 흡수율을 고려한 분석도 가능할 것이다. 비록 지역의 특성상 제한된 정보와 데이터로 분석을 수행하였지만, 본 연구를 통해 접근이 어려운 북한 광산의 광해 발생 현황을 평가할 수 있었으며, 이는 향후 남북한의 광물 자원 협력 개발을 위한 기초연구로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2019년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비와 2020년도 서울대학교 통일평화연구원 통일기반구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물임.

References

- Bae, S., Yu, J., Koh, S.M., and Heo, C.H., 2015. 3D Modeling approaches in estimation of resource and production of musan iron mine, North Korea, *Economic and Environmental Geology*, 48(5), p.391-400.
- 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), p.204-211.
- Copernicus, 2021. 10. 21, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2021. *Korea Mineral Information 2020*, Daejeon, Korea, 77p.
- Kim, S.M., Choi, Y., Park, H.D., and Kim, T.H., 2012. Prediction of mine leachate pathway by considering divergent flow of surface runoff, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 49(6), p.736-745.
- Kim, S.M., Suh, J., Oh, M., Yang, A., Song, J., and Park, H.D., 2020. GIS-based network analysis of North Korea's transportation infrastructure for the trade of mineral resources in North Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(2), p.159-167.
- Koo, Y.H., Kim, S.M., Oh, M.C., and Park, H.D., 2018. Landslide risk assessment at the gumdeok mine in North Korea using satellite images and GIS spatial data, *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy*, 55(4), p.259-271.
- KORES (Korea Resources Corporation), 2017. *North Korea's Mineral Resources Statistics*, Wonju, Korea, 11p.
- KORES (Korea Resources Corporation), 2021.09.10, <https://www.kores.net/komis/price/mineralprice/the4thIndustry/pricetrend/coreMetals.do>
- Oh, M.C., Kim, S.M., Koo, Y.H., and Park, H.D., 2018. Analysis of photovoltaic potential and selection of optimal site near gumdeok mine, North Korea, *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy*, 14(3), p.44-53.
- SKYWATCH, 2020. *Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial*, Ontario, Canada, 25p.
- SPNEWS, 2021.07.12., <http://www.spnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=32758>
- Statistics Korea, 2020. *Major Statistical Indicators of North Korea*, Daejeon, Korea, 299p.
- Statistics Korea, 2021.08.21, https://kosis.kr/bukhan/statistics/List/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01_01&vwcd=MT_BUKHAN&rootId=101_001#SelectStatsBoxDiv
- USGS (U.S. Geological Survey), 2001. *Mineral Commodity Summaries 2001*, Reston, Virginia, 193p. <https://doi.org/10.3133/mineral2001>
- USGS (U.S. Geological Survey), 2021a. *Mineral Commodity Summaries 2021*, Reston, Virginia, 200p. <https://doi.org/10.3133/mcs2021>
- USGS (U.S. Geological Survey), 2021b.10.01, https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellite-s?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.
- Yi, H., Choi, Y., Kim, S.M., Park, H.D., and Lee, S.H., 2017. Calculating Time-specific flux of runoff using DEM considering storm sewer collection systems, *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(2), 04016053.
- Yoon, S., Jang, H., Yun, S.T., and 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), p.564-575.

김 성 민

2009년 서울대학교 공과대학 에너지자원
공학과 공학사
2016년 서울대학교 대학원 에너지시스템
공학부 공학박사

현재 강원대학교 공과대학 에너지공학부(에너지자원융합공학전공)
조교수

(E-mail; smkim19@kangwon.ac.kr)

서 장 원

2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시
스템공학부 공학사
2013년 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 공학박사
2015년 미국 펜실베이니아주립대학교 에너
지자원공학과 방문연구원

현재 강원대학교 공과대학 에너지공학부(에너지자원융합공학전공)
조교수

(E-mail; jangwonsuh@kangwon.ac.kr)

송 재 준

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
서울대학교 에너지자원신기술연구소 겸무연구원

(E-mail; songjj@snu.ac.kr)

박 형 동

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
서울대학교 에너지자원신기술연구소 겸무연구원
(本學會誌 第58卷 第2号 参照)