# 위성탐사자료를 활용한 한반도 광산지역의 지속 가능성과 탈탄소화 전략 연구

박형동<sup>1,3</sup>, 송재준<sup>1,3</sup>, 강일석<sup>2</sup>, 구지윤<sup>2</sup>, 임준수<sup>2</sup>, 최지원<sup>2</sup>, 강병권<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 에너지자원신기술연구소 <sup>2</sup> 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 <sup>3</sup> 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과

#### 1. 서론

북한의 경제·사회에 있어 광업은 반드시 고려되어야 할 주요한 산업 분야이다. 과 거부터 북한은 석탄이나 철광석 등의 광물자원 수출에 외화 수입의 많은 부분을 의존 하였으며, 북한의 에너지 수급 구조 역시 북한 내에서 생산된 석탄이 대부분을 차지 하고 있다.

이와 같은 북한의 높은 광업 의존도는 필연적으로 다수의 광산 개발과 직결되며, 현재 북한에는 상당수의 가행광산 및 폐광산이 존재하는 것으로 파악된다. 하지만 북 한의 광업 기술은 우리나라를 비롯한 세계 광업 선진국들과 비교할 때 객관적으로 낮 은 수준에 머무르고 있으며, 특히 광물자원의 개발 과정에서 발생하는 다양한 환경 문제에 대한 적절한 조치는 시행되지 않는 상황이다 (송재준 외, 2021).

따라서, 본 연구에서는 광업 분야의 주요 환경 이슈인 CO2 배출량 저감을 위한 북한 광산지역 태양광 발전 설비의 설치 적합성, 그리고 해당 설비의 안정성과 직결 되는 지반침하 발생 현황을 위성탐사자료에 기초하여 분석하였다.

#### 1.1 위성탐사자료를 활용한 북한 광산지역 지반침하 조사 필요성

광산지역, 특히 지하광산 주변지역의 안전한 개발을 위해서는, 지반 내 지하갱도의 굴착에 따른 지반침하의 발생 가능성을 필수적으로 고려해야 한다. 국토교통부에서 2 022년 공포 및 시행한 '지하안전관리에 관한 특별법(약칭 지하안전법)'에 따르면, 지 반침하는 '지하개발 또는 지하시설물의 이용·관리 중에 주변 지반이 내려앉는 현상' 으로 정의된다 (국토교통부, 지하안전법 제2조 2항). 또한, 동일 법령에서 지반침하의 위험도 평가를 위해서는 경험과 기술을 전문가가 탐사장비를 활용한 정량·정성적인 위험도 분석 및 예측을 수행하여, 지반침하의 구조적·지리적 여건, 위험 요인, 피해 규모, 지반침하 발생 이력 등을 분석하여야 함을 규정하고 있다 (국토교통부, 지하안 전법 제2조 10항). 이처럼 광산지역의 지반침하 조사를 위해서는 해당 지역의 지반침 하 영향인자에 대한 정밀한 분석이 요구되며, 해당 영향인자에는 광산의 심도·규모·암 반조건·경과시간·지하수 등이 포함된다 (정용복 외, 2010). 하지만 남한 광산지역을 대상으로 수행된 송원경(2019)의 지반침하 현황 연구에 따르면, 많은 지반침하 발생 사례에서 체계적인 채광 계획과 계측 자료가 미비하며, 지하갱도의 굴착 시점과 지반 침하의 발생 시점 사이에 시간적 불일치가 있었다. 이는 해당 광산지역에서 지반침하 의 발생 가능성 및 규모를 예측하기 어렵게 하는 요소이다 (송원경, 2019). 이러한 지 반침하 예측의 부정확성 문제는, 신뢰성 있는 자료의 획득이 어려운 북한 광산지역의 경우 더욱 심각하게 나타날 것이 자명하다.

이처럼 체계적인 분석이 어려운 북한 광산지역의 문제점을 해결하기 위해, 위성 데이터를 활용한 광해 현황 연구가 수행된 바 있으나, 해당 연구는 구글어스(Google Earth)에서 제공하는 위성사진만을 활용한 정성적인 분석에 그치고 있다 (그림 1.1) (윤성문 외, 2018). 본 연구에서는 북한 광산지역의 지반침하 발생 현황에 대한 정량 적인 분석을 위해, 위성 탑재 레이더에서 촬영된 북한 지역의 합성개구레이더(Synthe tic Aperture Radar, SAR) 데이터를 활용한 광산지역의 지표 변위 시계열 분석을 수행하였다.



(a) 흑령광산 전경 (2014년) (b) 지반침하 및 사면붕괴 복합 발생 (2017년)



(c) 지반침하 발생 초기 (2015년) (d) 지반침하 발생 후기 (2016년)

그림 1.1 위성사진 기반 북한 광산지역(흑령광산) 광해 분석사례 (윤성문 외, 2018)

서로 다른 시간대에서 획득한 위성 SAR 데이터를 활용한 간섭영상 분석기법(Diffe rential Interferometric SAR, DInSAR)은, mm 단위의 지표 변위 분석을 넓은 영역

에서 수행할 수 있어 국내외적으로 다양한 활용이 이루어지고 있다. 도심지를 대상으 로 수행된 SAR 기반 지반침하 분석 연구의 경우, 서로 다른 SAR 분석 알고리즘을 비교했을 때, 대부분의 결과에서 mm 단위의 정확도로 지반침하량을 분석 가능함을 보고하였다 (그림 1.2(a))(Osmanoglu et al., 2015). 또한 SAR 영상이 산지나 바다 와 같은 영역을 포함한 경우에도 높은 정확도의 지반침하량 측정이 가능함을 확인하 였다 (그림 1.2(b))(Bokhari et al., 2023).



(a) 도심지 지반침하 분석 결과 (Mexico city, Osmanoglu et al., 2015)

(b) 산지·바다를 포함한 지반침하 분석 결과(Koh-i-Mehdi, Bokhari et al., 2023)

25.20

그림 1.2 위성 SAR 활용 지반침하 분석 예시

국내에서는 인천국제공항을 대상으로 2014-2022년 기간 촬영된 위성 SAR 데이터 를 활용한 지반침하 시계열 분석이 수행된 바 있으며, 인천국제공항 4단계 확장 사업 의 진행에 따라 일부 활주로 및 주차장 구역에서 상대적으로 큰 규모의 지반침하가 발생하고 있음을 확인한 연구가 발표되었다 (유충식, 2022). 태국 방콕의 삼각주 지형 을 대상으로 한 위성 SAR 기반 도심지 지반침하 연구 결과 역시, 해당 지역의 지하 수 사용에 따른 지속적인 mm 단위 연간 지반침하량 분석을 효과적으로 수행하였다 (전우현, 이종혁, 2021). 광산지역의 지반침하 발생 분석을 위한 위성 SAR 적용은 상 대적으로 미비하였으나, 2006-2010년 강원도 태백 지역의 위성 SAR 데이터를 활용 해 해당 지역의 광산 위치와 개발 현황에 따른 연간 지반침하량 분석 연구를 수행한 사례가 발표되었다 (그림 1.3)(조민지, 김상완, 2012).

기존 연구 사례들을 참고할 때, 북한 광산지역의 지반침하 분석에 위성 SAR 데이 터를 활용하는 것은 신뢰성 있는 데이터의 부족으로 인한 지반침하 분석 결과의 부정 확성 문제를 해결할 수 있는 효과적인 방안으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 위 성 SAR 데이터 중 유럽우주국(European Space Agency, ESA)에서 공개적으로 제 공하는 Sentinel-1 위성의 북한 지역 측정 데이터를 활용하여, 북한 주요 광산지역을 대상으로 DInSAR 지표변위 분석을 수행하였다. 이후 분석 결과를 구글어스 소프트웨 어를 활용해 시각화하여, 분석 대상 광산의 위치와 지반침하 발생 위치 간의 상관관 계 분석을 수행하였다.



그림 1.3 강원도 태백시 주변지역 연간 지반침하량 분석 결과 (조민지, 김상완, 2012)

## 1.2 탈탄소화를 위한 북한 광산의 지속 가능한 전력 솔루션

광업은 2023년 기준으로 북한의 실질 국내총생산에서 약 9% (약 2조 8,237억 원) 를 차지하는 주요 산업 분야로, 북한 내 가행광산 수가 총 703개소에 이르며, 이는 남한의 322개소 가행광산에 비해 약 2.2배에 해당하는 수준이다 (그림 1.4, 그림 1.5; KOSIS, 2023). 채광 분야는 전체 CO2 배출량의 2-3%를 차지하고 있어, 광산업은 지속 가능성과 탈탄소화를 최우선 의제로 삼고 있으며, 2050년까지 1.5℃ 기후 변화 목표 달성을 위해 직접적인 CO2 배출량 감소가 필수적이다 (Mckinsey & Compan y, 2021). 이러한 배경하에, BHP Billiton, Vale, Rio Tinto, Anglo American, Barr ick Gold 등의 글로벌 광산 대기업은 GHG 문제 해결을 위한 전략을 채택하고 있다. 특히, BHP와 Vale은 2020년부터 2030년까지 Scope 1(디젤 배출) 및 Scope 2(발전 배출) 배출량을 30% 줄이는 것을 목표로 한다 (Mckinsey & Company, 2021). 북한 또한 광산업의 화석 연료 의존은 온실가스 배출량 증가의 주범이며, 기술과 정보 접 근성의 제약으로 인해 탄소 배출 감축 연구가 제한되고 있다 (KEI, 2021). 따라서, 북 한의 광산 지역에서 탈탄소화는 환경 보호를 넘어 국가의 지속 가능한 경제 발전과 국제 사회에서의 책임 있는 역할을 수행하는 데 있어 중요한 전환점이다.



그림 1.4 북한 실질 국내총생산 중 광업 비중 (국가통계포털 북한통계)



그림 1.5 남북한 2012-2023 주요 광종 광산 수 (국가통계포털 북한통계)

원격지에 위치한 광산의 전력 공급은 주로 디젤 발전기에 의존하며, 디젤 발전기 의 대안으로는 기존 전력망을 활용하거나 친환경적인 신재생에너지로의 전환을 고려 할 수 있다. 북한에서 기존 전력망을 이용할 경우, 발전 설비의 노후화와 유지보수 자원 부족으로 인해 겪고 있는 전력난 문제가 더욱 심화된다 (KDI, 2021). 그림 1.6 에 따르면, 북한의 변전소 수는 남한의 약 0.4배에 불과하며, 이는 광산과 변전소 간 평균 14 km의 긴 거리로 인해 더 많은 전선과 관련 인프라가 필요하며 건설 및 유 지 보수 비용을 증가시키고 전력 손실을 야기한다. 그리고, 무엇보다 기존 북한의 발 전 체계는 탈탄소화를 이루지 못하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 독립적인 태양광 발전 시스템을 광산지역에 도입하는 것은 상당한 이점을 제공한다. 태양광 발 전시스템은 신속한 설치 및 즉시 사용 가능하다. 대규모 화력 발전소 건설에 필요한 추가 인프라 투자 불필요하다. 전력 공급의 원활성 보장 및 전체 전력 구조 개편 불 필요하다. 그리고, 장기적으로 환경 친화성과 에너지 자립성 강화한다는 강점이 있다 (오명찬 외, 2018).



그림 1.6 북한 광산과 변전소. (a) 북한 광산 분포 및 한반도 변전소 위치, (b) 북한 내 광산과 변전소 간의 거리

광산의 탈탄소화를 태양광으로 추진하는 것은 큰 이점을 제공하며, 이미 세계 여 러 국가에서 태양광 에너지를 광산의 주요 에너지원으로 활용하고 있다. 예를 들어, 그림 1.7(a)에서 미국의 Chevron Questa 광산은 2010년 5월 약 81,000 m<sup>2</sup>의 부지 에 태양광 발전 시스템 설치를 시작하여 2011년 2월부터 전력을 생산하고 있으며, 설 비의 규모는 1 MW이다 (최요순, 2013). 그림 1.7(b)에서 호주의 Carosue Dam 금광 에서는 기존 태양광 발전소를 확장하여 연간 7.2 GWh의 재생 에너지를 생산하고 있 으며, 이를 통해 연간 4,600톤의 이산화탄소 배출을 상쇄하고 있다 (Carroll, 2021).

태양광 발전의 효과적인 활용을 위해서는 지속 가능한 에너지 공급이 핵심적인 과 제로 남아 있다. 장기적인 경제적 수익을 보장하기 위해서는 재생에너지 설비 설치 전에 부지의 안정성과 적합성을 철저히 평가해야 한다. 특히 북한과 같이 현장 자료 취득이 어려운 지역에서는 광범위한 영역을 분석하기 위해 위성 데이터의 활용이 중 요하다. 재생 에너지 설비 후보지의 안정성 및 적합성 평가에 주로 사용되는 지형 위 성 데이터는 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model)이다. DEM은 각 픽셀에 담겨있는 고도 값을 통해 지형 표면을 표현하며, 태양광 설치의 적합성 평가에 필수 적인 지형 정보이다. 하지만, 고해상도 DEM은 Open access가 아닌 경우가 많고 사 용 가능한 영역 범위가 좁다. 반대로, 저해상도의 DEM은 데이터 접근성이 좋으며, 제공되는 범위가 넓다는 장점이 있지만 정밀한 분석에 한계가 있다. 따라서 광산 지 역에서 태양광 발전소 설치 부지의 적합성을 높이기 위해서는 DEM 해상도가 주는 영향에 대한 면밀한 평가가 필요하다.



그림 1.7 광산에서 태양광 에너지 활용 사례. (a) 미국 Chevron Questa 광산 (출처: Renewable Energy Magazine, https://www.renewableenergymagazine.com), 호주 Carosue Dam 금광 광산 (출처: PV Magazine, https://www.pv-magazine-australia.com)

#### 2. 위성데이터 기반 북한 광산지역 지반침하 현황 분석

이 장에서는 위성 SAR 데이터를 활용해 수행한 북한 광산지역의 지반침하 현황 분 석 결과를 설명한다. 본 연구에서는 2024년 1-6월 기간 촬영된 북한 지역 위성 SAR 데이터를 취득하여, 이 중 북한 광산지역을 포함하는 데이터를 지반침하 분석에 활용 하였다. 해당 데이터는 ESA에서 2014년부터 운영 중인 Sentinel-1A 위성의 L1 Sin gle Look Complex (SLC) 이며, 각 데이터의 촬영 간격은 12일이다. Sentinel-1A 위성 SAR 데이터의 출처는 NASA ASF Data Search Vertex (ASF DSV, https:// search.asf.alaska.edu/#/)이며, 사용 데이터의 특성은 표 2.1과 같다.

Ŧ	2.1	Sentinel-1	SLC	데이터	특성	(ASF	DAAC)
---	-----	------------	-----	-----	----	------	-------

Dataset	Flight	Delerization	Beam	Spatial	Center	Swath	Off-Nadir
	direction	Polarization	mode	resolution	frequency	width	Angle
Sentinel	According		1147	Exr20m	E 405 CHa	250 km	29.1°-
-1A	Ascending	V V + V II	1 V V	JXZUIII	5.405 GHZ	ZOU KIII	46.0°

2.1 합성개구레이더 (Synthetic Aperture Radar, SAR)

합성개구레이더는 레이더에서 방출된 전파의 지표면 반사 및 산란 반응을 이용하여 지표면의 구조를 측정하는 방식으로, 일반적인 광학적 측정과는 달리 구름·비·안개 등 의 대기 조건 및 주·야간 조건에 관계 없이 일정 수준 이상의 고해상도 측정 데이터 를 획득 가능하다는 장점이 있다 (김태욱, 한향선, 2022).

위성 SAR 데이터를 활용한 지표 변위 측정에는 DInSAR 기법이 일반적으로 활용 되며, 이는 동일한 영역을 촬영한 다수의 위성 SAR 데이터에서 관측되는 전파 신호 간의 위상(phase) 차이를 지표 변위로 환산하는 방식이다 (그림 2.1)(유충식, 2022). 이때 간섭영상에서 측정되는 위상 차이는 지표 변위 외의 다양한 원인으로 발생하는 위상 차이의 합으로 나타나며, 최종적인 지표 변위의 결정을 위해서는 지표 변위 외 의 원인으로 발생하는 위상 차이를 제외하는 과정이 요구된다. 이러한 간섭영상의 위 상 차이를 분석 및 제외하는 과정은 2.4절에서 자세히 설명한다.



그림 2.1 DInSAR 지표 변위 측정기법의 이론적 구조 (유충식, 2022)

## 2.2 분석 대상 북한 광산지역 설정

본 연구에서 활용한 Sentinel-1A 위성 SAR 데이터는, 그림 2.1과 같이 평안남도 중부, 평안북도-자강도 경계부, 함경북도 남동부 등 북한 일부 지역을 포함하지 않고 있다 (ASF DSV, 2024). 따라서 본 연구에서는 위성 SAR 데이터의 취득이 가능한 영역과 북한 가행광산 분포도 (북한지하자원넷, 2024)를 비교하여, 그림 2.2와 같이 분석 대상 북한 광산지역의 입지 후보를 일차적으로 분류하였으며, 최종적으로 해당 구역 내에 있는 3개소의 북한 광산지역을 광종 및 입지 조건에 따라 최종적으로 결정 하였다. 결정된 북한 광산지역의 세부 설명은 2.3절에서 다루어진다.



그림 2.1 북한 내 Sentinel-1A 위성 SAR 데이터 취득 가능 영역 (ASF DSV, 2024) (노란색 사각형: 위성 SAR 데이터 검색 범위) (빨간색, 파란색 사각형: 개별 Sentinel-1A 위성 SAR 데이터 영역)

## 2.3 분석 대상 북한 광산지역

본 연구에서는 3종류의 광물자원(석탄/철/연·아연)에 대해, 각 광물자원을 생산하는 4개소의 광산을 분석 대상으로 결정하였다. 이 중 석탄광 2개소(청남탄광·화풍탄광)는 평안남도 안주지구탄광연합기업소에 인접하여 위치하며, 철광(무산광산)은 함경북도 무산광산연합기업소, 연·아연광(검덕광산)은 함경남도 검덕광업연합기업소에 위치한다. 각 광산의 세부 정보와 위치는 통일부에서 제공하는 북한지도 및 북한정보포털 내 광 산 현황을 참고하였으며, 위성 이미지는 구글어스 제공 이미지를 활용하였다. 해당 자 료는 표 2.2 및 그림 2.3-6과 같다.



그림 2.2 데이터 취득영역을 고려한 북한 광산지역 입지 후보 (북한지하자원넷, 2024)

표 2.2 분석 대상 북한 광산목록 및 세부 정보 (통일부 북한정보포털)

광산	위치	소속	광종	매장량 (만 톤)	생산량 (만 톤)	품위	근로인원 (명)
청남탄광	평안남도 청남구	안주지구탄 광연합기업 소	갈탄	25,000	300	_	3,000
화풍탄광	평안남도 청남구	안주지구탄 광연합기업 소	갈탄	7,000	20	-	5,000
무산광산	함경북도 무산군	무산광산연 합기업소	자철광	206,231 (확정) 130,000 (가채)	1,000	Fe 65%	37,000
검덕광산	함경남도 단천시	검덕광업연 합기업소	연·아연	26,575	300	Pb+Zn 5.09% (Pb 0.88%) (Zn 4.21%)	9,000



그림 2.3 청남탄광 위치 정보 및 위성 이미지



그림 2.4 화풍탄광 위치 정보 및 위성 이미지









(a) 무산광산 위치 (통일부 북한지도)

그림 2.5 무산광산 위치 정보 및 위성 이미지



(a) 검덕광산 위치 (통일부 북한지도)



(b) 검덕광산 위성 이미지 (구글어스)그림 2.6 검덕광산 위치 정보 및 위성 이미지

## 2.4 위성SAR 기반 지반침하 분석기법 2.4.1 간섭영상 위상 차이

DInSAR 기법을 통한 지표 변위 분석에서는, 서로 다른 SAR 영상 간에 생성되는 간섭영상(Interferogram)의 위상(phase) 차이를 분석한다. 이후 이론적인 위상 차이 와 지표 변위 사이의 관계식을 활용하여, 최종적인 지표 변위를 산출한다. 그림 2.7은 서로 다른 SAR 영상에서 지표 변위에 의해 발생하는 위상 차이의 예시를 나타낸다. 하지만 간섭영상의 위상 차이는 지표 변위 외에도 다양한 원인에 의해 발생할 수 있으므로, 분석 과정에서 지표 변위를 제외한 다른 위상 차이의 발생 원인을 제외하 는 보정 과정이 필수적이다. 식(1)은 DInSAR 기법 적용 시 발생하는 위상 차이의 구 성 요소를 나타내며, 크게 지표 변위/지구 곡률/지형 및 고도/대기 굴절/장비 및 자 료처리 오류에 의한 요소로 나누어진다. 본 연구에서는 Sentinel-1A/B 위성 SAR 데 이터 처리 소프트웨어인 SNAP11 및 SNAPHU 플러그인을 활용하여, DInSAR 기법 적용 과정에서 위상 차이의 지표 변위 외 요소를 제거 및 보정하는 과정을 함께 수행 하였다.

 $\Delta \phi = \Delta \phi_d + \Delta \phi_e + \Delta \phi_t + \Delta \phi_a + \Delta \phi_s$ (1) $\Delta \phi = \Bar{eq}$  위상차 $\Delta \phi_d = \Bar{Aug}$  위상차 $\Delta \phi_d = \Bar{Aug}$  위상차 $\Delta \phi_e = \Bar{Aug}$  위상차 $\Delta \phi_t = \Bar{Aug}$  위상차 $\Delta \phi_t = \Bar{Aug}$  위상차 $\Delta \phi_a = \Bar{H}$  대기 굴절에 의한 위상차 $\Delta \phi_s = \Bar{Aug}$  망비 및 자료처리 오류 위상차



그림 2.7 지표 변위에 따른 SAR 영상 간의 위상 차이 예시 (유충식, 2022)

#### 2.4.2 DInSAR 및 지표 변위 산출 과정

본 연구에서는 DInSAR 기법의 적용을 위해, ESA에서 개발하여 공개 소프트웨어로 제공하고 있는 Sentinel Application Platform version 11 (SNAP11)을 활용하여 분석 과정을 수행하였다. 본 연구에서는 DInSAR 분석을 위해 12일 간격으로 촬영된 위성 SAR 영상 데이터셋을 활용하여, 시간 경과에 따른 북한 광산지역의 지표 변위 를 분석하였다. 위성 SAR 영상 내에서 분석 대상 북한 광산지역이 포함된 영역의 관 측폭(subswath) 및 버스트(burst)를 지정하여 관심 영역의 간섭영상을 작성하고, 이 를 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM) 및 위성 궤도 메타데이터, 기타 이 론적 위상 오차 제거기법을 적용하여 지표 변위에 따른 위상 차이를 도출하였다. 이 후 위상 차이 데이터의 불명확성(ambiguity) 제거를 위한 위상 펼침(unwrapping) 과 정을 수행한 후, 최종적으로 위상 차이에 따른 지표 변위 수치를 도출하였다. 해당 분석 과정은 그림 2.8과 같다.



그림 2.8 SNAP11 DInSAR 분석 과정에서의 데이터 처리 흐름도

위 분석 과정에서, [Read] - [TOPSAR-Split] - [Apply-Orbit-File] 과정에서는 각 위성 SAR 영상을 입력하고 해당 영상에서 간섭영상을 생성할 영역의 관측폭 및 버 스트를 동일하게 지정한 후, 사용한 SAR 영상의 위성 위치 및 속도 정보를 입력한 다. [Back-Geocoding] - [Enhanced-Spectral-Diversity] 과정에서는 간섭영상의 정확 도 향상을 위해 DEM을 활용한 각 영상의 정합과정 및 사용된 버스트 영역의 거리 (range), 방위각(azimuth) 변동에 따른 보정과정을 수행한다. 본 연구에서는 30 m의 공간해상도를 가지는 DEM인 SRTM 1sec HGT를 정합과정에 사용하였다. 정합 및 보정이 완료된 위성 SAR 영상에 [Interferogram] 과정을 수행하여 간섭영상을 생성 하며, 이후 과정들을 통해 지표 변위 외의 오차 요소를 제외하여 최종적인 지표 변 위에 따른 위상 차이를 도출한다. 해당 과정을 거쳐 생성되는 간섭영상 테이터의 예시는 그림 2.9와 같다.



그림 2.9 북한 청남·화풍탄광 지역 간섭영상 생성 결과 예시

위 과정으로 도출된 위상 차이 데이터는 0-2π 범위의 2차원 위상 배열 데이터이 다. 이를 지표 변위에 따라 실제로 발생하는 위상 차이 범위로 복원하기 위해서는, 최대 사후 확률(maximum a posteriori probability, MAP)에 기초한 위상 펼침 과정이 필수적으로 수행되어야 한다. 위상 펼침의 이론적 예시는 그림 2.10과 같으며, 해당 과정 이후 위상 차이와 산란체(scatterer) 변위의 이론적 관계식에 따라 지표 변위를 도출한다.



그림 2.10 간섭영상의 초기 위상 차이 데이터 (좌) 및 위상 펼침 결과 예시 (우) (Braun and Veci, 2021)

## 2.5 북한광산지역 지반침하 분석결과

2.5.1 연 간격 지표 변위 분석

본 연구에서는 12일 간격의 위성 SAR 영상을 활용한 지표 변위 분석에 앞서, 1년 간격으로 촬영된 위성 SAR 영상을 활용한 연 간격 지표 변위 분석을 시험적으로 수 행하였다. 해당 분석에서 사용된 북한 광산지역의 영상 촬영 일자는 표 2.3과 같다.

표 2.3 연 간격 지표 변위 분석을 위한 위성 SAR 영상 정보

	· · ·		
지역	시점 촬영일	종점 촬영일	시차 (일)
청남·화풍탄광	2023-01-11	2024-01-12	367
무산광산	2023-01-14	2024-01-18	361
검덕광산	2023-07-18	2024-07-12	361

해당 영상을 활용한 북한 광산지역 지반침하 분석 결과는 그림 2.11과 같다. 분석 대상 영역 내에서 발생한 최대 지반침하량은 청남·화풍탄광 약 6.8 cm, 무산광산 약 5.8 cm, 검덕광산 약 16.0 cm 수준으로 분석되었다. 하지만 해당 분석 결과들의 경 우 영역 내에서 지반침하량을 산정하지 못하는 영역이 존재하였으며, 이는 장기간의 시간 해상도에 따른 위상 긴밀도 저하의 영향으로 판단된다 (김여진, 홍상훈, 2024).



(a) 청남·화풍탄광 구글어스 위성 이미지 (좌) 및 지반침하 분석 결과 (우)



(b) 무산광산 구글어스 위성 이미지 (좌) 및 지반침하 분석 결과 (우)



(c) 검덕광산 구글어스 위성 이미지 (좌) 및 지반침하 분석 결과 (우)

그림 2.11 분석 대상 북한 광산지역의 위성 이미지 및 지반침하 분석 결과

#### 2.5.2 12일 간격 지표 변위 분석

본 연구에서는 2024년 1-6월 기간 12일 간격으로 촬영된 Sentinel-1A 위성 SAR 영상을 활용하여, 해당 기간에 발생한 북한 광산지역의 지반침하 현황을 정량적으로 분석하였다. 분석에 사용된 위성 SAR 영상의 촬영 정보는 표 2.4와 같다.

표 2.4 12일 간격 지표 변위 분석을 위한 위성 SAR 영상 정보

	지역	시점 촬영일	종점 촬영일	영상 개수	시차 (일)
	청남·화풍탄광	2024-01-12	2024-06-16	14	12
	무산광산	2024-01-09	2024-06-25	14	12
	검덕광산*	2024-03-02	2024-06-30	8	12
_					

\*검덕광산 지역의 1,2월 SAR 영상은 제공되지 않아 본 연구에서는 미포함

최종적으로 청남·화풍탄광의 경우, 1-6월 기간 총 14개의 위성 SAR 영상을 활용하 여 13개의 간섭영상을 도출하였다. 무산광산의 경우 1-6월 기간 내 15회의 촬영 주 기 중 2월 14일 데이터가 누락되어 총 14개의 위성 SAR 영상을 활용하였으며, 분석 결과 4월 26일 및 6월 25일 영상을 포함한 분석 결과물에 오류가 존재하여 최종적으 로 10개의 간섭 영상을 도출하였다. 검덕광산에서는 3-6월 기간 내 11회의 촬영 주 기 중 3회의 데이터가 누락되어, 총 8개의 위성 SAR 영상을 활용하여 7개의 간섭영 상을 도출하였다. 해당 간섭영상을 활용한 지반침하 분석 결과는 그림 2.12-14에 나 타내었다.

도출한 지반침하 분석 결과에서, 정량적인 지반침하량 수치는 해당 데이터를 구성 하는 10 x 10 m<sup>2</sup> 크기의 셀에서 계산된 지표 변위 수치로 나타난다. 이때 분석 대상 광산지역의 지반침하량은 해당 광산의 위·경도 값이 위치하는 셀의 수치로 결정할 수 있다. 하지만 본 연구에서 해당 방법으로 지반침하 시계열 분석을 수행했을 때, 시간 경과에 따른 비일관적인 지반침하 경향성이 분석되었다. 이는 분석 대상 광산들이 상 대적으로 식생이 발달한 지역에 위치해, 간섭영상의 긴밀도(coherence) 확보에 중요 한 요소인 고정산란체 빈도가 낮았기 때문으로 분석된다 (Fiaschi et al., 2019). 따 라서 본 연구에서는 그림 2.15와 같이 분석 대상 광산 위치의 셀에서 100 m 주변부 에 위치한 셀들의 평균 지반침하량을 계산하여 간섭영상 긴밀도에 따른 오차를 최소 화하였다.



그림 2.12 청남·화풍탄광 지역 2024년 1-6월 지반침하 분석 결과



24/06/01 - 24/06/13

그림 2.13 무산광산 지역 2024년 1-6월 지반침하 분석 결과

- 청남·화풍탄광

청남탄광에서 분석 기간(156일) 내에 발생한 지반침하량은 약 7.78 cm 수준으로 분석되었으며, 이를 연간 침하량으로 환산할 경우 약 18.21 cm/yr 이다. 화풍탄광의 경우 동일한 분석 기간에 발생한 지반침하량은 약 6.14 cm이며, 연간 침하량으로 환 산한 결과는 약 14.36 cm/yr 이다. 각 광산지역의 간섭영상 별 지반침하량 및 누적 침하량 그래프는 그림 2.16-17과 같다.

해당 두 광산의 경우 인접한 지역(청남구 안주지구탄광연합기업소)에 위치하여 유사 한 지반침하 양상을 보이며, 10번째 간섭영상(4/29-5/11) 기간을 예외로 간주하면 전체 분석 기간에서 침하 발생 및 누적 침하량 상승 양상을 나타낸다. 이와 같은 지 속적인 지반침하 발생 양상은 해당 지역의 광물자원 채굴 진행 또는 폐광산의 영향으 로 인한 지반침하의 발생 가능성을 시사하며, 향후 해당 광산지역을 활용할 경우 지 반침하 방지를 위한 보강 대책이 필수적으로 요구된다.



24/05/25 - 24/06/30

그림 2.14 검덕광산 지역 2024년 3-6월 지반침하 분석 결과



**그림 2.15** 지반침하량 계산을 위한 광산 주변부 셀 위치 분포 (파란색: 광산 위치 셀, 빨간색: 평균 지반침하량 계산 셀)



그림 2.16 청남탄광 기간별 및 누적 지반침하량 그래프



그림 2.17 화풍탄광 기간별 및 누적 지반침하량 그래프

- 무산광산

무산광산은 노천채굴 방식으로 광물자원을 생산하는 특성으로 인해, 상대적으로 지 반침하의 위험성에서 자유로울 것으로 예측된다. 실제로 위성 SAR 영상에 기초한 지 반침하 분석 결과 역시, 분석 기간(120일) 내에서 뚜렷한 지반침하 양상은 관측되지 않았으며, 대부분의 기간에서 지표면이 상승하는 분석 결과가 관측되었다. 이에 따른 결과적인 누적 지표 변위값은 약 -7.17 cm 수준으로, 연간 약 21.82 cm 수준의 지 표 융기가 발생하는 것으로 분석되었다 (그림 2.18). 이는 무산광산의 노천채굴 과정 에서 이루어지는 폐석 처분과정 등의 영향으로 분석되며, 해당 지역에서 광산활동으 로 인한 지반침하의 영향은 크지 않을 것으로 예측된다.



그림 2.18 무산광산 기간별 및 누적 지반침하량 그래프

- 검덕광산

검덕광산의 분석 기간(84일) 내 지반침하 분석 결과는 그림 2.19와 같다. 해당 기간 동안 분석된 지반침하량은 약 -1.57 cm 으로, 연간 약 6.8 cm/yr 수준의 지표 융기 가 발생함을 확인하였다. 하지만 타 분석 기간에 비해 상대적으로 높은 수준의 지표 변위가 관측된 4/7-5/1 기간 및 5/25-6/30 기간을 오차로 간주하여 제외할 경우, 약 1.3 cm/yr 수준의 연간 지반침하가 발생하는 것으로 분석되었다. 결과적으로 검 덕광산 지역의 경우 데이터 해석에 따라 지반침하의 발생 위험성이 존재하나, 그 수 준은 앞선 청남·화풍탄광의 사례에 비해 심각하지 않을 것으로 예측된다.



그림 2.19 검덕광산 기간별 및 누적 지반침하량 그래프

## 3. 태양광 설치 적합성 평가를 위한 지형 위성 데이터 분석

이 장에서는 지형 위성 데이터, DEM을 활용하여 태양광 발전소 설치의 안정성을 평가한다. GIS(Geographic Information Systems) 분석을 통해 고해상도 및 저해상 도의 DEM을 사용하여 주요 지형 파라미터를 추출하였다. 여기서 지형 파라미터는 태 양광 발전소 설치 적합성 평가에 주요한 요인인 경사각(slope), 경사 방향(aspect), 지형 그림자(hillshade), 그리고 수계(stream)이다. 각 지형 파라미터에 대해 DEM 해 상도에 따른 상관성과 일광성을 평가하였다 (그림 3.1). 최종적으로는 노천광산에서의 태양광 발전소 설치 후보지를 평가하고 각 해상도의 DEM을 사용하여 태양광 발전 잠재량을 평가하였다.



그림 3.1 DEM(Digital Elevation Model) 해상도에 따른 지형 파라미터 비교 연구 흐름도

## 3.1 연구지역 및 자료

분석에 사용된 저해상도 DEM은 공간해상도 30 m인 ASTER GDEM V003으로, 전 세계의 지형을 커버하고 북한 전역에 대해서도 제공된다 (그림 3.2(a), 표 3.1 ; ASF, 2024). 고해상도 DEM은 공간해상도 12.5 m인 ALOSPALSAR DEM으로, 북한의 일 부 지역만을 커버한다 (그림 3.2(b), 표 3.1 ; NASA, 2024).



**그림 3.2** 북한 영역의 DEM(Digital Elevation Model) 제공 영역 비교. (a) 저해상도 DEM 제공 범위, (b) 고해상도 DEM 제공 범위

본 연구에서는 지형 유형을 '산지', '혼합 지형', '해안가'로 구분하여 각각의 분석 영역을 설정하였다(그림 3.3). 각 분석 영역은 75 x 75 km (5,625 km<sup>2</sup>)의 크기를 가 지며, 저해상도 DEM은 영역당 약 6,250,000개의 30 x 30 m<sup>2</sup> 크기의 셀들을, 고해상 도 DEM은 약 36,000,000개의 12.5 x 12.5 m<sup>2</sup> 크기의 셀들을 가진다 (표 3.1).

표 3.1 DEM(Digital Elevation Model) 데이터 정보

	Low Resolution (LR)	High Resolution (HR)	
Spatial resolution	30 m	12.5 m	
Satellite	ASTER GDEM 003	ALOS PALSAR	
	NASA(National Aeronautics	JAXA(Japan Aerospace	
Owner (Operator	and Space Administration),	Exploration Agency),	
Owner/Operator	METI(Ministry of Economy,	METI(Ministry of Economy,	
	Trade and Industry)	Trade and Industry)	
Cell count in study	6 250 000	36,000,000	
area of 5625 km <sup>2</sup>	0,230,000	36,000,000	



그림 3.3 지형 유형별 연구 영역 위치

지형 유형에 따라 DEM의 표현 차이가 존재하며, 이는 지형 파라미터(경사각, 방향 각, 그림자, 수계) 분석에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단되어 다음과 같은 기준으로 지형 유형을 구분하였다. 먼저 산지는 20°이상의 가파른 경사각을 보이며 이 지형의 경사 분포는 30°부근에서 뚜렷한 피크를 나타낸다. 혼합 지형은 5°와 15°의 경사각에 서 두 차례 피크가 나타나며, 이는 산지와 완만한 지역이 혼합된 곳이다. 마지막으로, 해안가는 경사각이 5°이하로 매우 완만한 지역으로, 경사 분포에서 낮은 피크를 보 인다 (그림 3.4).



#### 3.2 DEM에서 파생된 지형파라미터의 비교분석

본 연구에서는 ArcGIS Pro 소프트웨어를 사용하여 공간분석을 수행하였다. 저해 상도와 고해상도의 DEM을 입력값으로 사용하여 지형 파라미터 값을 도출했으며, 두 해상도로부터 얻은 결과를 비교하기 위해 상관성 및 일관성 평가를 수행하였다.

상관성 평가는 결정계수(R<sup>2</sup>)를 활용하여 수행되며, 이는 저해상도 DEM에서 도출 된 결과가 고해상도 DEM 결과를 얼마나 잘 설명하는지를 정량적으로 나타낸다. 결정 계수(R<sup>2</sup>)는 식 (1) - (4)와 같이 계산되며, 여기서 저해상도 DEM에서 얻은 결과를 *x*, 고해상도 DEM에서 얻은 결과를 *y*, *y*는 평균, *i*는 개별 셀을 의미한다.

$$SST = \sum_{i}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2} \qquad (1)$$

$$SSR = \sum_{i}^{n} (x_{i} - \overline{y})^{2} \qquad (2)$$

$$SSE = \sum_{i}^{n} (y_{i} - x_{i})^{2} \qquad (3)$$

$$R^{2} = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \qquad (4)$$

일관성 분석은 선행 연구에 기반한 태양광 발전소 설치에 적합한 지형 기준을 사용하여 각 지형 파라미터의 결과 값을 '적합'과 '부적합'으로 분류하였다. 교차분석(cr oss-tabulation)을 활용하여 두 해상도가 동일하게 '적합' 또는 '부적합'으로 판단한 경우의 비율을 합산하여 일관성을 평가하였다.

## 3.2.1 지형 경사각

지형 경사각(slope)은 지표면의 두 지점 사이의 고도 변화로, 0-90° 사이의 각도를 가진다. DEM으로부터 지형 경사각을 추출할 때 각 셀의 경사각은 중심셀을 포함한 9 개의 인접 셀(3x3)을 고려하여 계산된다. 여기서 각 셀 사이의 수평 거리는 셀의 크 기, 즉 해상도에 의해 결정되고, 수직 거리는 셀 간의 높이 차이로 결정된다. 이러한 경사각 측정 방법은 DEM의 해상도에 따라 결과에 큰 영향을 미친다. 예를 들어, 그 림 3.5에서 볼 수 있듯이, 저해상도 DEM (그림 3.5(a))과 고해상도 DEM (그림 3.5 (b))으로 표현된 경사각은 시각적으로 다르게 나타난다. 고해상도 DEM은 보다 연속적 인 경사도를 제공하여 더 정확한 지형 표현이 가능한 반면, 저해상도 DEM은 더 적은 세부사항을 포착하여 경사각이 단절적으로 나타날 수 있다. 이러한 차이는 지형의 실 제 경사가 연속적이라는 사실에도 불구하고 해상도에 따라 그 표현이 달라질 수 있음 을 보여준다. 특히 태양광 발전소 설치에 적합한 부지를 선정하는 과정에서는 장기적 으로 지형이 안정적인 부지를 선택하는 것이 필수적이므로, 해상도가 이러한 분석에 결정적인 영향을 미친다.



그림 3.5 해상도별 지형 경사각 비교. (a) 저해상도, (b) 고해상도

본 연구에서는 산지, 혼합지형, 해안가의 세 가지 지형 유형을 분류하여 저해상도와 고해상도 DEM에서의 경사각 상관성을 분석하였다 (그림 3.6). 이 세 지형 유형에서 의 두 해상도 간 경사각의 평균 상관성은 0.936으로 나타났다. 산지에서는 경사각 값 의 분포가 넓게 나타나면서 두 해상도간의 상관성이 상대적으로 낮은 0.923을 기록했 다. 반면, 평탄한 지형을 포함하는 혼합지형에서는 상관성이 더 높은 0.959를 보였다. 해안가에서는 경사각이 주로 0°에서 5° 사이에 집중되어 있으며, 해안가에서는 저해상 도 DEM은 고해상도 DEM에 비해 경사각을 더 높게 추출하는 경향을 보였다.



그림 3.6 해상도간의 경사각 상관성. (a) 산지, (b) 혼합지형, (c) 해안가

지형의 불안정성은 경사각이 10°이상일 때 증가하며, 이러한 불안정한 경사면은 지반 이동의 위험에 영향을 미친다. 따라서, 태양광 발전소 설치는 경사가 10°이하인 부지에 권장된다 (Nebey et al., 2020). 이 기준을 바탕으로 태양광 발전소 설치 적 합 및 부적합 지역을 10°를 경계로 구분하고, 이에 따른 해상도 간 일관성 분석을 수 행하였다 (표 3.2).

				High resolution	I
			Uninstallable	Installable	Total
	Mountainou	Uninstallable	90.02	1.7	91.72
	-	Installable	1.69	6.59	8.28
	S	Total	91.71	8.29	96.61
Low	Mixed terrain	Uninstallable	65.27	2.45	67.72
resolutio		Installable	3.11	29.17	32.28
n		Total	63.38	31.62	94.44
		Uninstallable	22.75	1.22	23.97
	Coastal	Installable	3.37	72.65	76.02
		Total	26.12	73.87	95.4

표 3.2 경사각에 대한 태양광 설치 적합 부지 교차 분석(%)

해상도 간 일관성은 모든 지형 유형에서 평균 95%로 높게 나타났다. 산지에서는 일관성이 96%로 가장 높으며, 이는 대부분의 산지가 10°이상의 경사를 보여 저해상 도와 고해상도 모두에서 설치 부적합으로 판단되었기 때문이다. 반면, 혼합지형은 일 관성이 94%로 가장 낮았으며, 이는 10°부근에서의 밀도가 높아 설치 적합과 부적합 판단이 미묘하게 달라질 수 있기 때문이다. 고해상도에서는 설치 부적합으로 판단한 경우가 저해상도보다 3% 이상 높다.

## 3.2.2 경사방향각

경사방향각(aspect)은 지형의 경사가 가장 큰 방향을 나타내며, 북반구에서는 북쪽 을 기준으로 시계 방향으로 측정된 0°에서 360° 사이의 각도로 정의된다. 경사가 없 는 평지는 일반적으로 -1로 표시하며, 분석 소프트웨어에 따라 다를 수 있다. 경사방 향각은 일반적으로 지형의 최대 하강 경사 방향을 가리킨다. 고해상도 DEM을 사용하 여 추출된 경사방향은 더 세밀한 지형의 변화를 포착할 수 있기 때문에, 경사방향각 의 변화가 저해상도 DEM으로 분석된 결과보다 빈번하게 나타난다 (그림 3.7(b)).



그림 3.7 해상도별 경사방향각 비교. (a) 저해상도, (b) 고해상도

경사방향각 값의 두 해상도 간 상관성은 지형 유형별로 상이하게 나타나며, 평균 0.66의 상관계수를 가진다 (그림 3.8). 특히 해안가 지역에서는 상관성이 가장 낮아 0.421을 기록하며 상당한 불일치를 보인다. 반면, 산지와 혼합지형에서는 상관성이 약 0.8로 나타나 해안가에 비해 상관성이 두 배 높다. 해안가에서는 평지의 비율이 높으며, 저해상도와 고해상도 간에 평지에 대한 판별 결과가 상이하게 나타나는 경향 을 보인다.



그림 3.8 해상도간의 경사방향각 상관성. (a) 산지, (b) 혼합지형, (c) 해안가

북반구에 위치한 지역에서 태양광 패널을 설치할 때는 경사방향각이 남향(157.5<sup>°</sup>-202.5<sup>°</sup>)인 사면에서 최적의 에너지 생산성을 나타낸다 (Jacobson et al., 2018). 따라 서 남향의 경사면에 태양광 발전소를 설치할 경우, 경사 조정을 통한 추가적인 경제 적 비용 없이 안정성을 확보할 수 있다. 평지(-1)의 경우에도 남향으로 태양광 패널을 설치하는 것이 가능하기 때문에, 남향과 평지를 설치 적합 기준으로 설정하고, 그 외 의 방향각은 설치 부적합으로 구분하였다.

				High resolution	
			Uninstallable	Installable	Total
	Mountainou	Uninstallable	85.83	2.76	88.59
	wountainou -	Installable	2.05	9.36	11.41
	S	Total	87.88	12.12	95.19
Low	Mixod	Uninstallable	84.5	4.43	88.93
resolutio	NIXEU	Installable	2.84	8.22	11.06
n	terrain	Total	87.34	12.65	92.72
		Uninstallable	48.86	6.1	54.96
	Coastal	Installable	5.11	39.94	45.05
		Total	53.97	46.04	88.8

표 3.3 경사방향각에 대한 태양광 설치 적합 부지 교차 분석 (%)

설치 적합 및 부적합 판별에 대한 일관성 분석 결과, 산지에서의 일관성은 95%로 가장 높게 나타났으며, 해안가에서는 89%로 가장 낮다 (표 3.3). 이는 상관성 분석과 동일하게 해안가에서 평지 부분에서의 경사방향각 변동성이 높은 것을 반영한다.

#### 3.2.2 지형 그림자

지형 그림자는 특히 높은 산지와 같은 지형에 의해 태양이 가려짐으로써 발생하며, 이는 태양광 발전량을 저하시키는 주요 요인이다. 따라서, 태양광 발전소 설치 전에 지형 그림자를 분석하는 것은 필수적인 절차이며, 본 연구에서는 대표적인 그림자 분 석 방법인 ArcGIS의 Hillshade 기능을 통해 그림자를 모델링하였다 (Esri, 2023). Hillshade 분석은 DEM을 입력값으로 사용하여 태양의 위치에 따른 지형에 의해 생 성된 음영 값을 계산하고, 이는 태양의 위치 (고도와 방위각), 그리고 지형의 경사각 및 방향각을 포함한 식 (5)을 통해 계산된다. 여기서 *Z*는 태양 천정각(radian),  $\gamma$  는 태양의 방위각, *S*는 지표면의 경사각(radian), *A*는 지표면의 경사방향각(radian)이다. Hillshade 값이 0일 때는 완전한 그림자를 나타내며, 1부터 255 사이의 값은 그림자 가 없는 부분의 시각적 음영을 표현한다.

 $\text{Hillshade} = 255 \times \{ [\cos(Z) \times \cos(S)] + [\sin(Z) \times \sin(S) \times \cos(\gamma - A)] \}$ (5)

본 연구에서는 태양의 고도가 가장 낮은 동지와 태양광 발전이 가장 활발한 정오를 기준으로 Hillshade 분석을 수행하였다. 그림 3.9는 저해상도와 고해상도 DEM으로 표현된 Hillshade 분석 결과를 보여주며, 시각적으로 고해상도가 더 연속성 있는 지 형 음영을 잘 표현하는 것을 확인할 수 있다. 그림자가 진 것으로 판별되는 값 0과 아닌 값(1-255)을 이진으로 구분하여 나타낸 결과는 그림 3.10에서 확인할 수 있으 며, 고해상도 DEM에서 그림자로 판단된 영역이 넓은 것을 확인할 수 있다.



그림 3.9 해상도별 Hillshade 비교. (a) 저해상도, (b) 고해상도



그림 3.10 해상도별 그림자 비교. (a) 저해상도, (b) 고해상도

세 지형 유형에서 그림자에 대한 두 해상도 간의 상관성은 평균 0.963으로 높게 나 타났다 (그림 3.11). 산지에서는 두 해상도로 추출한 Hillshade 값에서 음영이 많이 생성되는 비율이 높아, 상관성이 가장 높은 0.980을 기록했다. 반면, 해안가에서는 Hillshade 값이 주로 100 - 150 범위에 분포하고, 이 범위에서 두 해상도 간의 불일 치가 발생하여 상관성이 0.933으로 상대적으로 낮다.



그림 3.11 해상도간의 Hillshade 상관성. (a) 산지, (b) 혼합지형, (c) 해안가

교차분석은 동짓날 정오에 지형에 의해 그림자가 생성되었을 때와 생성되지 않았을 때를 기준으로 설치 적합과 부적합 지를 구분하여 진행하였다. 분석 결과, 산지에서는 두 해상도 간 일관성이 97%로 나타났으며, 고해상도는 설치 부적합으로, 저해상도는 설치 적합으로 판별된 경우가 2.23%로 상대적으로 불일치 비율이 높다 (표 3.4). 반 면, 그림자가 1% 미만으로 생성된 해안가는 설치 적합지 비율이 높아 일관성이 99% 로 매우 높게 나타났다.

				High resolutio	n
			Uninstallable	Installable	Total
		Uninstallable	7.96	0.58	8.54
	Mountainous	Installable	2.23	89.23	91.46
		Total	10.19	89.81	97.19
	Mixed terrain	Uninstallable	4.69	0.29	4.98
		Installable	1.3	93.72	95.02
resolution		Total	5.99	94.01	98.41
		Uninstallable	0.74	0.14	0.88
	Coastal	Installable	0.43	98.7	99.13
		Total	1.17	98.84	99.44

표 3.4 그림자 여부에 대한 태양광 설치 적합 부지 교차 분석 (%)

#### 3.2.3 수계

수계(Stream)는 지형에서 물이 모이고 유출되는 경로를 형성하는 네트워크로, 이 는 홍수 및 범람에 취약한 지역을 식별하는 데 필수적인 공간 분석이다. 본 연구에서 는 지형의 경사와 인접 8방향의 셀을 고려하여 흐름 방향을 결정하고, 흐름의 누적량 (flow accumulation)을 계산하여 수계를 분석하였다. 수계를 파악할 때 누적 흐름량 의 임계값(threshold)은 결과에 직접적인 영향을 미치며 사용자의 결정에 따라 조정 된다 (Ozulu, 2018). 본 연구에서는 GIS 분석에서 널리 사용돠는 최대 누적 흐름 값 의 1%를 임계값으로 설정하였다 (Oliveira, 2002). 그 후 Shreve method를 활용하 여 하천의 지류와 본류 간 상대적 위치에 따라 하천의 차수를 할당하였다. Shreve의 하천차수 할당 방법은 가장 외곽의 지류에 "1"이라는 숫자를 부여하고, 두 수계가 합 류하는 지점에서는 이 숫자들이 합산된다 (Shreve, 1966).

표 3.5 DEM(Digital Elevation Model) 해상도별 하천 차수 비율

	Mount	ainous	Mixed terrain		Coastal	
	LR	HR	LR	HR	LR	HR
#of 1st order	11,365	27,355	4,355	13,470	16,049	10,532
# of 2nd order	3,159	7,511	2,252	4,689	3,025	3,288
# of 3rd order	2,217	5,174	1,030	5,109	1,284	957
# of others	6,304	15,176	0	8,371	4,635	3,260

고해상도 DEM을 사용한 결과, 산지와 혼합지형에서 수계의 감지 빈도가 높았으며, 해안가에서는 저해상도 DEM이 더 많은 수계를 감지했다. 그림 3.12와 표 3.5를 통해 확인할 수 있듯이, 하천차수 비율의 상관성은 세 지형 유형 평균 0.87로 나타났으며, 산지에서는 가장 높은 0.99를, 혼합지형에서는 가장 낮은 0.62를 기록했다.



그림 3.12 해상도 및 지형 유형별 하천차수

수계로부터 1 km 이상 떨어진 지역은 홍수 및 범람으로 인한 피해를 피할 수 있 는 안전한 위치로 간주된다 (Nebey et al., 2020). 이에 따라, 본 연구에서는 수계로 부터 1 km 이내에 위치한 곳을 태양광 발전소 설치 부적합 지역으로 판단하였다. 그 림 3.13은 해안가 일부 지역을 예로 들어, 수계가 길고 지류가 많은 경우, 반경 1 k m 내의 대부분 지역이 설치 부적합으로 판단되었으며, 이로 인해 설치 가능한 지역 이 현저히 줄어드는 중요한 사항을 확인할 수 있다.



그림 3.13 해상도별 수계로부터의 거리 (해안가 지역 일부)

두 해상도 간의 일관성은 산지에서 99%로 가장 높으며, 해안가에서는 85%로 가장 낮다(표 3.6). 해안가의 낮은 일관성은 유출구 위치와 수계를 판별할 때 누적흐름량의 임계값의 중요성 때문인데, 본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 최대 흐름량의 1%

를 기준으로 수계를 판별했으며, 저해상도 DEM에서 해안가의 최대 흐름 값이 낮게 측정되어 1% 기준으로 더 많은 지역이 수계로 분류되었다.

				High resolutio	n
			Uninstallable	Installable	Total
		Uninstallable	30.22	0.27	30.49
	Mountainous	Installable	0.21	69.3	69.51
		Total	30.43	69.57	99.52
	Mixed	Uninstallable	10.53	0.09	10.62
2010	terrain	Installable	7.7	81.68	89.38
resolution		Total	18.23	81.77	92.21
		Uninstallable	21.18	13.6	34.78
	Coastal	Installable	0.85	64.37	65.22
		Total	22.03	77.97	85.55

표 3.6 수계에 대한 태양광 설치 적합 부지 교차 분석 (%)

## 3.3 태양광 발전소 설치 적합성 분석

## 3.3.1 태양광 발전소 설치 적합지 교차 분석

본 연구에서는 DEM으로부터 추출한 네 개의 지형 파라미터(경사각, 경사방향각, 그림자, 수계)를 통합하여 태양광 발전소 설치 적합성을 평가하였다. 교차 분석 결과 산지, 혼합지형, 해안가의 세 가지 지형 유형에 대해 고해상도 DEM이 저해상도에 비 해 일관적으로 더 넓은 설치 적합 영역을 가짐을 확인하였다 (표 3.7). 특히, 혼합지 형에서는 99%의 높은 일관성을 보였으며, 해안가에서는 상대적으로 낮은 90%의 일 관성을 보였다. 해안가는 설치 적합 영역이 넓지만 해상도 간의 유사성이 낮은 것으 로 나타나, 위성 지형 데이터의 해상도가 태양광 발전소 설치 적합성 평가에 중요한 요소임을 강조한다.

				High resolutior	ו
			Uninstallable	Installable	Total
		Uninstallable	95.21	2.1	97.31
	Mountainous	Installable	1.26	1.44	2.7
		Total	96.47	3.54	96.65
	Mixed	Uninstallable	93.72	1.3	95.02
2010	MIXCO	Installable	0.29	4.69	4.98
resolution	terrain	Total	94.01	5.99	98.41
		Uninstallable	86.58	6.65	93.23
	Coastal	Installable	3.6	3.16	6.76
		Total	90.18	9.81	89.74

표 3.7 태양광 발전소 설치 적합지 교차 분석 (%)

## 3.3.2 노천광산 대상 태양광 발전소 설치 적합성 분석

북한의 노천 광산을 대상으로 태양광 발전소 설치 적합성을 분석하였다. 지형 유 형별로 구분된 분석 지역에 위치한 세 개의 대상 광산에서 태양광 발전소 설치 적합 지를 평가하였으며, 이 광산들의 지리적 분포는 그림 3.14에서 확인할 수 있다. 분석 에 활용된 기상 데이터는 TMY(Typical Meteorological Year)로, 분석 대상지와 근 접한 해주와 청진의 TMY 데이터를 사용하였다. TMY는 장기 기상 데이터베이스에서 대표적인 1년치, 1시간 단위의 기상 트렌드를 나타내는 가상적으로 제작된 데이터이 며, IWEC에서 제공하는 데이터를 활용하였다 (Energyplus, 2024). 태양광 예상 발전 량 산정을 위해 미국 신재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 개발한 SAM(System Advisor Model) 소프트웨어를 사용하 였고, 사용된 태양광 패널은 한화 Qcell Q.PEAK L-G5 365-380이며, 인버터는 Q.VOLT P125T-X 모델을 참고하였다 (Qcells, 2024). 모든 태양광 패널의 방향각은 180°, 패널의 기울기는 위도와 동일한 각도로 설정하였다.



그림 3.14 분석 대상 노천 광산 분포 및 기상데이터 제공 위치



그림 3.15 노천광산 태양광 발전소 설치 적합 부지. (a) 산지, (b) 혼합지형, (c) 해안가

분석 결과, 각 노천 광산 전체 영역 대비 태양광 발전소 설치 적합 부지 면적의 비율은 해안가에서 6.5%, 혼합지형에서 약 2%, 산지에서는 약 1.5%로 나타났다. 고 해상도와 저해상도 DEM으로 분석한 결과를 비교했을 때, 고해상도에서 모든 지형 유 형에 대해 설치 적합 부지 면적 비율이 더 높게 나타났으며, 혼합지형은 1%, 해안가 는 0.8%, 산지는 0.03% 더 높은 것으로 확인되었다. 이 차이를 연간 태양광 발전 잠 재량으로 환산하면, 혼합지형에서 1.94 GWh, 해안가에서 1.61 GWh, 산지에서 0.12 GWh의 차이가 발생한다. 이러한 차이는 광산의 경제성에 상당한 영향을 미치며, 태 양광 에너지의 활용은 노천 광산의 장기 운영을 경제적으로 지속 가능하게 하고 탈탄 소화를 촉진하는 데 크게 기여한다.

지형 유형	광산명	위도(°)	경도(°)	광산영역 (m <sup>2</sup> )	태양광 설치 적합 부지 면적 (m <sup>2</sup> )		연간 전력 생산량 (GWh)	
					LR	HR	LR	HR
산지	광산고개	41.81	128.91	1,477,809	21,719	22,188	5.53	5.65
혼합지형	신파광산	41.28	127.53	699,362	9,375	17,031	2.39	4.33
해안가	천광산	38.49	125.22	788,437	47,545	54,063	12.00	13.61

표 3.8 분석 대상 노천광산 정보 및 태양광 설치 적합 부지에 따른 연간 발전 잠재량

#### 4. 결론 및 제언

4.1 위성 SAR 영상 기반 북한 광산지역 지반침하 분석

본 연구에서는 접근성이 용이한 공개 위성 SAR 데이터인 Sentinel-1A 영상과 SNAP11 소프트웨어를 활용하여, 북한 주요 광산지역 3곳의 지반침하 발생 양상을 분석하였다. 북한 전역의 데이터를 획득하기 어려운 위성 SAR 영상의 특성을 고려하 여, 영상 제공 영역과 북한의 주요 광산지역을 비교하여 분석에 적합한 광산을 선정 하였다. 선정한 북한 광산지역을 대상으로 간섭영상 생성 및 정량적인 지표변위 분석 이 가능함을 확인하였으며, 광산지역의 발달한 식생으로 인한 간섭영상의 긴밀도 감 소 문제를 해결하기 위해, 대상 광산지역 주변부 셀의 지표변위 수치의 평균값을 계 산하여 분석 기간 내의 지반침하량을 정량적으로 도출하였다.

분석 결과 평안남도 청남구 소재 청남·화풍탄광의 경우 각 18.21, 14.36 cm/yr 수준의 지반침하량 및 지속적인 지반침하 양상이 관측되어, 해당 지역의 개발에 있어 서 지반침하 예방 및 피해 저감을 위한 보강 조치가 필수적임을 확인하였다. 함경남 도 단천시 소재 검덕광산의 경우 측정 오차를 감안하더라도 상대적으로 낮은 수준의 지반침하량 (약 1.3 cm/yr)이 관측되어, 상대적으로 지반침하에 있어서 안전함을 확 인하였다. 함경북도 무산군 소재 무산광산의 경우, 노천채굴 방식의 광산 특성으로 인 해 지반침하가 거의 발생하지 않는 분석 결과를 도출하였다.

본 연구 결과는 기존 위성사진 등을 활용한 정성적 분석에 그쳤던 북한 광산지역 의 지반침하 현황에 대해, 위성 SAR 영상 기반 정량적 분석 방법론을 수립하고 기초 적인 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 연구기간 및 활용 데이터의 한계로 인해 지 반침하에 대한 기본적인 시계열 분석만을 수행하였으며, 향후 보다 많은 수의 위성 SAR 데이터셋을 활용한 SBAS-InSAR 또는 PS-InSAR 기법을 적용함으로써, 보다 신뢰성 있는 북한 광산지역 지반침하 분석이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4.2 태양광 설치 적합성 평가를 위한 지형 위성 데이터 분석

본 연구에서는 고해상도와 저해상도의 지형 위성 데이터, 즉 DEM을 활용하여 네 가지 주요 지형 파라미터(경사각, 경사방향각, 그림자, 수계)의 상관성을 비교 분석하 였다. 분석 결과, 지형 그림자가 모든 파라미터 중 가장 높은 상관성을 보였으며, 설 치 적합 부지 판별에 있어서의 해상도별 일관성은 98%로 매우 높게 나타났다. 이는 저해상도와 고해상도 DEM에서 얻은 그림자 값 사이에 큰 차이가 없음을 의미한다. 따라서, 그림자 분석 시 접근성이 좋은 저해상도 데이터의 사용이 충분히 타당하다는 결론을 내릴 수 있다. 반면, 경사 방향의 경우 두 해상도 간 상관성이 0.66, 일관성이 92%로 상대적으로 낮게 나타났다. 태양광 부지의 경제성 및 안정성 평가에서 중요한 경사 방향은 고해상도 데이터의 사용이 필수적이라고 볼 수 있다. 지형 유형 중에서 는 산지에서 일관성 및 상관성이 높게 나타났으며, 해안가에서는 상대적으로 낮은 수 치를 보였다. 해안 지역은 경사각이 낮은 완만한 지형 특성으로 그림자가 적게 발생 하여 태양광 발전소 설치에 적합하지만, DEM 해상도에 따라 분석된 지형 파라미터 값의 차이가 크기 때문에 사용하는 지형 데이터의 해상도가 매우 중요하다.

노천 광산을 대상으로 DEM을 활용한 태양광 발전 적합 부지 판별 및 발전 잠재량 평가에서, 광산 전체 영역 대비 태양광 발전소 설치 적합 부지 면적의 비율은 해안가 에서 가장 높은 6.5%를 기록하였습니다. 고해상도 데이터를 사용한 분석 결과, 해안 가의 태양광 발전 설치 적합 부지 면적은 저해상도로 분석된 결과보다 약 1% (6518 m<sup>2</sup>) 더 높았으며, 이는 연간 1.61 GWh의 발전량 차이를 가져온다. 결과적으로, 해상 도에 따라 달라지는 분석 결과를 간과할 수 없으며, 각 해상도에서 도출된 결과의 정 확성을 신중하게 평가해야 한다. 본 연구는 특히 노천 광산과 같은 대규모 영역에서 태양광 에너지의 활용 가능성을 탐색하고, 경제적으로 지속 가능한 탈탄소화 전략을 수립하는 데 중요한 기여를 한다.

## 참고문헌

(1) 김여진, 홍상훈, 2024, TerraSAR-X/TanDEM-X 영상레이더 자료를 이용한 궤도 오차에 따른 잔여 위상 평가, Geodata, 6(4), 487-494. (2) 김태욱, 한향선, 2022, Sentinel-1 SAR 시계열 영상을 이용한 캐나타 앨버타 오일샌드 지역의 지표변위 분석, Korean Journal of Remote Sensing, 38(2), 139-151. (3) 송원경, 2019, 광산지역 지반침하 발생현황과 대책, 한국자원공학회지, 56(6), 676-687. (4) 송재준, 박형동, 김성민, 서장원, 강일석, 김진언, 최지원, 김한진, 임준수, 구지윤, 2021, 북한 광산기술인력 양성 및 희토류 광산 개발 전략 연구, 통일기반구축사업 연구보고서 (5) 오명찬, 김성민, 구영현, 박형동, 2018, 북한 검덕광산 인근 지역 태양광 잠재량 분석 및 최적 부지 선정, 신재생에너지, 14(3), 44-53. (6) 유충식, 2022, SAR 위성 영상을 이용한 도심지 지반 침하 모니터링 연구, 한국지반신소재학회논문집, 21(4), 55-67. (7) 윤성문, 장항석, 윤성택, 김덕민, 2018, 위성사진을 활용한 북한 지역 광산의 광해 현황 연구, 한국자원공학회지, 55(6), 564-575. (8) 전우현, 이종혁, 2021, PSInSAR 기법을 이용한 태국 방콕 지반침하 관측, Korean Journal of Remote Sensing, 37(6-1), 1625-1630. (9) 정용복, 김태혁, 송원경, 최광수, 권혀호, 2010, 지반침하영향인자 분석을 통한 광산지역 지반침하 위험도 평가법 개발, 한국지구시스템공학회지, 47(3), 324-338. (10) 조민지, 김상완, 2012, ALOS PALSAR(2006년~2010sus) 위성영상을 이용한 강원도 태백시 지반침하 관측 및 분석, 자원환경지질, 45(5), 503-512. (11) 최요순, 2013, 광업 분야의 재생에너지 기술 활용사례, 한국자원공학회지, 50(3), 422-429. (12) Bokhari, R., Shu, H., Tariq, A., Al-Ansari, N., Guluzade, R., Chen, T., Jamil, A. and Aslam, M., 2023, Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data, Heliyon, 9, e14690. (13) Fiaschi, S., Holohan, E. P., Sheehy, M. and Floris, M., 2019, PS-InSAR Analysis of Sentinel-1 Data for Detecting Ground Motion in Temperate Oceanic Climate Zones: A Case Study in the Republic of Ireland, Remote sensing, 11, 348. (14) Jacobson, M. Z. and Jadhav, V., 2018, World Estimates of PV Optimal Tilt Angles and Ratios of Sunlight Incident Upon Tilted and Tracked PV Panels Relative to Horizontal Panels, Solar Energy, 169, pp. 55-66. (15) Nebey, A. H., Taye, B. Z. and Workineh, T. G., 2020, Site suitability analysis of solar PV power generation in South Gondar, Amhara Region, Journal of Energy, 1, 3519257. (16) Oliveira, F., 2002, Arc Hydro: GIS for Water Resources; Maidment, D.R., Ed.; ESRI, Inc.: Redlands, CA, USA, 1, 55-86. (17) Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. and Cabral-Cano, E., 2016, Time series analysis of InSAR data: Methods and trends, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 90-102. (18) Ozulu, I. M., & Gökgöz, T., 2018, Examining the stream threshold approaches

used in hydrologic analysis, ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(6), 201.

(19) Shreve, R. L. 1966, Statistical law of stream numbers, The Journal of Geology, 74(1), 17-37.

(20) 국가통계포털 (KOSIS, Korean Statistical Information Service), 북한통계포털, 2023, '경제활동별 실질 국내총생산', (2025-01-19 접속)

(21) 국가통계포털 (KOSIS, Korean Statistical Information Service), 북한통계포털, 2023, '주요 광종 광산 수', (2025-01-19 접속)

(22) 국토교통부, 지하안전관리에 관한 특별법 (약칭: 지하안전법), (2022-01-28 시행)

(23) 북한지하자원넷, '북한 지하자원 및 광산 - 북한광산 분포',

https://irenk.net/?menuno=72, (2024-03-21 접속)

(24) 통일부, 북한정보포털, https://nkinfo.unikorea.go.kr/nkp/search/search.do, (2024-06-13 접속)

(25) 통일부, 북한지도, https://nkinfo.unikorea.go.kr/NKMap/, (2024-06-13 접속)

(26) 한국개발연구원 (KDI, Korea Developement Institute), 북한경제리뷰, 2021, 북한의 에너지 경제: 변화와 쟁점, 2021년 9월호

(27) 한국환경연구 (KEI,Korea Environent Institute), 2021, 북한환경동향 2021년 (28) ASF (Alaska Satellite Facility),

https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/, (2024-03-11 접속)

(29) ASF Data Search Vertex, https://search.asf.alaska.edu/#/, (2024-05-06 접속)

(30) Braun, A. and Veci, L., 2021, Sentinel-1 Toolbox: TOPS Interferometry Tutorial, Skywatch, https://step.esa.int/docs/tutorials/, (2024-09-09 접속)

(31) Carroll, D., 2021, 'Australian miner triples solar capacity at WA operation', PV magazine, (2024-12-26 접속)

(32) Energyplus, Weatherdata download,

https://energyplus.net/weather-location/asia\_wmo\_region\_2/PRK/PRK\_Haeju.470690\_ IWEC, (2024-09-14 접속)

(33) Esri, ArcGIS Pro, 2023, 'How Hillshade works'.

https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-hillshade-w orks.htm, (2024-08-18 접속)

(34) Google Earth, https://earth.google.com/web/, (2024-06-13 접속)

(35) McKinsey & Company, 2021, 'Creating the zero-carbon mine', (2024-04-01 접속)

(36) NASA (National Aeronautics and Space Administration), ASTER GDEM 003 (Adavanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model Version 3), https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp, (2024-05-07 접속)

(37) Open street map, https://www.openstreetmap.org/#map=7/35.948/127.736, (2024-10-10 접속)

(38) Price, T., 2021, 'Chevron: oil... yes, but geothermal, solar and biofuels too',

Renewable Energy Magazine, (2024-12-26 접속) (39) Qcells, 태양광 제품 소개, https://qcells.com/kr/get-started/complete-energy-solution/solar-panel, (2024-05-13 접속)