

북한 광산기술인력 양성 및 희토류 광산 개발 전략 연구

송재준¹, 박형동¹, 김성민², 서장원², 강일석³
김진언³, 최지원³, 김한진⁴, 임준수⁴, 구지윤⁵

¹ 서울대학교 에너지자원신기술연구소

² 강원대학교 에너지공학부

³ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

⁴ 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과

⁵ 이화여자대학교 환경공학과

1. 서론

최근 에너지·자원개발과 4차 산업기술의 결합은 기존 재래식 자원공학 기술이 지닌 탐사·생산 과정에서의 한계점을 극복하기 위한 방안으로 주목받고 있으며, 이에 대한민국(이하 남한)을 비롯한 세계 각국 에너지·자원공학계의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다. 또한 반도체, 배터리, 광학유리 등 4차 산업기술에 널리 활용되는 첨단 소재의 생산을 위해서는, 철, 구리, 아연, 금 등 기존의 주요 산업 금속광물자원 외에도 리튬, 코발트, 텅스텐 등의 희토류 광물자원이 필수적으로 요구되어, 이와 같은 광물자원의 확보를 위한 에너지·자원개발 기술의 중요성 역시 증가하고 있다. 하지만 한국지질자원연구원의 ‘광산물 수급분석 2019/2020’에 의하면 2019년 남한의 광물자원 자급률은 5%대에 불과할 정도로 대부분 수입에 의존하고 있으며, 특히 금속광물의 경우 금광, 은광, 연광을 제외한 금속광물의 자급률은 0%에 수렴하고 있는 실정이다(한국지질자원연구원, 2020).

이와 같이 대부분 수입에 의존하고 있는 남한의 광물자원 수요를 안정적으로 충족하기 위한 방안으로, 북한이 보유하고 있는 것으로 알려진 풍부한 광물자원을 대상으로 하는 개발사업의 추진이 과거로부터 논의되어 왔다. ‘통계청 북한통계’에 따르면, 북한의 광물자원, 특히 철, 구리 등의 주요 금속광물자원의 매장량은 남한의 10배 이상으로 분석되고 있다(국가통계포털, 2021). 또한 희토류 광물자원의 경우 룡포·선암·철산광산 등 북한 내 희토류 광산의 매장량 총합이 약 2,000만 톤에 달하는 것으로 추정되고 있으며, 이는 남한의 희토류 매장량인 54만 5천 톤의 약 40배에 달하는 수치이다(남북교류협력지원협회, 2018). 따라서 북한 광물자원 개발 사업이 성공적으로 추진될 경우, 남한이 필요로 하는 주요 금속광물자원 및 4차 산업기술에 요구되는 희토류 광물자원의 안정적 확보에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

하지만 북한 광물자원의 풍부한 매장량으로 인한 높은 개발 잠재성과 지리적 인접성으로 인한 사업 용이성에도 불구하고, 북한 광물자원 개발 사업은 자체적으로

다양한 리스크 요인을 내포하고 있다. 우선적으로, 북한이 공개하고 있는 광물자원 매장량은 북한 당국의 의도적인 매장량 과장 및 축소, 구체적인 매장량 산출기준의 부재로 인해 그 신뢰성이 의심되고 있다(임상철, 2014). 또한 북한 측 참여인력의 숙련도·교육·의사소통 문제로 인한 사업 추진일정의 지연 및 추가비용의 소요 문제가 과거 수행되었던 개성공단 사업 및 정춘 흑연광산 개발 사업에서 보고된 바 있다(박용석, 2010; 최경수, 2010). 장기간의 경제난으로 인한 북한의 인프라 부족 및 광업설비 노후화 문제, 특히 광물자원 개발사업의 수익성과 밀접한 영향이 있는 전력공급 문제 역시 많은 연구자들에 의해 지속적으로 지적되고 있는 북한 광물자원 개발 사업의 리스크 요인이다(정우진, 2019).

이와 같은 북한 광물자원 개발 사업의 다양한 리스크는 향후 남북한 협력 광물자원 개발 사업의 성공적인 진행을 위해서는 필수적으로 해결되어야 한다. 먼저 다양한 과거 남북한 협력사업 사례에서 제기되었던 북한 측 참여인력으로 인한 사업 진행 리스크 저감을 위한 기술인력 양성 방안이 수립이 필요하다. 또한 최근 에너지·자원공학계의 트렌드인 4차 산업기술과 결부하여 생각할 때, 북한 희토류 광산을 대상으로 한 인프라 구축 방안의 수립이 요구될 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 먼저 기수행한 북한 광업 학술지 연구동향 분석 결과와 북한의 광업 인력 동향 관련 통계자료를 활용하여, 북한 광산인력 실태 및 북한 광업의 기술적 역량을 분석하였다. 그리고 북한 광업 행정조직과 광물자원 매장량 산출기법, 광업법 및 광업규정 조항 등 북한 광업체계 분석 결과를 남한 광업체계와 비교하여, 현대 기준에 적합한 북한 광산기술인력 양성 방안을 도출하였다. 다음으로는 북한 희토류 광산인 룡포광산의 인프라 구축을 위한 태양광 발전 부지 분석을 GIS(지리정보시스템) 데이터에 기초하여 수행하였으며, 마지막으로 광해 관련 GIS 데이터를 획득하기 어려운 룡포광산을 대신하여, 북한 무산광산을 대상으로 광해발생 및 오염경로 분석을 수행하였다.

2. 북한의 광업 분야 사회·기술적 역량 분석

2.1 북한 광업인력 현황 분석

북한의 광업 분야 통계자료를 활용하여, 북한의 광업인력 현황을 분석하였다. ‘통계청 북한통계’에 따르면, 2019년 기준 광업은 북한 GDP의 약 11.0%, 대외 수출액의 약 28.8%를 차지하고 있는 주요한 산업 분야이다(국가통계포털, 2021). 이와 같이 북한 경제에서 광업이 차지하는 높은 비중은, 그림 2.1에 제시된 북한의 광산 근로자 현황을 통해 더욱 극명하게 드러난다. 2016년 기준 북한의 총 광산 근로자 수는 약 1,093,700명으로, 남한의 광산 근로자 수인 7,210명의 약 150배에 달하는 수치이다(방경진, 2018; 삼성증권, 2019). 특히 표 2.1과 같이 무산·검덕·상농·단천·대흥광산 등 북한의 주요 광산 및 광업기업소의 경우, 각 광산 별 근로자 수가

적계는 1만 명에서 많게는 3만 7천명에 달할 정도로 대규모의 광산 근로자가 동원되고 있다. 광종 별 근로자 수는 그림 2.2와 같이 석탄광이 570,900여 명, 금속광이 약 379,250여 명, 비금속광이 약 143,550여 명에 달하고 있다.



그림 2.1. 남북한 가행광산 수 및 광산 근로자 수 비교 (삼성증권, 2019)

표 2.1. 북한의 광산 분류현황 및 광산 분류에 따른 근로자 수 (방경진, 2018)

분류	근로자수(명)	주요 광산
연합1급	37,000	무산
연합2급	23,000	검덕
연합3급	10,000	상농
종합기업소	10,000	단천, 대흥
특급	8,000 - 10,000	룡양, 혜산
1급	5,000 - 8,000	운산, 수안, 홀동, 은률, 허천
2급	1,000 - 5,000	재령, 고산, 동창
3급	300 - 1,000	금마위, 락산, 대락, 등광
4급	100 - 300	정촌
5급	50 - 100	
6급	10 - 50	

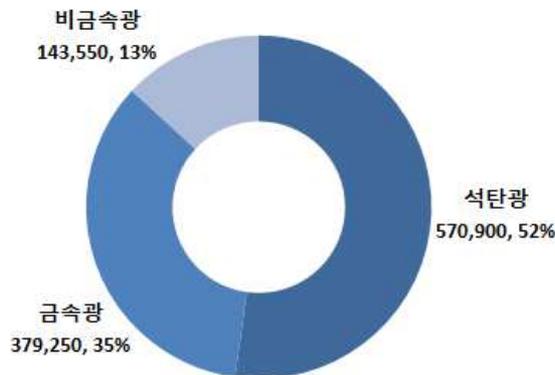


그림 2.2. 광종 별 가행광산 근로자 수 (방경진, 2018)

북한과 남한의 가행광산 수가 약 700여 개와 364개, 광업 경제규모가 약 4조 2,660억 원과 2조 2,620억 원으로 약 2배의 차이를 보이고 있음을 감안할 때, 산술적으로 북한의 단일 광산 당 근로자 수는 남한의 약 75배에 달하는 것으로 간주할 수 있다. 이는 북한의 광물자원 개발 방식이 채광 장비를 활용한 기계식 채광법이 아닌, 대규모의 인력을 활용하는 재래식 채광법에 의존하고 있음을 시사한다. 일례로 2015년 2월 발간된 북한의 ‘기술혁신’에 수록된 광업 혁신기술은 탄차를 활용한 효율적인 광석 운반기법을 제시하고 있으며(리진철, 2015), 이는 2015년 기준으로 인력중심의 재래식 채광법인 광차수송방식이 북한 광산에서 일반적으로 활용되고 있음을 의미한다.

북한은 대규모의 광산 근로자를 조달하기 위한 방식으로, 제대군인 및 고등중학교 졸업생을 투입하는 집단배치 방식을 활용하고 있으며(방경진, 2018), 이는 북한 광산 근로자의 대다수가 적절한 광업기술 교육을 제공받지 못했음을 시사한다. 또한 북한 광산 근로자의 과반수가 종사하고 있는 석탄광의 경우, 금속 및 비금속광에 비해 열악한 현장조건으로 인해 안전사고 및 광해사고의 발생 가능성이 높다. 따라서 북한 광물자원 개발사업의 진행 과정에서 북한 광산 환경의 현대화 및 광산 근로인력 대상 기술교육, 갱내안전 및 광해방지 방안이 필수적으로 구축되어야 한다.

2.2 연도별 북한 광업연구 변동 경향 분석

본 연구소에서 수행하였던 최근 10년간 북한 광업 학술지 수록논문 문헌조사 결과를 활용하여, 북한 광업 학술지 ‘채굴공학’에 수록된 광업 학술논문의 연도별 연구주제 변동 경향을 분석하여 북한 광업의 기술적 역량을 분석하였다. 각 연구주제에 따른 연도별 학술논문 수는 표 2.2에 제시하였으며, 그림 2.3에 이를 그래프로 도시하였다(강일석, 2020).

분석 결과, 김정일-김정은 정권 초기인 2008-2013년 기간 동안은 재래식 채광기법의 개선 연구가 주를 이루는 채광·발파·장비 분야의 학술논문의 게재 빈도가 높게 나타났다. 반면 2013년 이후 기간에서는 광물자원의 탐사 및 개발, 광산 안전과 관련이 깊은 지보·암반·탐사 분야 학술논문의 게재 빈도가 증가하였다. 이는 김정은 정권이 추구하는 산업의 자동화·첨단화 경향을 반영하는 것으로 판단되며(이춘근, 2015), 북한 당국 및 에너지·자원공학계 역시 광산의 현대화의 필요성 및 안전, 광해 문제의 심각성을 인지하고 있는 것으로 분석된다.

표 2.2. 2008-2017 연도별 ‘채굴공학’ 수록 학술논문 연구주제 (강일석, 2020)

주제	수록연도									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
채광	7	5	5	5	6	6	6	8	6	7
발파	7	11	6	4	3	10	1	3	2	4
장비	6	10	5	7	5	6	4	1	1	2
지보	4	1	3	3	4	4	3	1	5	7
선광	2	1	0	0	0	0	1	0	1	0
암반	6	7	11	6	5	5	4	7	5	6
탐사	5	5	1	2	1	1	3	4	1	2
기타	9	4	6	4	4	2	3	1	3	2
계	46	44	37	31	28	34	25	25	24	30

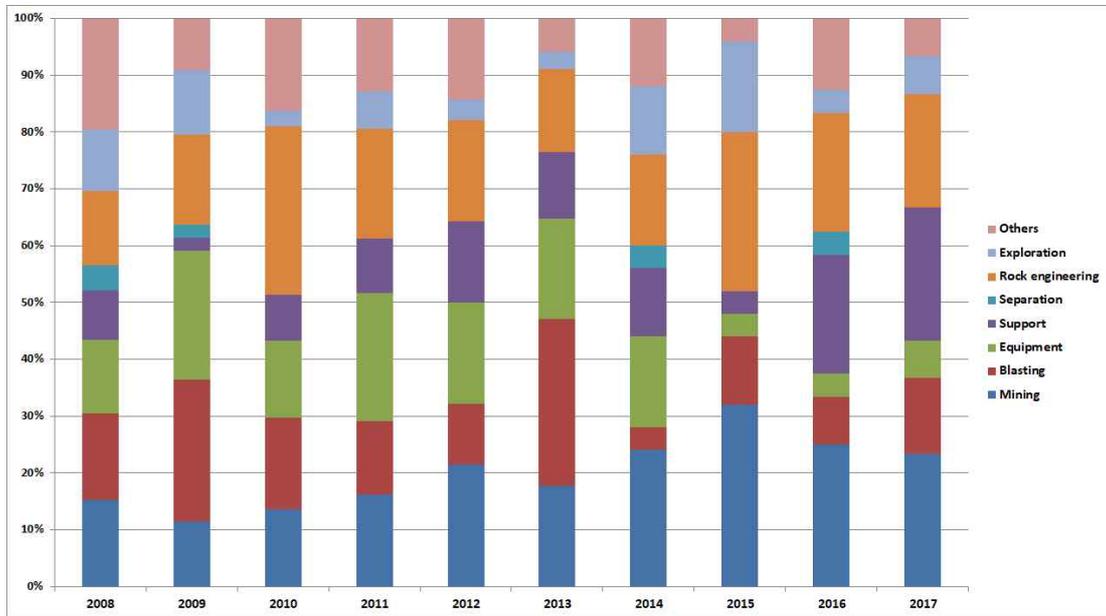


그림 2.3. 남북한 가행광산 수 및 광산 근로자 수 비교 (강일석, 2020)

2.3 북한 광업 분야 역량 분석

2.1 및 2.2장에서 제시된 것과 같이, 북한 광업은 인프라 및 기술력 부족으로 인해 인력 중심적인 재래식 채광법을 활용하고 있으며, 이에 따른 광산안전 및 광해 문제 역시 심각한 상황으로 예측된다. 북한 역시 자국 광업의 문제점을 인식하여, 광산 현장의 현대화를 통한 해결책을 강구하고 있는 것으로 분석된다. 하지만 이와 같은 북한의 광업 인식 변화에도 불구하고, 실제 북한 광산 현장을 경험한 탈북민 등의 증언에 따르면, 광산 현장에서의 안전 확보 및 광해 방지 조치는 수행되지 않고 있는 상황이다. 할당된 생산목표의 달성을 최우선으로 하는 북한 광산의 운영 특성 상, 안전 및 광해 문제는 생산목표 달성의 후순위로 밀리는 경우가 대다수이며, 안전 및 광해 문제를 전담하는 관리기관이 존재하지 않아 관련 규정의 인식 및

준수 강제성이 없는 실정이다(조정구, 2017). 따라서 북한 광물자원 개발사업 수행 시, 열악한 북한 광산 현장조건을 가정한 광산인력교육 및 광산안전, 광해방지 문제가 반드시 고려되어야 한다.

3. 북한 광업체계 및 광업법 분석

3.1 북한 광업 행정체계 분석

북한은 광업을 국가운영을 위한 주요 산업분야로 취급하고 있으며, 그림 3.1과 같이 광종별로 내각기관 - 국가자원성(석탄·일반광물), 금속공업성(철·마그네사이트), 채취공업성(일반금속·비금속), 석탄공업성(무연탄·갈탄) - 을 설치하는 등 세분화된 행정체계를 갖추어 광물자원의 개발 절차를 주관하고 있다(최종문, 2018).

북한의 광물자원 개발기술 관련 연구 및 교육과정은 ‘국가과학원-채취공업성-연구소 및 교육기관’의 구조로 광업기술 연구목표 수립-하달-수행 과정을 통해 이루어지고 있다. 또한 광산인력 양성기관은 일반 주간대학과 광산지역 통신대학, 공장대학, 각 기업소별 기능공학교 등으로 분류되어 광산인력 양성을 수행하고 있다(방경진, 2018).

이와 같이 북한의 광업 행정체계는 광종별 주관기관을 할당하고 광산인력 양성체계를 수립하는 등 비교적 체계적으로 구성된 편이나, 실제로는 일부 조건이 좋은 대형 광산을 제외하면 성과위주의 광산 운영과 열악한 현장 조건으로 인해 연구 및 교육성과가 거의 반영되지 못하고 있는 실정이다.



그림 3.1. 북한의 광물자원 관련 내각기관 행정체계도 (최종문, 2018)

3.2 북한 광물자원 매장량 평가기법 분석

광물자원의 매장량은 해당 사업의 경제성을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 남한을 비롯한 국제기준에 따른 광물자원 매장량 산출기준은 대상 광체의 지질학적 매장조건과 기술, 경제적 평가결과에 따라 규정되고 있으며, 남한의 분류 기준은 표 3.1에 제시된 것과 같이 ‘광업법 제15조’와 ‘한국공업규격(KSE)’에 따른 광량계산 기준에 따라 매장광량·가채광량, 확정광량·추정광량 등으로 분류된다(최용근, 2019).

반면 북한의 경우 원칙적으로 구 소련(동구권)식 광물자원 매장량 산출기준을 적용하여, 평가 신뢰도에 따라 표 3.1과 같이 확보매장량(A - C₁) 및 전망매장량(C₂ - P₂), 또는 탐사광량(A,B,C₁), 추정광량(C₂), 미확정광량(C₃, P₁, P₂)으로 분류하고 있다(방경진, 2018). 하지만 북한은 자국 ‘지하자원법 제3조’에 근거한 고갈주의 원칙을 적용하여, 경제적 이익이 아닌 계획경제에 따른 부존광량의 고갈을 최우선 목표로 매장량을 설정하고 있다. 이 때 북한에서 통용되는 광물자원 매장량은 A - C₂ 매장량에 이르는 보다 넓은 범위에 적용되어, 남한 및 국제기준에 따른 매장량 산정결과에 비해 큰 값으로 계산될 수 있다. 따라서 북한 광물자원 개발 사업의 정확한 경제성 평가를 위해서는, 이와 같은 매장량 산출기준의 차이점이 필수적으로 고려되어야 한다.

표 3.1. 남북한의 광물자원 매장량 분류 기준 (최종문, 2018)

구분	매장량	광량산출 기준	기타	
남한	확정매장량	광체 2~4면 확인, 각 면의 시료도 완성, 가채율 90%		
	추정매장량	광체 1면 이상(규칙광상), 2면 이상(불규칙광상) 확인, 가채율 70%		
	예상매장량	광체 1면 이상(규칙광상), 2면 이상(불규칙광상)확인, 가채율 36%		
북한	확보매장량	A	수평50m,상하50m 격자 탐광굴진 확인 갱내: 중단갱도 개설 노천: C1에서 표토, 폐석 제거 광량	개발
		B	수평100m,상하50m 격자 탐광굴진 확인 통상시추와 별개로 탐광 실시	
	C ₁	수평100m,상하100m 격자 시추를 통해 광량 확인	미개발	
	전망매장량	C ₂	C1 주변부 및 노두 등 50m 간격 확인 200m 격자 시추를 통해 개략적 파악	미탐사
		C ₃	노두조사로 확인, 심도는 지표확인연장의 1/2 인정	예상
		P ₁	광맥 폭과 연장이 간헐적으로 파악	전망
		P ₂	광역지질조사로 광맥 폭과 연장이 파악	전망

3.3 남북한 광업법 및 광업규정 비교 분석

북한은 1993년 ‘지하자원법’을 제정하여 자국 광물자원의 탐사 및 개발과정을 관리하고 있다. 남한의 광물자원 관련 법규인 ‘광업법’과 비교할 때, 지하자원법은 북한의 사회주의 경제체제에 기초하여 지하자원의 소유권을 국가로 한정하고 있다는 것이 근본적인 차이점이다(북한자원연구소, 2013). 그 영향으로 북한의 지하자원법은 광물자원 개발사업의 운영 주체가 가지는 각종 권리 및 한계에 대한 구체적인(정량적인) 명시가 존재하지 않는다는 문제점을 가지고 있으며, 따라서 사업 진행 과정에서 해당 조항에 대한 명시적 합의가 반드시 이루어져야 한다.

표 3.2. 남북한 광업법 및 광업규정 조항별 비교 (북한자원연구소, 2013)(계속)

분류		관련 조항
광물자원 소유권	북한 지하자원법	제2조 조선민주주의인민공화국에서 지하자원은 국가만이 소유한다. 제3조 지하자원 탐사는 나라의 재부를 들이기 위한 중요한 사업 이다. 국가는 지하자원 탐사의 주체화, 현대화, 과학화를 실현하여 지하자원을 더 많이 더 빨리 찾아내도록 한다.
	남한 광업법	제2조 (국가의 권능) 국가는 채굴되지 아니한 광물에 대하여 채굴하고 취득할 권리를 부여할 권능 을 갖는다.
광물자원 탐사권 및 채굴권	북한 지하자원법	
	남한 광업법	제9조2 (광업권의 종류) 광업권의 종류는 다음 각 호와 같다. 1. 탐사권 2. 채굴권 제12조 (광업권의 존속기간) 1. 탐사권의 존속기간은 7년 을 넘을 수 없다. 2. 채굴권의 존속기간은 20년 을 넘을 수 없다. 3. 채굴권자는 채굴권의 존속기간이 끝나기 전에 대통령령으로 정하는 바에 따라 산업통상자원부 장관의 허가를 받아 채굴권의 존속기간을 연장할 수 있다. 이 경우 연장할 때마다 그 연장기간은 20년 을 넘을 수 없다.

표 3.2. 남북한 광업법 및 광업규정 조항별 비교 (북한자원연구소, 2013)

분류		관련 조항
광물자원 매장량 산출기준	북한 지하자원법	<p>제15조 지하자원 매장량 계산기준은 국가 지하자원 개발 심의기관이 정한다.</p> <p>제16조 계산된 지하자원 매장량의 심의는 해당 중앙기관과 국가 지하자원 개발심의기관이 한다.</p> <p>제25조 지하자원 개발 기관, 기업소, 단체는 채굴조직을 합리적으로 하여 채굴기준과 지하자원 매장량 계산기준이 되는 광체를 다 캐야 한다. 채굴조건이 좋거나 품위가 높고 두꺼운 광체만을 골라 캐는 행위를 할 수 없다.</p>
	남한 광업법	
광산안전 및 광해방지	북한 지하자원법	<p>제28조 지하자원 개발 기관, 기업소, 단체는 지하자원개발에서 기술규정과 노동안전 규정을 철저히 지켜 사고와 자연피해를 막아야 한다.</p> <p>제31조 지하자원을 개발하는 기관, 기업소, 단체와 국민은 지하자원 개발 과정에 국토와 자원, 자연풍치를 비롯한 주민들의 생활환경과 동식물의 생태환경을 파괴하는 행위를 하지 말아야 한다.</p>
	남한 광업법	<p>광산보안법제5조 (광업권자 또는 조광권자의 의무)</p> <p>1. 광업권자나 조광권자는 다음 각 호의 목적을 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 낙반, 붕괴, 용수, ... ◆ 가스, 먼지, 소음, ... ◆ 기계, 기구, 화약류, ... ◆ 광업시설의 보전 ◆ 구호조직의 설치, ... ◆ 지하자원의 보호 ◆ 광해의 방지와 그 밖의 보안, ...

표 3.2에 북한 지하자원법과 남한 광업법의 주요 조항에 대한 비교자료를 제시하였다. 먼저 북한 지하자원법 2조는 지하자원법과 광업법의 근본적인 차이를 보여주는 조항으로, 자국 영토 내에 존재하는 지하자원의 소유권의 보유 주체를 북한 당국으로 한정하고 있다. 따라서 광업법 2조에 의해 국가로부터 미채굴 광물의 채굴권 및 취득권을 부여받아 광물자원의 소유권을 주장할 수 있는 남한과는 달리, 북한 지하자원법에 따르면 모든 광물자원은 북한 당국의 재부로 간주된다.

또한 남한의 광업법은 제9조 2항과 제12조를 통해 광업권의 행사 범위를 탐사권과 채굴권으로 규정하고 있으며, 그 존속기간을 각각 7년, 20년으로 구체적으로 명시하고 있다. 반면 북한 지하자원법에는 이와 같은 광업권의 행사 범위 및 기간과 관련된 조항이 존재하지 않아, 광물자원 개발사업 수행 시 광업권의 획득 여부 및 행사 범위에 대한 구체적인 합의가 필수적으로 요구된다.

다음으로 북한의 지하자원법은 제15조와 제16조, 제25조를 통해서 매장량 산출과 그 심의 권한을 국가 심의기관에 일임하고 있으며, 기술·경제적 조건에 따른 선별적 채광을 금지하고 있다. 이와 같이 국가 심의기관에 의해 채광 대상이 강제될 경우, 해당 광물자원 개발사업의 수익성이 저하되거나, 기존 계획에 비해 광물자원 품위 및 채굴조건이 악화되어 경제성을 상실할 수 있다.

마지막으로, 광산보안법 제5조를 통해 명시적인 광산 내 노동안전 및 환경보호 기준을 제시하고 있는 남한 광업법과는 달리, 북한 지하자원법의 경우 사고방지 및 환경보호를 위한 구체적인 실행조건 등이 미흡한 상황이다.

3.4 북한 광산기술인력 양성의 필요성 및 방안

앞선 2장 및 3장의 분석 결과와 같이, 북한의 광업 기술 수준은 북한이 보유한 광업규모 대비 매우 뒤떨어지는 것으로 분석되었으며, 광산 현장 역시 비효율적인 인력 집약적 채광법이 활용되고 있음을 확인하였다. 따라서 남북한 협력 광물자원 개발사업의 경제성 확보를 위해서는, 선진 광업 기술의 도입을 통한 광산 인프라 및 채광법의 현대화, 광산 근로자 대상의 기술교육이 필수적으로 수행되어야 한다.

또한 북한 특유의 폐쇄성과 사회주의 계획경제에 입각한 광업법 및 매장량 산출 기준, 그리고 산업 경제규모 및 대외 수출액의 큰 부분을 차지하여 북한 정권과의 밀접한 연관성이 존재하는 북한 광업의 특성 상, 북한 광물자원 개발사업의 추진에 앞서 남한 측 참여인력을 대상으로 한 북한 광업법 및 관련 규정 교육 역시 그 필요성이 크다고 할 수 있다.

이와 같이 남·북한 양측에 요구되는 광산기술인력 양성의 필요성을 동시에 만족시키기 위해서는, 우선 남북한의 원활한 교류를 위한 광업 기술체계, 법규 및 조항, 전문용어 등의 표준화가 진행되어야 한다. 또한 남·북한 유관기관 간의 공동학회 및 세미나 등을 통한 지속적인 인적 교류를 수행함으로써, 북한 광산기술인력 양성 프로그램의 구축을 위한 남·북한 양측의 컨센서스를 확보하는 것이 필수적이다. 나아가서는 북한 광산현장 내 테스트베드를 활용한 R&D 실증사업 추진 및 지속 가능한 협력 사업을 구축하여, 그 과정에서 화상회의 플랫폼 구축 및 북한 현지 교육원 설립 등 지속가능한 인적·물적 학술 교류 시스템을 정립할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 북한 희토류 광산 에너지 공급을 위한 태양광 발전 적합 부지 GIS 분석

4.1 분석 대상 광산

전 세계적으로 IoT, 빅데이터, 로봇, AI 등의 4차 산업이 발달하면서 첨단 소재에 사용되는 광물자원의 수요가 지속해서 증가하고 있다. 남한은 뛰어난 첨단 기술을 갖추고 있지만, 대부분의 광물자원을 수입에 의존하고 있어 안정된 자원 확보가 중요한 실정이다. 반면에 북한은 철, 연·아연, 몰리브덴, 텅스텐, 니켈, 흑연, 금, 석탄, 구리, 희토류 등 다양한 광물자원이 풍부하게 매장되어 있다. 하지만 북한의 폐쇄성으로 인한 국제적 협력의 어려움과 교통인프라, 전력공급시설, 생산시설 등의 노후화로 광산업의 발달이 지연되고 있으며 광산물 생산량은 매우 저조하다. 따라서 지리적으로 인접한 북한과의 자원개발 협력을 통해 남한은 안정적인 광물자원을 확보함과 동시에 북한의 광산업 발달과 경제성장을 이끌어 남북한 모두 상호 이익을 도모할 수 있다. 북한의 다양한 광물자원 중 세계 2위 수준의 매장량을 가진 것으로 추정되는 희토류는 화학적으로 매우 안정되고 열을 잘 전도하는 특징을 가지고 있어 배터리, 광학유리 및 섬유, 전자 제품 등에 사용되며 첨단산업 소재의 핵심 원료이다. 하지만 희토류는 채굴, 선광 등의 공정에서 산성 폐수 등 다양한 환경문제를 발생시켜 광해방지 사업, 친환경적 공법 등이 함께 이루어져야 하므로 남북한의 협력이 절실히 요구되는 광종이다. 북한 최대의 희토류 광산은 그림 4.1에 보이는 평안북도 정주시에 위치한 룡포광산으로 한국지질자원연구원(KIGAM)에 의하면 금속 기준 1,690만 톤이 매장되어 있다고 추정한다. 따라서 본 연구에서는 룡포 희토류 광산 개발에 필요한 전력을 공급하기 위해 태양광 발전 시스템 적지 분석을 시행하였다. 해당 지역 역시 송전선망, 전력시설 등의 인프라가 열악해 계통연계가 어려워 대규모 전력 시스템의 구축보다 소규모의 독립형 분산 전력 시스템이 경제적, 환경적으로 효율적이다.

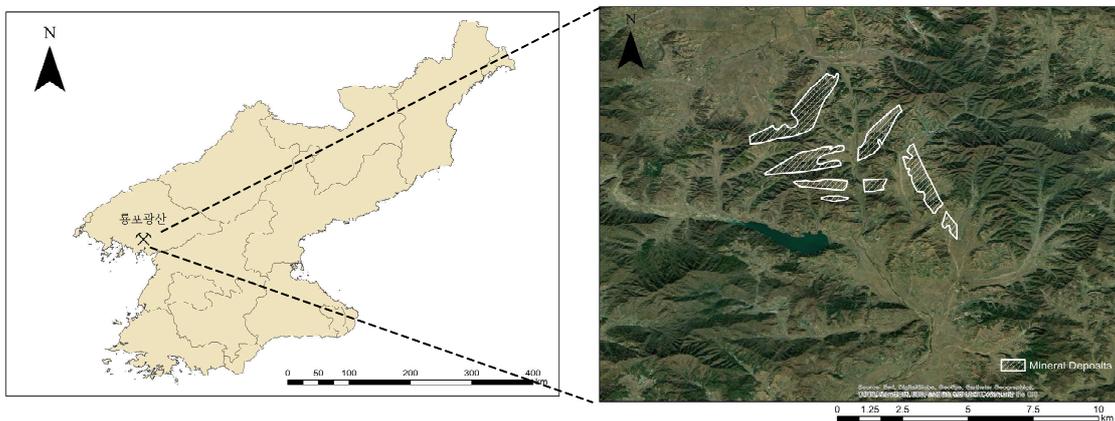


그림 4.1 룡포 광산 위치

서해안 인근에 위치한 룡포광산은 지리적으로 남북교류 협력에 유리하고 평야가

발달하여 상대적으로 그림자에 의한 영향이 적어 효율적인 태양광 발전이 가능할 것으로 평가된다. 반면에 해당 지역은 해발고도가 600m 이하로 낮은 편이므로 홍수 및 침수 재해에 취약할 수 있다. 북한은 배수 및 홍수 방지 시설 등의 인프라가 열악하므로 홍수로 인한 피해가 더 클 것으로 예상된다. 더욱이 한반도 기상 특성상 여름철 태풍과 집중호우는 토석류(debris flow)를 발생시켜 2차 피해를 초래하기도 한다. 따라서 룡포광산 일대에 대해 산사태 및 침수 취약성을 분석한 후 취약성이 높다고 평가된 지역을 배제한 후 태양광 발전소 적정 부지를 선정하였다.

4.2 자연재해 취약성 분석

GIS 기반으로 자연재해 위험성을 평가할 때는 취약성(susceptibility) 분석, 위험성(hazard) 분석, 피해(risk) 분석 단계로 구분할 수 있다. 취약성 분석은 연구 지역에 대해 자연재해를 일으키는 유발 요인을 분석하여 해당 지역이 공간적으로 얼마나 자연재해에 취약한지를 평가한다. 위험성 분석 단계에서는 취약성 분석 결과에 대해 자연재해가 얼마나 잘 일어날 수 있는지 시간적 개념을 추가로 고려한다(Choi, 2020). 마지막 피해 분석 단계에서는 위험성 분석 결과와 더불어 인명 및 재산피해를 비용으로 산정하여 피해 규모에 대한 분석까지 포함한다. 이러한 분석이 이루어지기 위해서는 연구 지역에 대한 인구, 건축물, 토지 이용도 등 정밀한 데이터가 필요하다. 하지만 북한은 해당 데이터의 취득이 어려우므로 공개된 지형정보만을 활용하여 자연재해 취약성 분석을 진행하였다.

자연재해 취약성 분석은 산사태와 침수 취약성 분석으로 구성하여 진행하였다. 산사태는 지질, 지형, 기상, 토양, 토지 이용 등 복합적인 요인에 의해 발생한다. 이러한 요인들과 과거 산사태 발생 이력 자료의 연관성을 분석하여 산사태에 취약한 공간적 특성을 파악하고 해당 지역에 대한 종합적인 산사태 취약성을 평가할 수 있다. 빈도비 분석, 로지스틱회귀 분석, Weight of Evidence (WoE) 등 통계적 분석 방법이 가장 일반적으로 적용되며, 서포트 벡터 머신 (support vector machine, SVM), 결정트리(decision tree, DT)와 같은 전통적인 머신러닝 기법도 사용되고 있다(Xia et al., 2020). 이와 같은 분석 기법들을 적용하기 위해서는 과거 산사태가 발생했던 위치 정보 혹은 산사태 인벤토리맵 정보가 필요하다. 하지만 북한에서 발생한 산사태 이력 정보의 수집과 현장 답사의 현실적 어려움, Google Earth 및 위성영상자료를 활용한 산사태 발생 정보 파악의 불확실성 등으로 정보 취득의 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 4.2와 같이 산사태 위험성 분석에서 사용되는 주요 인자를 활용해 해당 지역의 상대적 위험성을 평가하였다.

그림 4.3은 주요 영향인자를 나타내는 그림이다. Digital Elevation Model(DEM, 수치표고모델)은 지형의 고도값이 수치로 저장된 래스터 파일로 대상 지역의 고도 정보를 파악할 수 있다. 무료로 공개된 공간해상도 30m인 ASTER GDEM을 사용하였으며, DEM으로부터 ArcGIS 10.7 지형분석 툴을 활용해 경사도, 경사방향, 곡률을 추

출하였다.

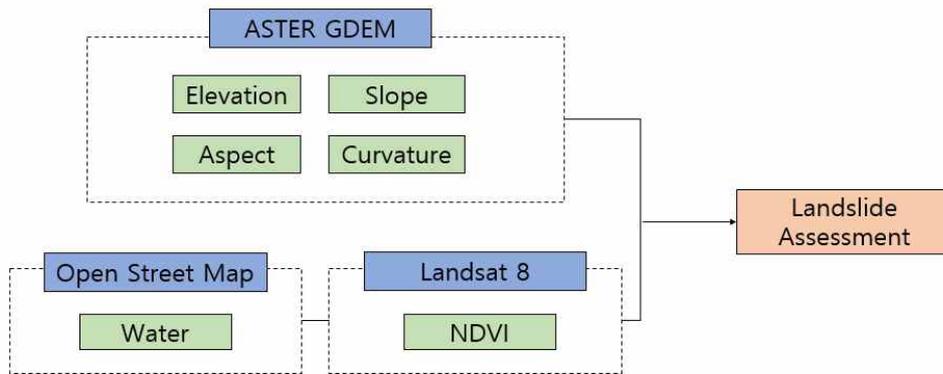


그림 4.2 산사태 취약성 분석 방법

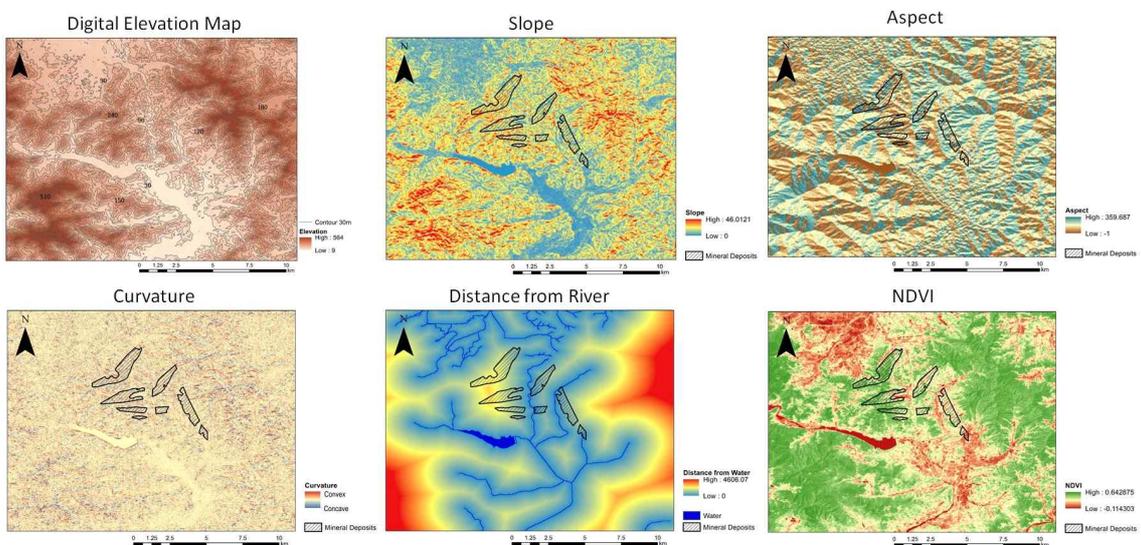


그림 4.3 산사태 주요 영향 인자

산사태 발생확률은 경사가 급할수록 높아지지만, 토양의 발달이 어려울 정도로 경사가 급한 곳에서는 오히려 산사태가 발생할 확률이 낮아진다 (Oh, 2010). 경사방향 이 산사태에 영향을 미치는 이유는 북반구에서는 남향(180°)에 가까울수록 일조량이 많아 풍화 작용에 의해 토양층이 잘 발달하여 산사태 발생 위험성이 높아지기 때문이다. 곡률의 경우, 위로 볼록한 지형일 때에는 중력을 받쳐주는 힘이 없으므로 산사태 발생 가능성이 커진다. 2020년 7월 8일 촬영된 Landsat 8 위성영상으로부터 계산된 NDVI (normalized difference vegetation index, 정규식생지수)이다. NDVI는 -1.0에서 +1.0의 값을 가지는데, 1에 가까울수록 건강한 식생이 분포한다는 의미로 해석할 수 있다. 수종, 임령 등에 따라 식물이 가지는 뿌리의 인장력이 다르지만,

일반적으로 식생의 활력이 높을수록 뿌리의 인장력에 의해 산사태 발생을 억제할 수있다 (Suh, et al., 2010). 마지막으로 Open Street Map(OSM)으로부터 수계자료를 취득하여 수계로부터의 거리를 구하였다. 수계로부터 가까울수록 흐름에 의한 침식 작용이 활발해지고, 토양의 수분 함량이 높아져 산사태에 취약하다. DEM, 경사도, 수계로부터의 거리, NDVI는 등비율(quantile) 방법으로 5개의 클래스로, 곡률은 3개의 클래스로 재분류하였다. 경사가 없음을 의미하는 -1과 0~360의 값을 가지는 경사방향은 9가지의 방위로 구분하여 비슷한 위험도를 가지는 방향끼리 결합해 5개의 클래스로 재분류하였다. 최종적으로 6가지의 영향 인자들을 중첩 연산하여 그림 4.4 과 같이 산사태 취약성 지도를 작성하였다.

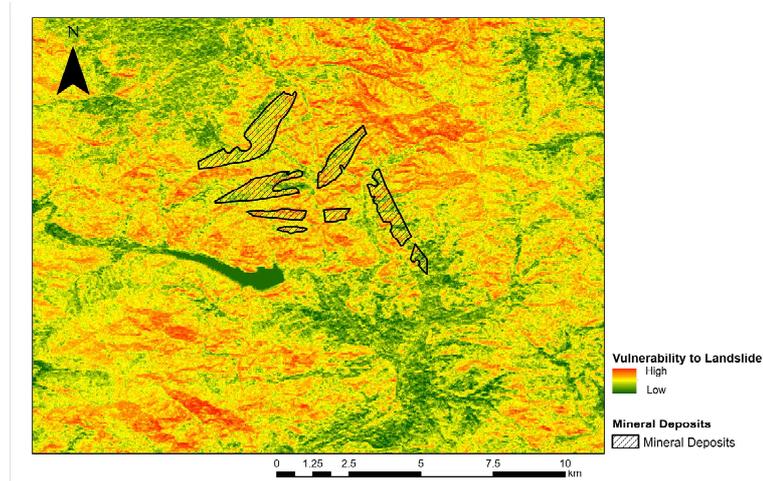


그림 4.4 광산 인근 지역의 산사태 취약성 지도

다음으로 침수 취약성 분석을 진행하였다. 침수 취약성 분석 방법은 그림 4.5와 같다. DEM으로부터 흐름 방향(flow direction)을 계산하며 이 결과로 강우누적흐름량(flow accumulation)을 산출할 수 있다. 흐름 방향은 경사 및 경사방향 등과 같은 지표의 특성을 고려해 격자셀 마다 물이 흐르는 방향을 예측하며, 이를 기반으로 각 셀에서 물이 모이는 양을 계산한다. 강우누적흐름량이 높을수록 강우가 내릴 때 상대적으로 침수에 취약한 것으로 추정한다.

본 연구에서는 누적흐름량이 1000 이상인 셀로부터 100m 이내의 지역을 침수 취약 지역으로 산정하였다. Open Street Map의 수계자료로 강우 시 수위가 5m 이상 상승했을 때를 고려하여 최종적인 침수 가능 지역을 산출하였다. 남한에서 한강 수계의 경우, 홍수주의보는 수위가 6~8m 높아질 때, 경보 수위는 8~ 10.5m가 높아질 때 발령된다(한강홍수통제소). 룡포광산 일대는 제방 시설이 없고 고도가 낮으므로 수계에서 5m 수위 상승을 했을 때를 위험 수위로 정하였다.

침수 위험지역의 토지 이용 현황을 파악하기 위해 광산 인근 지역에 대해 Landsat 8 OLI 다중분광영상 자료를 활용하여 토지 피복 분류를 수행하였다. 그림 4.6은 각각 토지 피복 분류 결과와 침수 취약 지역을 나타낸 그림이다. 해당 결과를 통해 농업지역의 약 86%가 침수 위험지역에 포함되어 있으며, 주거지 및 산업 지역은 약

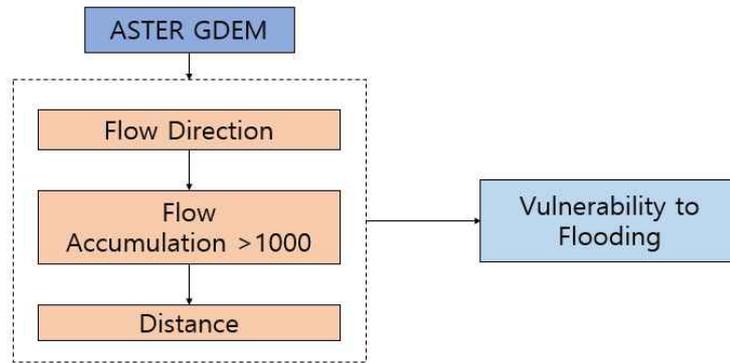


그림 4.5 침수 취약성 분석 방법

30% 정도가 침수피해가 있을 것으로 분석된다. 광산 지역에서 침수가 발생하게 되면 광산 시설에 직접적인 영향을 끼칠 뿐만 아니라, 교통인프라의 접근이 어려워 작업 및 운송에 차질이 생겨 막대한 경제적 손실이 발생할 수 있다. 실제로 북한 조산중앙TV는 2020년 태풍 마이삭으로 인해 함경도 지역의 감덕광업연합기업소, 대흥광산, 룡양광산 등의 주요 광산 일대에 도로 유실 및 철도 파괴 등의 피해가 크다고 전했다(한국일보, 2020), 농업지역의 침수피해로 인한 경제적 피해가 클 것으로 예상된다고 밝혔다(연합뉴스, 2020). 더욱이 주민들이 거주하는 도심지의 경우 인명피해를 초래할 수 있으므로 도시개발을 위해서는 침수 위험지역을 분석하여 해당 지역을 배제한 후 인프라, 주거시설, 산업시설 등의 입지를 고려할 필요가 있다.

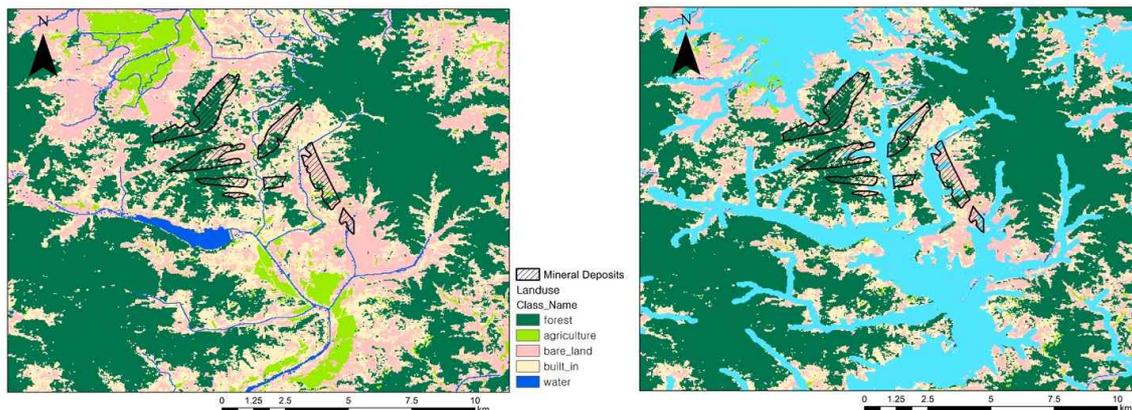


그림 4.6 룡포광산 지역의 토지 피복 분류 결과 (좌), 침수 취약 지역 (우)

4.4 태양광 발전소 적정 부지 평가

그림 4.7과 같이 북한의 주요 에너지 공급원은 석탄, 석유, 수력 등으로 구성되어

있으며, 1990년대 경기침체 이후로 2016년까지 감소하다 2017년에 약간 증가하여 현재에는 변화 없이 유지되고 있는 수준이다. 특히 1990년에 비해 최근 석탄 공급의 비중이 감소한 추이를 볼 수 있다. 북한은 자체적으로 석탄을 공급할 수 있는 충분한 매장량을 보유하고 있지만, 광산 장비·설비의 노후화, 홍수 피해 복구 미진 등으로 생산의 어려움을 겪고 있다(KDB산업은행, 2020). 이는 북한의 에너지 생산 능력을 악화시키고, 북한의 산업 발전 및 경제성장을 저해하는 악순환이 반복되도록 한다. 북한의 에너지 공급원 중 15~30%를 차지하는 수력은 기상 의존도가 높은 에너지원으로 안정적인 에너지 공급이 어렵다. 홍수나 가뭄 등의 자연재해 발생과 더불어 겨울철 잦은 동파로 인해 발전 시설을 운영할 수 없다. 종합적으로 북한은 에너지 공급 시설의 확충과 현대화는 물론, 기존 시설의 유지·보수가 이루어지지 않아 에너지 공급에 차질을 빚고 있다. 따라서 광산 개발 및 운영을 위해서는 에너지 공급 시설에 대한 투자가 함께 이루어져야 한다.

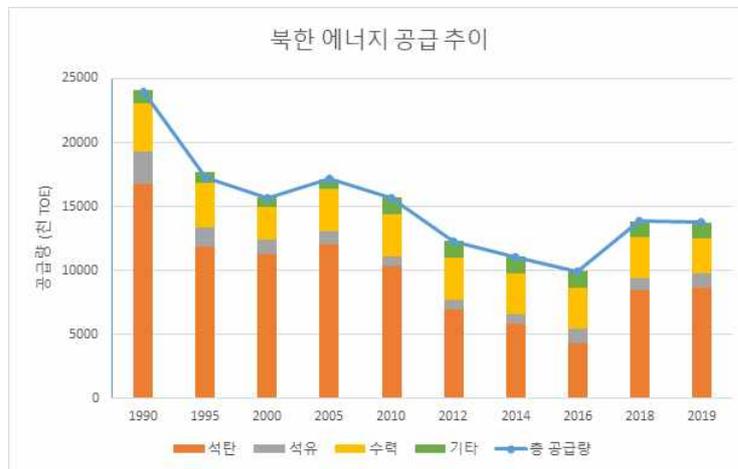


그림 4.7 북한의 에너지 공급 추이 (통계청, 2020)

일반적으로 석탄 화력발전소는 증기터빈, 가열장치, 냉각장치 등 다양한 시스템으로 다소 복잡하게 구성되어 있어 대규모 건설이 필요하며, 중앙 발전 방식으로 운영되어 송배전 인프라도 건설도 함께 이뤄져야 한다. 그러므로 대규모 투자가 어려운 북한과 같은 개발도상국에서는 신재생에너지 시스템을 이용한 소규모의 분산형 발전 방식이 더 효율적이다. 시설 규모가 작고 수요지 인근에 설치되므로 송배전 인프라 건설 및 운영 비용을 절감할 수 있다. 북한은 2013년부터 재생에너지의 적극적으로 활용한 국가적인 에너지 수요 충족의 필요성을 주장하고 있으며, 이에 따라 풍력 및 태양광 등 재생에너지의 연구개발 및 설치 사업이 증가하고 있다(KDB산업은행, 2020). 본 연구에서는 룡포광산 개발 및 운영을 위한 에너지를 공급원으로 태양광 발전의 적합성을 평가하였다. 태양광 적합 부지를 선정하기 위해 그림 4.8처럼 태양광 발전에 유리한 지형 조건과 자연재해 취약성, 일사량, 토지피복을 고려하였다. 안정적인 태양광 패널의 설치가 가능하도록 경사가 10도 이내인 지역

과 동시에 최대의 태양광 발전 효율을 위해 경사방향이 남향인 지역을 추출하였다.

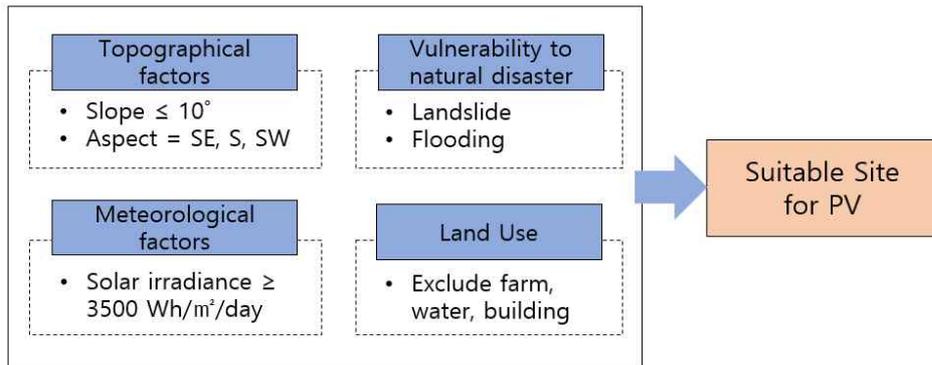


그림 4.8 태양광 발전소 적지 선정을 위한 요소

해당 지역의 일사량 잠재량을 평가하기 위해 인공신경망 기법을 통해 구축된 북한의 일간 일사량 지도를 활용하였다. 그림 4.9는 룡포광산 일대의 일사량 지도이다. 해당 지역의 일간 일사량은 최소 4,381Wh/m²이며, 평균 6,600Wh/m²으로 태양광 발전을 하기에 적절한 일사량을 가지는 것으로 평가된다. 앞서 분석한 산사태와 침수에 취약한 지역을 배제하였으며, 농업지역과 도심지역, 수계, 주거지와와의 이격거리를 고려하여 그림 4.10과 같이 최종적인 태양광 발전소 적정 부지를 선정하였다.

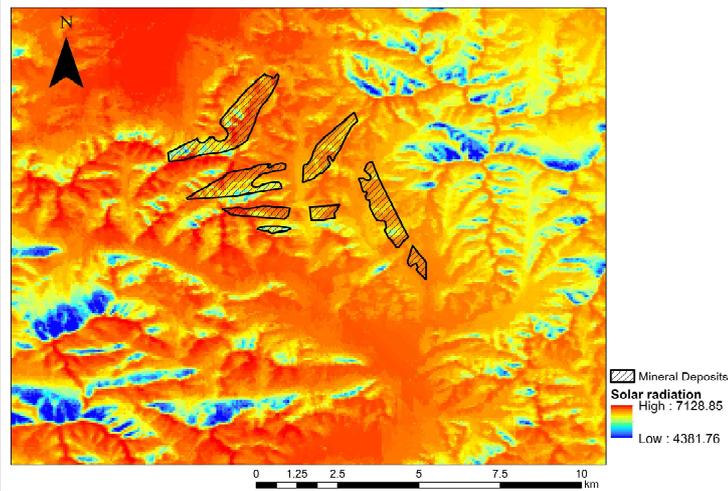


그림 4.9 룡포광산 일대 일사량 지도

다음으로 선정된 부지에 대해 SAM(System Advisor Model) 소프트웨어를 활용하여 태양광 발전 잠재량 평가를 진행하였다. 기상 자료로 룡포광산과 인접한 평양의 TMY(Typical Meteorological Year)를 사용하였다. 태양광 발전 잠재량을 추정하기 위해 패널 규격은 한화큐셀의 Q PEAK DUO L-G6.4 모델을 사용하였으며, 이 패널은 2.14m²의 면적당 정격출력 415Wdc의 사양을 가진다. 패널을 설치할 때 패널 간의

이격거리에 따라서 태양광 발전의 효율이 달라질 수 있다. 이격거리는 패널 길이, 위도, 시간각, 적위 등에 따라 산정된다. 계절적 요인을 예를 들면, 북반구의 경우 태양의 고도각이 커지는 하지에는 이격거리가 가까워도 패널 간의 그림자 영향이 적다. 하지만 태양의 고도각이 작아지는 동지에는 패널 간의 그림자의 영향이 커져 효율성이 떨어질 수 있다. SAM 소프트웨어에서 패널 간의 이격거리를 고려하기 위해 Ground Coverage Ratio(GCR)을 사용한다. GCR은 패널 길이를 이격거리로 나눈 값이다. 오후 1시의 시간각, 춘추분 적위, 패널의 경사는 30° , 룡포광산의 위도 39° 로 계산한 결과 0.77을 사용하였다.

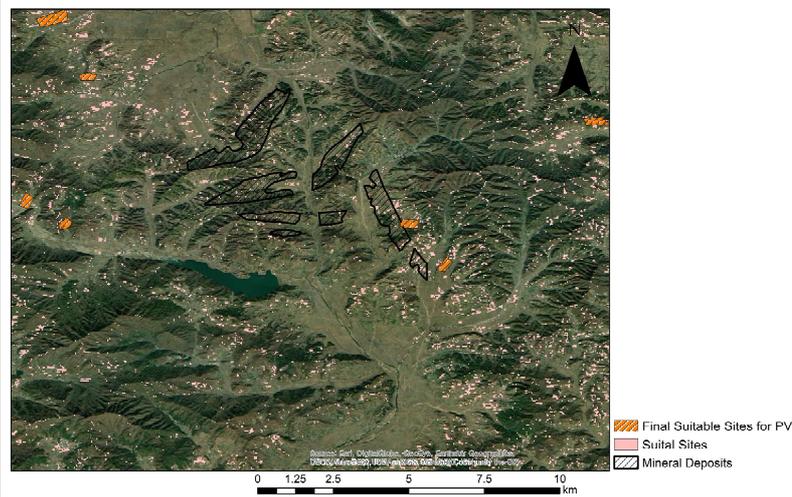


그림 4.10 최종 선정된 태양광 발전소 적정 부지

최종적으로 패널의 경사가 30° , 경사방향이 180° 일 때 가장 넓은 면적을 가지는 다섯 곳의 부지에 대한 예상 발전량은 표4.1과 같다. 가장 넓은 부지인 Site 1에서 설치 가능한 모듈의 개수는 118,038개로 약 49kW 규모의 발전소를 건설할 수 있으며, 연간 예상 발전량은 약 51GWh이다. Site1의 월별 발전량은 그림4.11과 같다. 해당 지역에서는 3~6월에 예상 발전량이 높고, 11월~1월 동지 때 발전량이 상대적으로 낮을 것으로 추정된다. 본 연구에서는 외부조건에 의한 그림자 영향을 고려하지 않았으며, 평양의 기상 자료를 사용하여 오차가 존재하므로 추후 검증이 필요하다. 본 연구 결과를 통해 북한 광산 지역의 공간적 특성을 이해하고 추후 북한과의 자원개발 및 에너지 분야의 협력에 있어서 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

표 4.1 면적 상위 5개의 태양광 발전 부지들의 설치용량과 연간 발전 잠재량

Site	Area(m ²)	Capacity (kW)	Annual Energy (kWh)
1	252,675	49,000	51,082,000
2	146,550	28,419	29,738,000
3	118,496	22,979	24,071,000
4	108,926	21,123	22,127,000
5	101,892	19,759	20,700,000

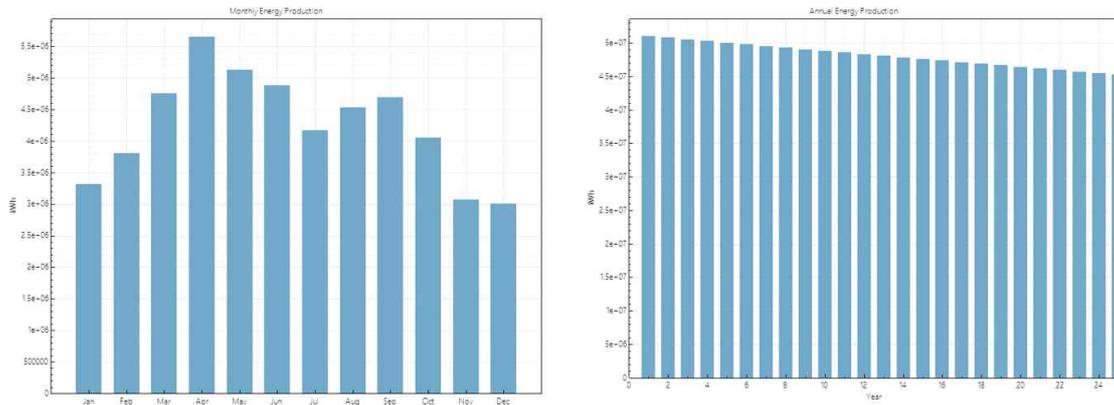


그림 4.11 Site 1에 대한 월별 예상 발전량 (좌)과 연간 발전량 감소 추이 (우)

5. 희토류 광산 인근의 광해 발생 현황 및 오염 경로 분석

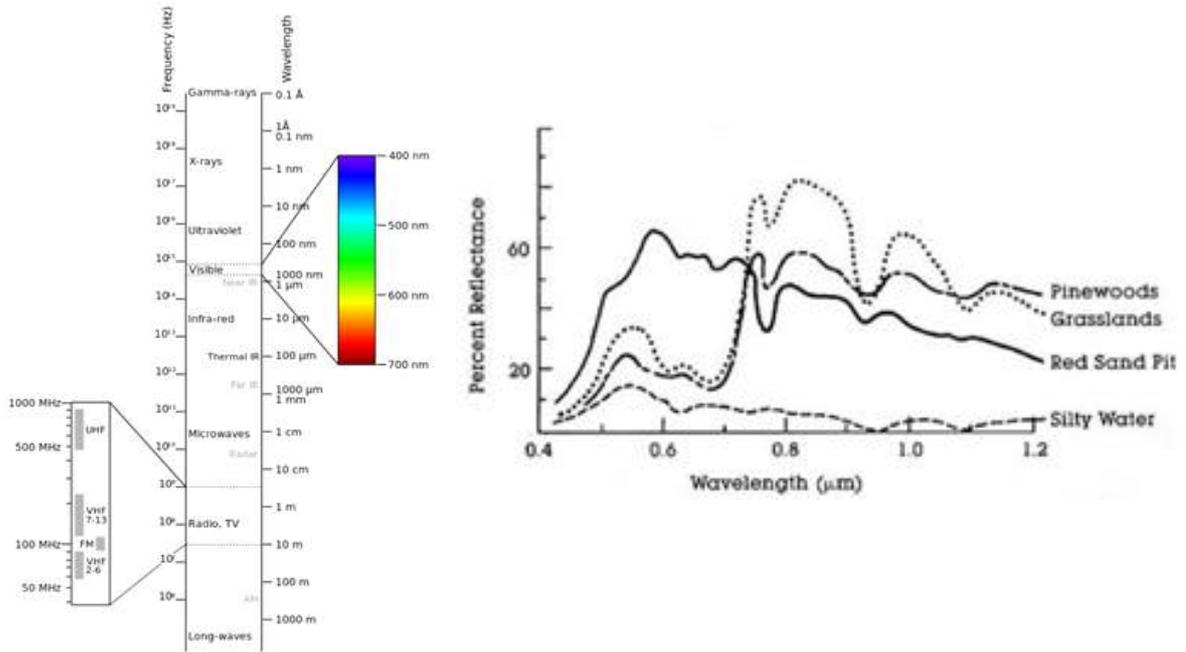
광물자원의 안정적·지속적인 개발을 위해서는 광산개발로 인한 피해(광해)를 사전에 방지하고 예방할 필요가 있다. 특히, 중금속 물질을 포함하고 있는 광물찌꺼기 발생으로 인한 인근 지역의 수질오염 문제는 자연과 주민들의 건강에 악영향을 미칠뿐만 아니라 복구 작업에도 상당한 시간과 비용이 요구된다. 북한의 경우 광산개발 과정에서 적절한 환경복원 처리 없이 채광작업을 진행하는 경우가 많기 때문에 이로 인한 심각성은 더욱 크다고 볼 수 있으며, 특히 희토류 광산은 주변 환경을 크게 오염시키는 것으로 알려져 있다. 북한의 주요 희토류 광산으로는 룡포광산, 철산광산, 선암광산, 압동광산 등이 알려져 있다. 그러나 이러한 광산들은 대부분 소규모로 개발이 이루어졌거나 현재 개발이 중단된 상황이고, 정보가 제한되어 있어서 채광작업으로 인한 광해 발생 현황을 파악하기에는 어려움이 있다. 희토류 광물의 매장량이 가장 높은 것으로 알려진 룡포광산에 대해 위성영상(Landsat, Sentinel-2)을 이용하여 90년대 이후의 변화를 분석하였으나 큰 변화를 관측하기 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 대규모로 개발이 이루어진 무산광산을 대상으로 위성영상

을 이용한 광해 발생 현황을 분석하였다. 무산광산은 북한의 최대 철광상 부존지역에 위치하여 주로 저품위의 자철광을 생산하며, 일부 희토류 광물자원도 부존하는 것으로 알려져있다. 대규모 노천채광으로 인하여 환경피해가 심각하며 대표적인 광해로는 폐석 적치량 증가, 광물찌꺼기의 하천 유출, 식생 훼손 등이 있다(윤성문 등, 2018). 특히 2020년 8~9월에는 태풍 마이삭으로 인해 무산광산이 물에 잠기고 산사태로 인해 주변 농경지도 유실된 것으로 보고되었다. 또한, 무산광산의 정광장이 물에 잠겨 상당한 정광이 유실되었고 철도 선로마저 파괴가 되었다(서울평양뉴스, 2020). 이처럼 무산광산을 비롯한 북한의 광산은 노후화된 시설과 방지 시설 부족으로 인해 광해 발생에 취약한 것으로 파악된다. 따라서 북한 광산에 적치된 광물찌꺼기로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 강우시 오염물질의 이동경로와 확산패턴을 모델링하고 예측하여 인근 하천이나 주거지로 유입되지 않도록 사전에 방지할 필요가 있다.

5.1 위성영상을 이용한 무산광산의 광해 발생 현황 분석

본 연구에서는 위성영상을 이용하여 무산광산 주변 지역의 피복 변화와 광해 발생 현황을 분석하였다. 지표의 물질과 태양 에너지 간의 상호 작용은 파장에 따라 다르게 나타나는데, 위성영상은 지구표면에서 발산되는 에너지를 원격탐사 기술을 통해 전자기 스펙트럼의 영역에서 취득한 결과를 의미한다(그림 5.1). 분석을 위해서는 다중분광(Multispectral) 위성인 Landsat과 Sentinel-2의 영상 자료를 활용하였다. Landsat은 1970년대 초부터 미국 항공 우주국(NASA)에서 개발한 다중 스펙트럼 위성으로, 16일의 주기해상도를 가지며 Landsat 8 센서가 관측할 수 있는 파장대 영역 및 공간해상도는 표 5.1과 같다.



([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:
%3AElectromagnetic-Spectrum.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%3AElectromagnetic-Spectrum.svg))

그림 5.1 (a) 전자기 스펙트럼과 (b) 물질에 따른 반사율 곡선

표 5.1 Landsat 8 위성의 관측 파장대 영역 및 공간해상도

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 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - 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)

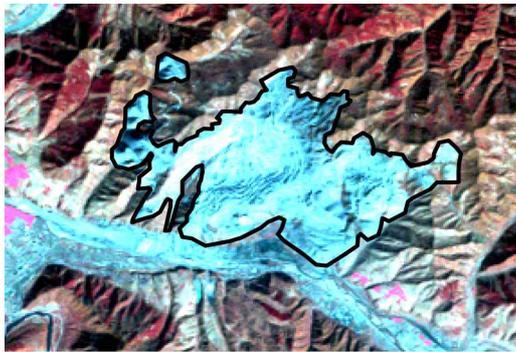
(http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)

Sentinel-2는 유럽 우주국(ESA)이 Copernicus 육상 모니터링 서비스를 위해 개발한 다중분광 위성으로 표 5.2와 같이 10m, 20m, 60m의 공간해상도를 가지는 13개의 파장대 영역을 관측할 수 있다.

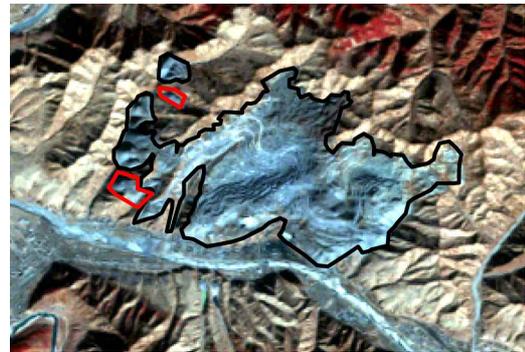
표 5.2 Sentinel-2 위성의 관측 파장대 영역 및 공간해상도

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

무산광산에서의 채광작업으로 인해 생기는 주변 환경의 변화를 분석하기 위해서 1990년부터 2020년까지 5년 간격의 Landsat 영상을 분석하였다. 그림 5.2는 피복의 변화를 파악하기 쉽도록 가색상(false color)을 이용한 영상을 보여주며, 이때 붉은색으로 나타나는 픽셀은 일반적으로 식물의 분포가 높은 지역을 나타낸다. 도심지나 광산 개발이 이루어진 지역은 푸른색에 가깝게 나타나는데, 변화되는 양상을 확인하기 쉽도록 광산 영역의 경계를 굵은 선으로 표시하였다. 계속되는 개발로 인해 노천 채광장 및 광미적치장을 포함한 광산 영역이 지속해서 확장되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 1990년



(b) 2000년



(c) 2010년



(d) 2020년

검은색 경계: 이전 단계의 개발 영역, 붉은색 경계: 해당 단계에서 확장 개발된 영역

그림 5.2 Landsat 위성영상의 가색상(false color)을 이용한 광산 영역 확장 관측

이처럼 위성영상을 시각적으로 확인하여 채광장이나 광미적치장 등의 개발 지역을 파악할 수 있으나, 더욱 정량적인 분류를 위해 분광신호(spectral signature)를 이용한 피복 분류를 수행하였다. 본 연구에서는 지정한 표본 지역(Regions of Interest, ROI)의 분광신호와 나머지 영역의 분광신호를 비교하여 분류를 수행하는 감독분류(supervised classification) 방식을 적용하였다. Minimum distance, Maximum likelihood, Spectral angle mapping이나 그 외 머신러닝 기술을 비롯한 다양한 분류 알고리즘들이 사용되고 있으며 여기서는 Spectral angle mapping 기법을 이용하였다. 분석의 주목적은 광산 지역을 분류하는 것이기 때문에 불필요하게 세분된 클래스로 구분하지 않고, 도심지 및 광산 지역, 산림, 토양, 물, 총 4개의 클래스로 분류하였다. Landsat 영상에 비해서 공간해상도가 더 우수한 Sentinel-2 영상(2020년 10월 취득)을 이용했고, QGIS의 Semi-Automatic Classification Plugin(SCP)을 이용하여 자료의 다운로드, 전처리, 표본설정, 분류 등의 과정을 수행하였다. 그림 5.3(a)의 분류결과를 보면 광산 지역이 주변의 토양이나 산림과 명확하게 구분되는 것을 확인할 수 있다. 영상에서 최근 개발이 이루어진 지역(그림 5.1.3(b))을 명확하게 확인할 수 있으며, 강우가 집중될 경우 이러한 지역은 특히 광해 발생에 유의할 필요가 있을 것으로 생각된다.

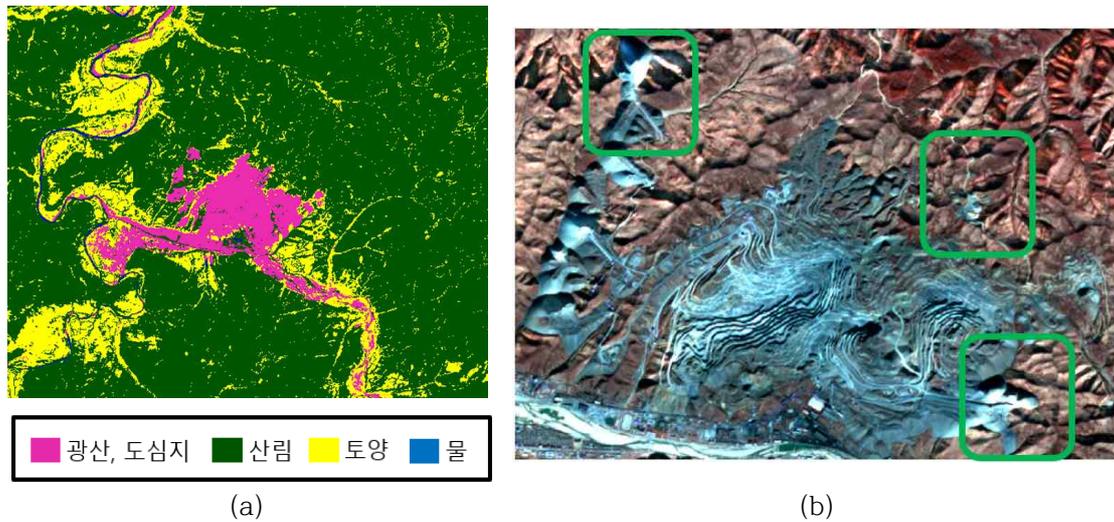


그림 5.3 Sentinel-2 영상 분석. (a) Spectral Angle Mapping 알고리즘을 이용한 피복 분류, (b) 최근 개발된 것으로 추정되는 광산 지역

다중분광 영상의 분석을 통해서 광산 주변 지역의 피복을 분류하고 광산 개발이 진행된 지역을 파악할 수 있었다. 그러나 서로 다른 피복들이 유사한 분광신호를 가지면 이를 정확하게 분류하기 어려우므로 서로 다른 시기에 촬영된 영상에서 미세한 피복의 변화를 관측하기에는 어려움이 있다. 2020년 8~9월 발생한 태풍 마이삭의 영향을 분석하기 위해서 2020년 7월 영상에 대한 피복 분류를 추가로 수행한 결과 눈에 띄는 차이를 찾기는 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 Sentinel-1B 영상을 이용해서 태풍 전후의 지표 변위를 분석함으로써 태풍에 의한 영향 및 광해 현황을 평가하였다.

Sentinel-1B는 2016년 4월에 발사된 유럽의 레이더 영상 위성으로 기상조건과 관계없이 고해상도 이미지를 제공할 수 있는 합성구경레이더(Synthetic aperture radar, SAR) 센서를 탑재하고 있다. SAR 시스템은 인공위성에 탑재된 안테나에서 만들어진 마이크로파가 대상 물체에 의해서 후방산란 되어 돌아오는 진폭(Amplitude)과 위상(Phase)을 다각도에서 수신하여 합성하는 시스템이다. SAR는 짧은 안테나로 여러 위치에서 신호를 보낸 후에 얻어진 신호를 도플러 효과(Doppler Effect)를 이용해서 합성하여, 큰 안테나를 사용한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 동일한 대상에 대해서 취득한 두 장 이상의 SAR 영상을 이용하는 레이더 간섭기법(SAR Interferometry, InSAR)을 활용하면 위상차이로부터 지표면의 변위와 고도를 높은 정밀도로 얻을 수 있다.

본 연구에서는 태풍 마이삭의 영향을 평가하기 위해서 2020년 7월 20일 취득한 Sentinel-1B 영상과 2020년 9월 30일 취득한 Sentinel-1B 영상에 대해 분석을 수행하였다. Sentinel 영상 자료의 처리를 위해서는 ESA에서 개발한 SNAP(The Sentinel Application Platform) 프로그램을 이용하였다. 그림 5.4는 두 시기 사이에 발생한 변위를 계산하기 위해 2개의 SAR 영상을 이용하는 InSAR 방법의 분석 순서도를 나타

낸다. 두 영상의 위상차를 이용하려면 먼저 두 제품을 모두 포함하는 스택(stack)을 만들어야 하며, 이때 이미지 통계 수치들을 사용하여 두 제품을 정렬하는 공동등록(Coregistration) 과정을 거친다. 이를 위해서는 전체 영상에서 분석에 필요한 부분을 선택하는 과정(TOPS split), 궤도와 관련된 보조 데이터를 적용하는 과정, 궤도 정보와 수치고도모델을 기반으로 두 개의 결과물을 공동등록하는 과정이 필요하다. 그리고 이에 기반을 두어 두 영상의 위상 차이에 의해 결정되는 간섭도(Interferogram)를 생성한다. 이때 두 이미지 사이의 coherence를 얻을 수 있는데, coherence는 지상 물체로부터 산란 되어 되돌아온 두 레이다 신호 간의 일치성을 나타내는 값으로써 위상 정보에 대한 정량적인 지표이다. 즉 높이의 변화가 큰 숲이나 바다 같은 곳에서는 이 값이 낮게 나타나고, 이러한 곳에서는 신뢰할만한 결과를 얻기가 어렵다. 그림 5.5(a)는 무산광산 주변 지역의 interferogram을 보여주고 있으며 산림 지역의 경우에는 노이즈처럼 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 산림 지역에서는 낮은 coherence 값(어두운 색)을 갖는 것을 알 수 있다(그림 5.5(b)). 다음으로는 필터링 과정을 통해 노이즈에 의한 손상을 복원하고, 위상의 언래핑(unwrapping) 과정을 통해 위상 변화를 고도 변화와 연관시켜야 한다. 최종적으로는 이러한 위상의 단위를 길이 단위로 변환하여 변위를 계산할 수 있으며 지형보정과 지오크딩 과정을 거쳐야 한다.

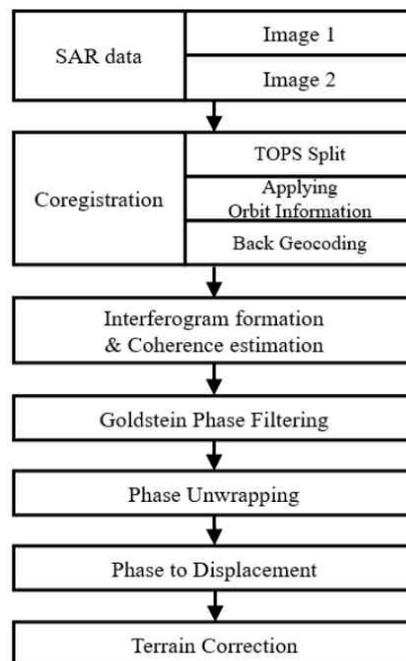
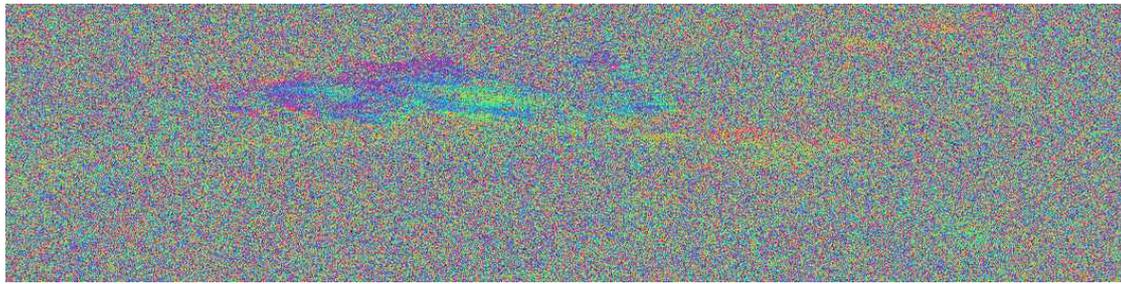
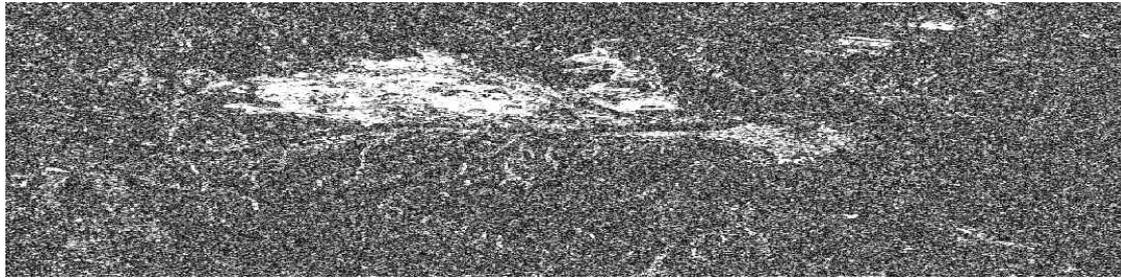


그림 5.4 InSAR 분석을 통한 지표면의 변위 분석 순서도



(a)



(b)

그림 5.5 무산광산 주변 지역의 (a) interferogram(위상), (b) coherence.

그림 5.6은 이러한 과정을 거쳐 산출한 무산광산 지역의 지표면 변위와 위성영상을 함께 보여주고 있다. 그림 5.6(a)에는 비가 올 때 지형적으로 물이 차오를 수 있는 웅덩이 형태의 지형을 파란색으로 표시하였다. 이러한 결과는 InSAR 분석과는 무관하며 수치고도모델에 Fill 기능을 적용하여 산출한 것이다. 이를 통해 봤을 때 하천과 도심지가 위치한 A 지역, 웅덩이 형태로 채광이 이루어진 B 지역에 빗물이나 유실된 물질이 퇴적될 수 있음을 예상할 수 있다. C 지역의 경우 노천채광장이 명확함에도 불구하고 파란색으로 표시되지 않았는데, 이는 좌측의 배수로(혹은 진입로)로 추정되는 통로를 통해 물이 흐르는(고이지 않는) 것으로 지형공간 분석이 수행되기 때문이다. 그림 5.6(b)는 InSAR 분석을 통해 산출된 지표 변위를 나타낸다. 붉은색에 가까울수록 지표가 많이 상승한 것을 의미하며, 파란색에 가까울수록 지표의 상승 변위가 작거나 침하된 것을 의미한다. A 지역의 경우 높은 지표 변위 상승 값을 보이는데, 이는 태풍으로 인해 유실된 토양이나 광물찌꺼기가 하천과 도심에 적치되었을 수 있음을 암시한다. 채광장인 B 지역과 C 지역의 경우에도 지표의 높이가 올라간 것으로 분석되었다. C 지역 중에서 특히 좌측의 배수로로 추정되는 곳은 높은 지표 상승 값을 보이며, 광산에서 유실된 광물찌꺼기가 이곳에 적치되었을 것으로 생각된다. 더욱 직관적인 확인을 위한 3차원 가시화 결과를 그림 5.6(c)와 5.6(d)에 나타냈다. 광산 개발 지역의 바깥 영역은 다소 불안정한 값을 보이는데, 이러한 영역은 산림 지역이라 분석값의 신뢰도가 낮은 곳에 해당한다. 태풍 마이삭에 의한 무산광산의 피해가 8~9월 중 정확히 언제 발생했는지 확인이 어려우므로 본 연구에서는 취득 시기가 다소 차이가 나는 두 개의 영상(2020년 7월 20일, 9월 30일)을 이용하였다. 분석에 사용되는 영상들이 비슷한 시기에 취득될수록 정밀한 분

석이 가능하므로 피해 날짜를 정확히 안다면 그 날짜를 기준으로 인접한 영상들을 활용하여 더욱 신뢰도 높은 분석이 가능할 것이다.

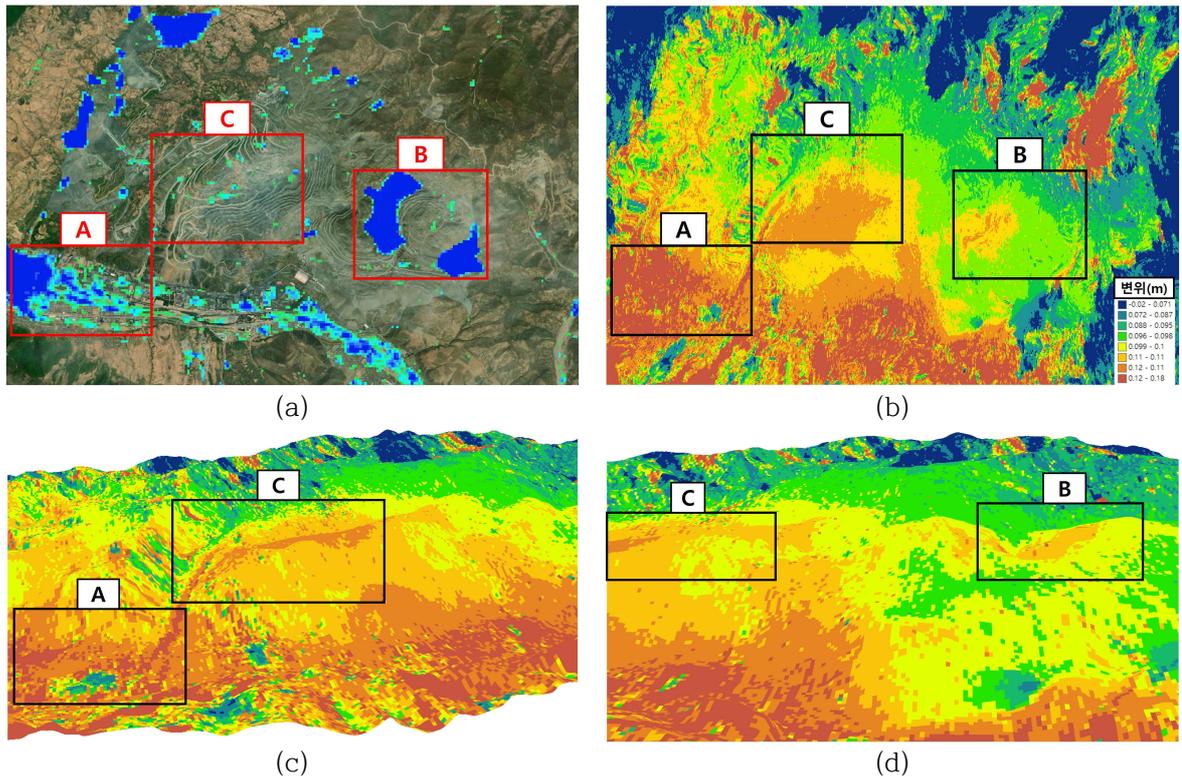


그림 5.6 Sentinel-1B 영상(7월, 9월)을 이용한 무산광산의 변위 분석 결과. (a) 웅덩이 형태의 지형, (b) InSAR 변위 분석 결과, (c) 3차원 가시화 결과(A, C 지역), (d) (B, C 지역)

5.2 희토류 광산개발에 의한 광물찌꺼기 적치장 분포 파악 및 오염물질 흐름 예측

무산광산은 광물찌꺼기 적치 시설이 미흡한 상태에서 강우 발생으로 인하여 다량의 광물찌꺼기가 하천으로 유출되고 있는 상황이다(그림 5.7). 앞서 지표 변위의 분석을 통해 태풍에 의해 유실된 광물찌꺼기가 특정 지역에 퇴적되는 피해를 확인할 수 있었으나 흐름에 대한 방향성을 직접적으로 제시하지는 못하였다. 따라서 광물찌꺼기 오염물질로 인한 인명 피해를 사전에 방지하기 위하여 추가적으로 광물찌꺼기의 유출 및 확산 패턴을 예측하였다.



그림 5.7 하천으로 유출된 무산광산 광물찌꺼기(윤성문 등, 2018)

그림 5.8은 광물찌꺼기 오염물질의 이동경로와 확산 패턴 예측을 위한 연구 순서도를 보여준다. 연구대상지역의 광산 및 광해자료는 GIS 데이터베이스(DB) 형태로 구축하였다. 연구지역의 고도와 지형 기록을 보여주는 수치고도모델(digital elevation model, DEM)은 30m × 30m의 공간해상도를 갖는 ASTER GDEM을 활용하였다. 반면 광산지역의 경계와 광물찌꺼기 적치 지역은 위성영상 분석 자료와 참고문헌(윤성문 등, 2018)을 기반으로 Digitizing 하였다. 주변 하천이나 주거지역 등은 2019년도 동일사업에서 구축했던 GIS DB 자료를 활용하였다. GIS DB 구축을 위한 전처리에는 ArcGIS Pro 소프트웨어를 이용하였다.

본 연구에서 강우시 광물찌꺼기의 이동경로 및 확산패턴 예측을 위하여 수계분석에서 대표적으로 활용되는 단방향흐름(single flow direction, SFD 또는 D8)과 다방향흐름(multiple flow direction, MFD) 알고리즘을 적용하였다. SFD 알고리즘은 격자 형태를 갖는 래스터 자료에서 격자셀의 8개 방향 중 경사도가 가장 높은 1개 방향으로 물이 이동하는 방식(예; 동쪽방향 100%)인 반면에, MFD 알고리즘은 8개 방향 중 경사도가 높은 2~3개 방향으로 물의 양이 분할(예; 동쪽 50%, 남동쪽 30%, 남쪽 20%)되어 이동하는 방식이다. 두 알고리즘에 대한 개념적 차이는 그림 5.9에 제시하였다. 지형적 특성에 따라 다를 수 있지만 일반적으로 MFD 알고리즘이 보다 현실성을 잘 반영한다. 따라서 본 연구에서는 MFD 알고리즘을 이용하여 무산광산 광물찌꺼기의 이동경로 및 확산패턴을 예측하였다.

무산광산의 경우 광물찌꺼기가 적치되어 있는 지역 외에도 광산 전역에 어느 정도의 광물찌꺼기가 존재하는 것을 위성영상으로부터 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 시나리오를 고려하였다. 첫째, 무산광산 전역에 광물찌꺼기가 존재한다 가정된 경우와 둘째, 최근(2018년 이후) 추가로 발생된 광물찌꺼기가 적치장을 중심으로 강우시 이동경로와 확산패턴을 예측하고, 그 결과를 비교분석하였다. 이를 통해 무산광산 인근 하천 및 주거지로의 오염물질의 유입 가능성 또는 연계성

을 분석하고, 광물찌꺼기 확산 방지를 위한 시설의 최적 위치를 제안하였다.

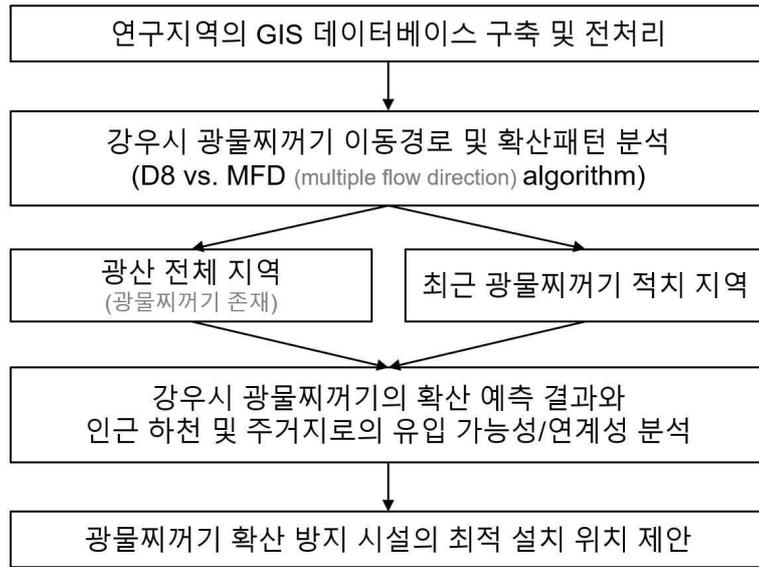


그림 5.8 광물찌꺼기 이동경로 및 확산패턴 예측 방법 절차도

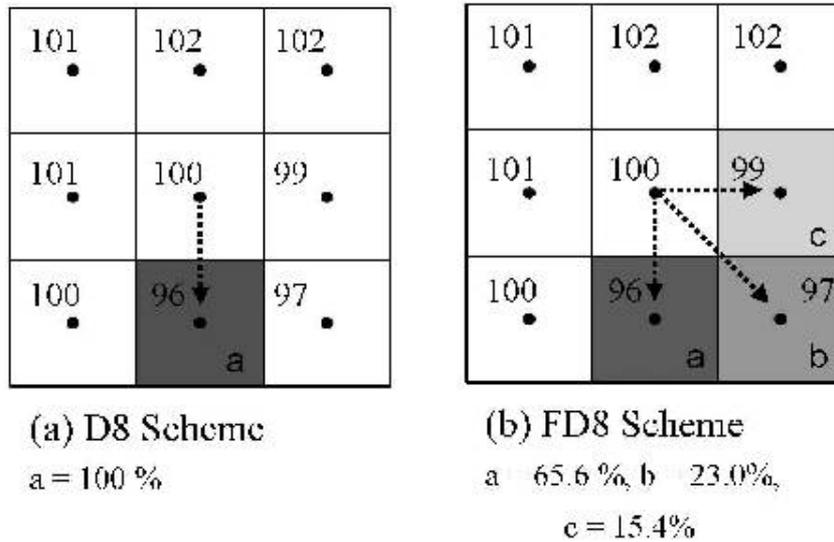


그림 5.9 강우의 단방향흐름(a) 및 다방향흐름(b) 분석 알고리즘 개념도

무산광산 전체 지역의 광물찌꺼기 오염물질이 강우에 의해 다방향으로 확산될 경우의 예상 결과는 그림 5.10에 도시하였다. 총 4개 지역(흰색 점선형 원 표시)으로 광물찌꺼기가 확산되며, 4개 모두 인근 하천에 유입되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 무산광산의 남쪽 하천(청색 선)과 주거지(노란색 영역)로 대규모의 광물찌꺼기가 유입되는 것은 확인할 수 있는데 이는 남쪽이 상대적으로 저지대이기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 광물찌꺼기 확산 및 하천 오염을 방지하기 위해서는 4개 지역

을 중심으로 배수로 건설 또는 적절한 확산 방지 시설의 설치가 필요할 것으로 생각한다.

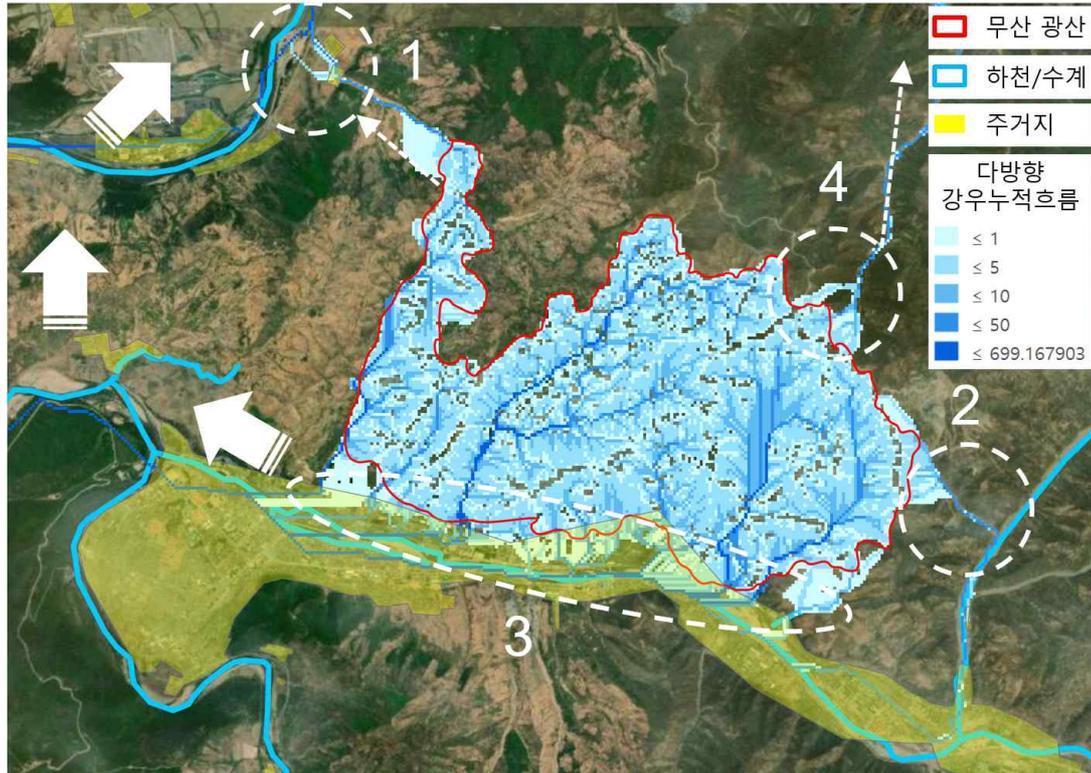


그림 5.10 무산광산 전역에 위치한 광물찌꺼기의 강우시 다방향 확산 예측 결과

2018년 전후로 무산광산을 확장 개발함에 따라 광물찌꺼기 적치 영역도 확장되고 있다. 그림 5.11의 좌측 위성영상(a, b)을 보면 최근에 개발된 무산광산 지역과 광물찌꺼기 적치 지역을 확인할 수 있다. 이와 같이 최근에 적치된 광물찌꺼기(A, B, C - 노란색 점선)가 강우에 의해 다방향으로 확산될 경우의 예상 결과는 그림 5.10(우측)과 같다. 이는 마치 광물찌꺼기 영역에만 강우가 발생하는 것으로 보아도 무방하다. 총 3개 광물찌꺼기 적치 지역(A, B, C - 분홍색 영역) 중에서 A지역은 오염물질이 북서쪽과 남서쪽으로 이동하여 하천 및 주거지와 만나며, B와 C 지역의 오염물질은 모두 남서쪽으로 이동하여 하천 및 주거지로 유입되는 것을 확인할 수 있다. 오염물질이 하천에 유입되는 지점은 다르지만 이는 모두 같은 하천에 해당한다. 한편 B지역 오염물질 중 일부는 북쪽으로도 확산되어 하천에 유입되는 것으로 분석되었다.

다만 본 연구에서는 빗물에 포함된 광물찌꺼기 오염물질이 토양으로 흡수되는 정도를 고려하지는 않았다. 따라서 오염물질의 일정량은 이동경로 중 토양내에 일부 흡수 또는 흡착될 수도 있다. 그러나 오랜시간 강우와 바람의 영향을 받게 될 경우 장기적으로는 인근 하천에 유입될 가능성이 높다. 또한, 오염물질이 하천에 유입되

지 않고 인근 토양을 오염시킬 경우에도 농작물이나 다양한 경로를 따라 인간에게 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

본 연구의 첫번째 시나리오에서는 4개 지점에서, 두번째 시나리오에서는 3개 지점에서 광물찌꺼기가 유출 및 확산될 수 있는 것으로 분석되었다. 두 시나리오에서 2개 지점은 동일한 지점을 나타내고 있으므로 총 5개 지점이라고 보면 될 것이다. 따라서 두 가지 시나리오에서 광물찌꺼기가 광산 외부로 유출될 수 있는 5개 지점을 대상으로 확산 방지 시설을 설치하거나 지속적인 모니터링을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

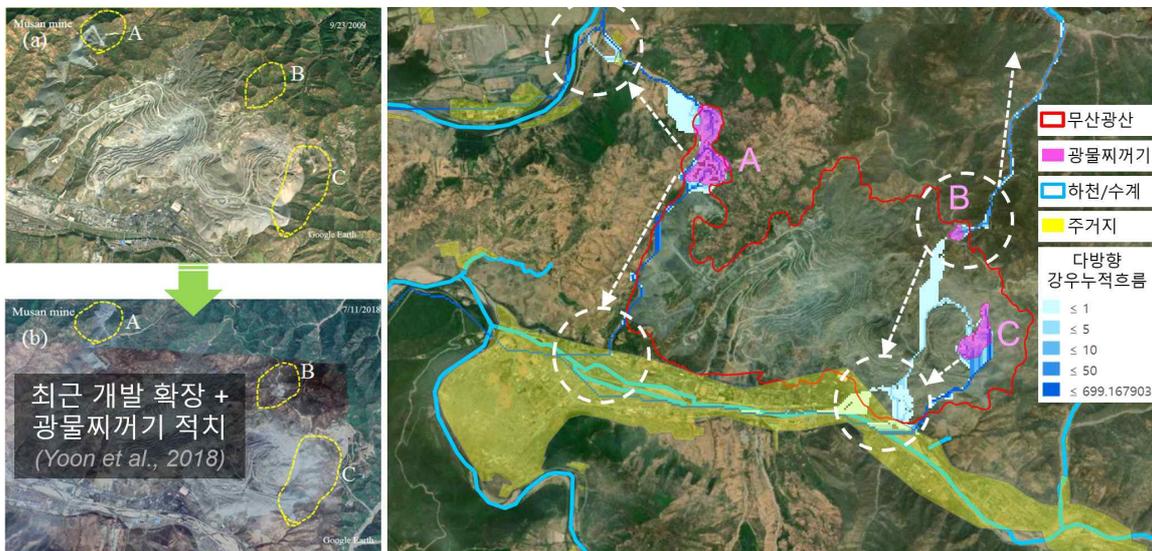


그림 5.11 무산광산 광물찌꺼기 적치장 위치와 강우시 광물찌꺼기의 다방향 확산 예측 결과

5.3 결론

본 연구에서 위성영상을 이용하여 무산광산의 토지피복분류를 수행한 결과 광물찌꺼기 적치장의 위치를 파악할 수 있었으며, 30여년에 걸친 시계열 분석 결과 채광장과 적치장 영역이 지속적으로 확대되는 것을 확인할 수 있었다. InSAR 분석의 결과, 웅덩이 형태의 노천 채광장과 배수로, 하천 및 도심 부근의 변위가 증가한 것으로 나타났으며 이는 태풍으로 인해 유실된 토양 및 광물찌꺼기가 쌓인 것으로 판단된다. 또한, 강우 발생시 광물찌꺼기 오염물질의 이동경로와 확산패턴을 분석하여 인근 하천이나 거주지로의 유입 가능성을 평가하였다. 그 결과, 무산광산의 경우 강우시 4개 지역(방향)으로 광물찌꺼기가 확산되어 인근 하천에 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상대적으로 저지대에 있는 광산 남쪽지역으로 대규모 광물찌꺼기가 유입될 가능성이 높은 것으로 분석되었으며 이는 앞선 변위 분석의 결과에 상응한다. 따라서 광산 외부로의 광물찌꺼기의 확산과 하천 오염을 방지하기 위해서는 유출 가능지역의 배수로 건설 또는 확산 방지 시설의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

다. 추후 해당지역의 토양도 등의 자료가 확보된다면 빗물누적흐름량 계산시 토양의 흡수율을 고려하여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

- (1) 강일석, 박영상, 송재준, 2020, 북한의 광업 및 암반공학 분야 최신 연구동향 분석, 터널과 지하공간, 30(1), pp. 29-38
- (2) 국가통계포털, 북한통계,
https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_02_02&vwcd=MT_BUKHAN&parmTabId=M_02_02 (2021-01-15 접속)
- (3) 남북교류협력지원협회, 북한자원 뉴스레터: 북한 희토류 현황,
<https://www.e-ia.co.kr/sonosa/newsletter/201807/special1.html> (2021-01-15 접속)
- (4) 리진철, 정희남, 2015, 갯운반계통의 합리화로 생산량제고, 기술혁신
- (5) 박용석, 2010, 남북한 건설분야 협력사례 분석과 북한 내 산업단지 개발 방안
- (6) 방경진, 2018, 북한 광물자원과 남북 경제 공동번영의 길
- (7) 북한자원연구소, 2013, 북한 지하자원개발 법제 연구
- (8) 삼성증권 북한투자전략팀, 2019, 북한투자전략보고서 2019-I, pp.108
- (9) 서울평양뉴스, 2020, 태풍 마이삭으로 무산광산 침수...철도도 불통,
<http://www.spnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=32758> (2020-11-25 접속)
- (10) 연합뉴스, 2020, 북한, 태풍 ‘하이선’ 홍수주의보 . . . “농업부문 큰 피해 예견”, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200905051900504> (2020-10-08 접속)
- (11) 이춘근, 김종선, 박은혜, 남달리, 2015, 통일 이후 남북한 과학기술체제 통합방안, 과학기술정책연구원, 정책연구 2015-20, 38-40.
- (12) 임상철, 2014, 북한의 주요 지하자원과 남북교류 가능성, 평화학연구, 15(1), 111-128
- (13) 정우진, 2019, 북한의 광물자원산업 실태와 남북협력 방안, 한국자원공학회지, 56(2), 204-211
- (14) 조정구, 이정희, 2017, 북한의 광해원인 분석과 실태에 관한 연구, 한국자원공학회지, 54(6), 619-627
- (15) 최경수, 황해남도 정촌 흑연광산 남북공동개발이 남긴 교훈,
http://www.ipa.re.kr/ipa2008.artyboardv15/mboard.asp?exec=view&strBoardID=UnityKorea_07&intCategory=&strSearchCategory=&strSearchWord=&intPage=&intSeq=2306&SearchYear=2010&SearchMonth=9 (2021-01-15 접속)
- (16) 최용근, 김장하, 김우정, 2019, 국내 광량 평가 기준에 대한 고찰, 한국자원공학회지, 56(2), 172-182
- (17) 최종문, 2017, 국제기준에서 바라본 북한 광물자원 평가와 개발환경
- (18) 최요순, 서장원, 김성민, 2019, 『광해관리GIS』, p.33

- (19) 통계청, 북한통계포털, 2020.12.28., <https://kosis.kr/bukhan/> (2021-01-04 접속)
- (20) 한국일보, 2020, 북한, 태풍피해에 경제계획 달성 어려워 . . . 재검토한다, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2020090907310005715?did=NA>
(2020-01-15 접속)
- (21) 한국지질자원연구원, 2020, 광산물 수급분석 2019/2020
- (22) 한국지질자원연구원, 『한반도광물자원개발 DMR 융합연구단광산 DB』
<https://dmr.kigam.re.kr/>
- (23) KDB 산업은행, 2020, 북한의 산업1
- (24) Oh, H.J., 2010, Landslide susceptibility analysis and validation using Weight-of-Evidence model. Journal of the Geological Society of Korea, 46(2), pp. 157-170
- (25) Shu, D.J., Kim, S.G., Kim, D.G., 2010, The Effect of *Pinus densiflora* Root System on Stability of Damaged Slopes, Journal of Forest Science, 26(3), pp. 193-202.
- (26) Xia, Z., Wei, C., 2020, GIS-Based Evaluation of Landslide Susceptibility Models Using Certainty Factors and Functional Trees-Based Ensemble Techniques, applied sciences, 10(1), 16.
- (27) Yoon, S., Jang, H., Yoon, S.T., Kim, D.M., 2018, Investigating the Status of Mine Hazards in North Korea Using Satellite Pictures, Journal of the Geological Society of Korea, 55(6), pp. 564-575.