

북한 주요광산의 개발 전략 연구

송재준¹, 박형동¹, 김성민², 서장원², 강일석³, 김진언³,
양아란³, 오명찬³, 윤동호³, 종웨이³, 박영상⁴, 임준수⁴

¹ 서울대학교 에너지자원신기술연구소

² 강원대학교 에너지공학부

³ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

⁴ 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과

1. 서론

남한과 북한의 향후 경제협력 사업 중, 북한 광물자원 개발 사업은 남북한의 이해관계를 모두 충족시킬 수 있는 잠재성 있는 사업 분야로 예상되고 있다. 먼저 남한의 경우 기술, 산업적으로 잠재성을 갖추고 있으며 인프라 여건도 우위에 있음에도 부존자원의 종류가 한정되어 있어 대부분의 자원을 수입에 의존하고 있다. 한국지질자원연구원에서 2019년 발간한 ‘광산물 수급분석 2018/2019’에 따르면, 2018년 국내 광산물 수입량은 35조 3,699억 원, 생산량은 1조 9,659억 원으로 약 5.5%의 광물자원 자급률을 보이고 있다. 특히 국내 광산물 생산량의 경우 석회석을 비롯한 규석, 고령토 등의 비금속 광물자원이 대부분을 차지하고 있으며, 광산물 수입량의 대부분을 차지하는 금속광 및 석탄광의 경우 각각 생산량 627억 원, 2,156억 원, 수입량 16조 2,966억 원, 18조 2,285억 원으로 자급률 0.4%, 1.2% 수준에 머무르고 있는 실정이다(한국지질자원연구원, 2019).

반면 통계청의 ‘2018 북한의 주요통계지표’에 따르면, 2017년 북한의 광업은 북한 총 경제규모의 약 13.8%, 총 대외 수출액의 약 39.1%를 차지할 정도로 북한의 주요한 산업 분야로 분석되었다. 또한 조선중앙연감, 북한자원연구소, USGS 등 다양한 조사기관의 북한 주요 광물자원 매장량 예측결과에 따르면, 대부분의 주요 금속광물 매장량이 남한에 비해 풍부한 것으로 추정되었다. 북한에 부존하는 광물자원은 석탄광 1종, 금속광 22종, 비금속광 19종 등 총 42광종이며, 광산은 728개로 석탄광산 241개, 금속광산 260개, 비금속광산 227개이다(한국광물자원공사, 2017). 그 중 마그네사이트 광석 매장량은 세계 1위 규모이며 텅스텐, 흑연 매장량도 세계 10위권 내에 포함되는 거대한 규모를 자랑한다(USGS, 2020). 특히 남한 금속광 수입량의 약 80%를 차지하는 철, 동, 연광의 경우 북한의 매장량이 남한의 10~100배 이상에 달하는 것으로 추정되었다(통계청, 2019). 북한 광물자원이 남북관계 이슈에 항상 함께 항상 함께 대두되는 이유는 이러한 대조적 상황에서 기인한다. 자원의 안정적 수급은 산업의 정상가동과 발전에 필수적 요소이며 나아가 국가 경제의 안정화와 성장을 위해 반드시 필요하다. 북한은 지리적으로 인접해 있으며 다양한 광물자원을 보유해 무역 대상으로 매우 큰 잠재성을 갖고 있다. 실제로 남북교류협력 분야에서 광물자원의 공동개발은 중요한 사업으로 언급되어왔으며 쌍방간 협력 개발이 시도된 선례가 있다. 북한 경제 구조상에서 광업이 차지하는 큰 비중을 고려했을 때 매우 호혜적 교류대상으로 통일 과정에 긍정적 영향을 줄 수 있을 것이다. 따라서 북한 광물자원 개발 사업은 남한이 필요로 하는 주요 금속광물자원을 육로를 통해 확보할 수 있다는 점에서 남한 자원안보에 기여할 수 있을 뿐 아니라, 북한의 주요 산업 분야인 광업의 현대화 및 광물자원 개발에 수반되는 사회간접자본 투자를 통해 북한의 경제, 사회발전을 촉진하여 남북한 쌍방에게 미치는 경제적 파급력이 클 것으로 예측된다.

그러나 이와 같은 북한 광물자원 개발 사업의 잠재성 및 이점에도 불구하고 남한을 비

롯한 외부 자본의 투자는 미비한 실정인데, 이는 북한 체제가 가지는 정치, 경제적 불안정성 및 북한의 기술력, 인프라 부족으로 인한 수익성 리스크가 주요 원인으로 분석된다(김유동 외, 2005). 북한은 외국인 투자법을 통해 외부 자본의 직접적인 광산 경영 참여를 제한하고 있으며, 대신 기술, 자본 투자에 따른 사업 지분율을 기준으로 광산물 취득 권리를 일부분 획득하는 경우가 일반적이다(Lim, 2014; Chung, 2019). 또한 북한은 1990년대 이후 장기간의 경제난으로 인해 국가 인프라 감축, 광산 생산설비 및 채광설비의 노후화, 광업 기술개발의 미비와 같은 문제점이 광업 전반에 걸쳐 나타나고 있으며, 특히 북한의 전력 부족 문제는 북한 광산의 생산력을 직접적으로 저하시키는 주요 리스크이다. 따라서 북한 광물자원 개발 사업의 성공적인 투자를 위해서는 일반적으로 수행되는 사전 조사 외에도 북한이 활용 가능한 기술, 장비, 연구수준에 대한 정량적인 분석 및 북한 광산의 현장 인프라 조건에 따른 현대화 전략 수립이 필수적으로 요구된다.

따라서 미래 광업 분야 남북협력이 재개되었을 때를 대비하여 북한의 광업 현황에 대해 다각도로 면밀히 파악하고 연구할 필요가 있다. 북한 광산에 대한 정보의 수집과 동시에 북한의 광업 발전을 저해하는 주요 요소인 환경적 불안정성, 인프라 부족을 중점적으로 살펴보아야 한다. 자연재해와 전기 공급의 불안정성으로 인한 북한 광산 활동 정지 문제는 국내에도 이미 여러 차례 보고된 바 있다. 또한 광산 산출물 교류를 위해 전제되어야 할 교통 인프라 문제도 중요한 문제이다. 본 연구에서는 이와 같은 관점에서 북한 광물자원 개발 전략 수립 및 경제성 평가를 위한 기초 가이드라인을 작성하고자 하였으며, 먼저 북한 광업 관련 문헌자료 및 통계자료를 취합하여 북한 광업의 규모 및 잠재성, 북한 정권교체 이후 급변하는 광업 분야 현황을 분석하였다. 그리고 최근 10여 년간 발행된 북한 광업 학술지에 수록된 연구논문에 대한 데이터베이스를 작성하여, 김정은 정권 이후 과학기술정책 변동에 따른 광업 연구 경향성 및 북한의 현재 기술, 장비, 연구적 역량에 대해 분석하였다. 그리고 북한 주요광산 GIS DB(지리정보시스템 데이터베이스)를 구축하고 광산 인근의 자연재해 발생에 대비하기 위해 대표적 광산의 산사태, 침수 위험성을 분석하고 안정적 전력수급 대안으로써 신재생에너지 잠재성을 평가하였다. 더불어 각 광산과 철도, 도로, 항만 등 교통 인프라 간의 연결성을 분석하여 다각도의 관점을 제시하였다.

2. 북한의 광업 현황 분석

2.1 주요 광물자원 매장량 현황

북한이 보유하고 있는 광물자원 매장량의 추정치는 조사기관 별로 큰 편차를 보이는 경우가 많으며, 이는 북한 당국이 제공하는 광물자원 매장량 데이터의 폐쇄성 및 신뢰성 문제로 인해 각 조사기관에서 활용하는 기본 가정 및 기초 데이터 선택이 매장량 추정에 큰 영향을 미치기 때문이다. 예를 들면, 북한자원연구소는 북한의 ‘조선지리전서’를 활용하여 광물자원 매장량을 추정하였으며, 한국광물자원공사는 북한의 ‘조선중앙연감’, ‘조선지리전서’, 그리고 북한-중국 간의 광물자원 투자제안서와 북한의 대외 광물자원 수급동향을 활용하여 주요 광물자원의 매장량을 추정하였다. USGS는 국내외에서 발표된 북한 광물자원 관련 연구, 언론 발표결과를 종합하여 광물자원 매장량을 추정하였다(Lim, 2014; Chung, 2019).

이와 같은 조사기관 별 편차에도 불구하고, 대체적으로 북한의 광물자원 매장량은 남한에 비해 풍부한 것으로 추정되고 있다. 남북한의 주요 금속 및 비금속, 석탄 광물자원 매장량 추정치는 표 2.1 ~ 2.3에 제시된 것과 같으며, 여기서 남한의 확정 및 추정 매장량의 총합을 100으로 간주하였을 때 북한의 광물자원 매장량의 상대적 값을 광중, 조사기

관에 따라 그림 2.1, 2.2에 나타내었다. 비교분석 결과 고령토, 활석을 제외한 대부분의 광물자원에서 북한의 매장량이 남한에 비해 풍부한 것으로 분석되었다. 특히 남한 광물자원 수입량의 대부분을 차지하는 철, 동, 연, 석탄 매장량의 경우 남한 매장량의 10 ~ 100배 이상에 달하는 것으로 나타났다. 해당 광종의 2018년 기준 수입량은 철광 6조 2,066억 원, 동광 4조 6,567억 원, 연광 1조 7,323억 원, 석탄광 18조 2,285억 원으로, 남한 전체 광물자원 수입량의 약 87.1%를 차지하고 있으며, 자급률은 1% 이내에 머무르고 있다(한국지질자원연구원, 2019). 북한 광물자원 개발 사업은 이와 같이 남한 수입비중이 높은 광물자원의 수입 경로를 다각화함과 동시에 육로로 수송 가능한 광물자원 수급방안을 마련하여 남한 자원안보에 기여할 수 있으며, 북한 광물자원의 잠재성을 효과적으로 활용하여 북한 광업의 현대화 및 북한 경제의 안정화에 기여할 것으로 예상된다.

하지만 제시된 북한의 광물자원 매장량 수치는 신뢰성 있는 현지조사를 통해 분석된 것이 아닌, 북한의 제한된 자료와 대외 광물자원 수급동향을 활용한 간접적인 추정치라는 한계가 있다. 또한 북한의 광물자원 매장량 자료는 북한의 기술수준 및 경제성을 고려하지 않은 단순 매장량 분석에 그치는 경우가 많아, 향후 구체적인 북한 광물자원 개발 전략 수립을 위해서는 북한의 가용 인프라 및 기술력을 종합적으로 고려한 추가적인 경제성 평가가 필수적으로 요구된다고 할 수 있다.

표 2.1. 북한 주요 금속광물자원 매장량 (통계청, 2019)

광종	조선중앙연감		북한자원연구소		단위
	매장량	기준품위	매장량	기준품위	
금	2,000.0	금속기준	698.0	금속기준	톤
은	5,000.0	금속기준	6,356.0	금속기준	
동	2,900.0	금속기준	4235.0	금속기준	
연	10,600.0	금속기준	9,988.0	금속기준	천톤
아연	21,100.0	금속기준	27,425.0	금속기준	
철	50.0	Fe 50%	24.7	Fe 63.5%	억톤
중석	246.0	WO3 65%	146.0	WO3 65	
몰리브덴	54.0	MoS2 90%	18.7	금속기준	천톤
망간	300.0	Mn 40	2,989.0	금속기준	
니켈	36.0	금속기준	147.6	금속기준	

표 2.2. 북한 주요 비금속·석탄 광물자원 매장량 (통계청, 2019)

광종	조선중앙연감		북한자원연구소		단위
	매장량	기준품위	매장량	기준품위	
인상흑연	2,000.0	FC 100%	14,596.0	FC 95%	천톤
석회석	1,000.0	각급	44.0	광석기준	
고령토	2,000.0	각급	89,139.0	광석기준	천톤
활석	700.0	각급	25,230.0	광석기준	
형석	500.0	각급	5,350.0	광석기준	
중정석	2,100.0	각급	15,397.0	광석기준	
인회석	1.5	각급	250.7	P2O5 30%	억톤
마그네사이트	60.0	MgO 45%	70.0	광석기준	
무연탄	45.0	각급	41.0	각급	
갈탄	160.0	각급	179.0	각급	

표 2.3. 남한 주요 광물자원 확정 및 추정 매장량 (한국광물자원공사)

구분	광종	매장량			기준품위	단위
		광량(확정)	광량(추정)	광량(합계)		
금속	금	16.1	28.7	44.8	금속기준	톤
	은	666.0	897.8	1,563.8	금속기준	
	동	5.9	44.9	50.8	금속기준	천톤
	연	195.8	231.0	426.8	금속기준	
	철	0.06	0.12	0.18	Fe	억톤
	중석	2.9	4.8	7.7	WO3	
	몰리브덴	7.2	11.6	18.8	MoS2	천톤
	망간	-	70.6	70.6	Mn	
비금속	인상흑연	104.0	2,491.5	2,595.5	-	천톤
	석회석	14.6	112.4	127.0	-	
	고령토	1,274.3	112,079.4	113,353.7	-	천톤
	활석	1,947.9	6,173.3	8,121.2	-	
	형석	53.0	424.0	477.0	-	
	중정석	611.1	231.0	842.1	-	
석탄	전체 탄종	1.9	11.4	13.3	-	억톤

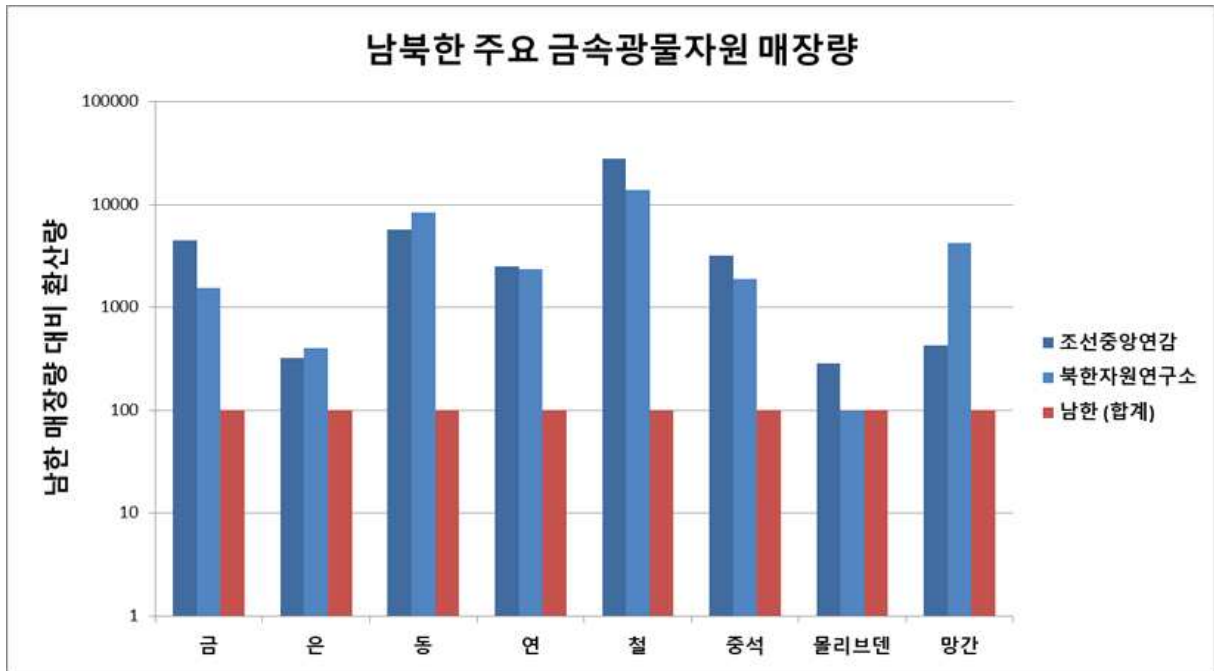


그림 2.1. 남북한 주요 금속 광물자원 매장량 비교

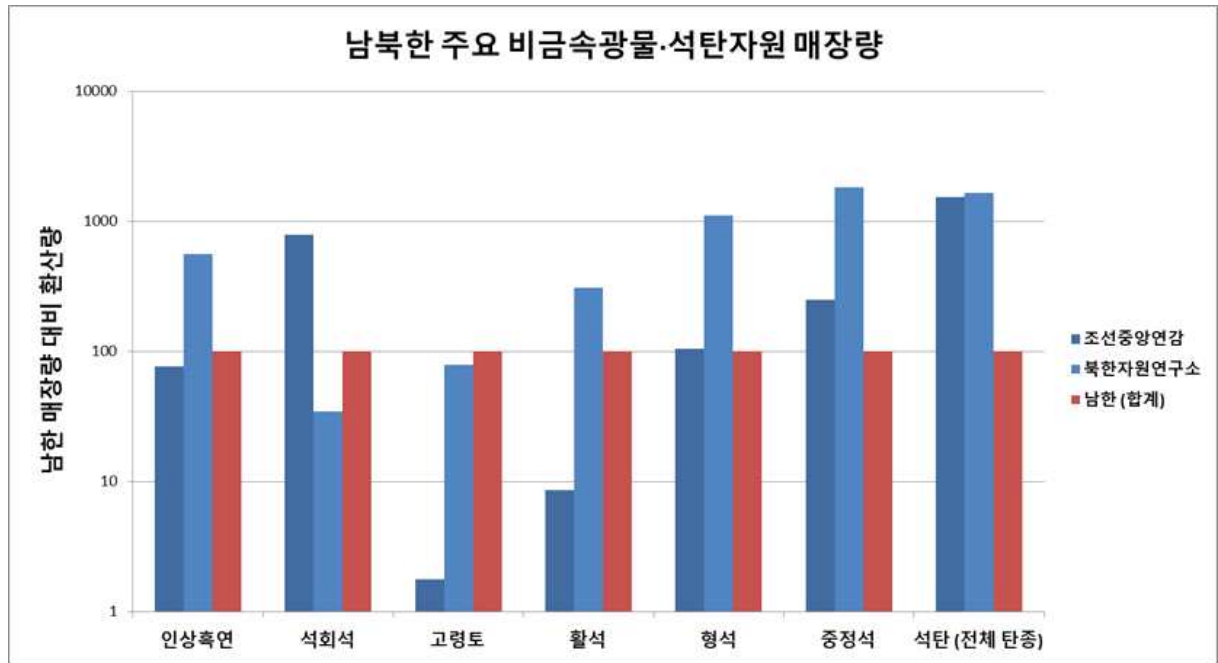


그림 2.2. 남북한 주요 비금속·석탄 광물자원 매장량 비교

2.2 북한 광업 경제규모 및 최근 동향

1990년대 이후 우호적 사회주의 국가들의 몰락과 핵실험 강행으로 인한 외교적 고립, 고난의 행군으로 대표되는 장기간의 경제난으로 인한 사회간접자본 붕괴와 이에 따른 고부가가치 산업 육성의 실패로 인해 북한의 경제 상황은 지속적으로 악화되고 있다(석근우, 2016). 이와 같은 북한의 경제적 위기상황 하에서, 풍부한 매장량을 활용한 광물자원의 개발 및 수출은 북한의 경제활동 및 외화수급을 위한 주요한 원동력이 되어왔다. 표 2.4와 같이 북한의 광업 경제규모는 2017년 기준 4조 2,660억 원으로, 남한의 2조 2,260억 원에 비해 약 2배의 경제규모를 가지고 있다. 특히 약 50배 이상 차이가 존재하는 남북한의 총 경제규모를 고려할 때, 2014 ~ 2017년 기간 북한의 총 경제규모 대비 광업 비율은 약 14% 수준으로, 남한 광업이 약 0.16% 비율을 가지는 것을 고려할 때 상대적으로 매우 높은 경제적 비중을 가진다고 볼 수 있다. 또한 북한의 대외 수출규모 측면에서 볼 경우, 표 2.5와 같이 북한의 광산물 수출액은 북한 전체 수출액 대비 2016년 55.26%, 2017년 39.10%로 북한 총 수출액의 절반가량을 차지하는 주요한 외화 수급원이다. 하지만 북한 광산물 수출액의 대부분은 광물성연료, 즉 무연탄 원광을 중국으로 수출하는 것으로 이는 무연탄은 기초적인 채광기술과 인력만을 활용하여 채취 가능함과 동시에 금속광물과는 달리 추가적인 제련, 정련과정이 필요하지 않기 때문이다. 이와 같은 북한의 무연탄 위주의 수출 현황은 북한의 열악한 전력 및 인프라 상태, 그리고 광산 현장의 낙후된 장비 및 기술력 수준을 반증한다고 볼 수 있다(Chung, 2019).

표 2.4. 남북한 광업 경제규모 및 총 경제규모 대비 광업 비율 (통계청, 2019)

기준년도	북한 경제규모 (10억 원)			남한 경제규모 (10억 원)		
	광업	총 경제	비율 (%)	광업	총 경제	비율 (%)
2014	4,537	31,161	14.56	2,344	1,426,972	0.16
2015	4,418	30,805	14.34	2,315	1,466,788	0.16
2016	4,790	31,997	14.97	2,357	1,509,755	0.16
2017	4,266	30,882	13.81	2,262	1,555,995	0.15

표 2.5. 북한 2016, 2017년 전체 수출액 대비 광산물 수출액 비중 (통계청, 2019)

품목	기준년도			
	2016		2017	
	수출액 (천 \$)	수출액 비중 (%)	수출액 (천 \$)	수출액 비중 (%)
전체 수출액	2,820,914	-	1,771,852	-
광산물 종합	1,558,635	55.26	692,996	39.10
광, 슬랙 및 회	225,351	7.99	187,719	10.59
광물성연료, 광물유	1,193,187	42.30	413,601	23.34
철, 동, 아연 등 금속류 및 그 제품	140,097	4.97	91,676	5.17

규모 및 수출액 비중으로 볼 때 광업은 북한의 경제 상황과 밀접하게 관련된 주요 산업 분야로 간주할 수 있으며, 북한의 중앙집권적인 계획경제 체제를 고려할 때 광업과 같은 주요한 산업 분야의 동향 및 방향성은 북한 정권의 정책적 기조에 크게 영향을 받을 수 있다. 북한의 정책적 기조에 따른 광업 동향의 변동은 그림 2.3에 제시된 1990 ~ 2018년 기간의 북한 광업 분야 경제규모를 통해 추정할 수 있다. 북한의 광업 경제규모는 1990년 약 5조 7,320억 원에 도달한 후 고난의 행군 시기 급격하게 감소하였으며, 1998년 최저치에 도달한 이후 2010년 중반까지 회복세를 보였다. 하지만 2016년 이후 북한의 광업 경제규모는 다시 급격히 감소하여, 2018년 기준 약 3조 5,067억 원의 경제규모로 분석되고 있다. 이와 같은 광업 경제규모의 급격한 변동은 북한 광산 생산 및 채광 설비의 노후화, 광맥의 심부화 및 소형화로 인한 광업조건의 악화와 함께, 2011년 김정일 사후 집권한 김정은 정권의 과학기술정책 노선 변경을 그 원인으로 분석하고 있다. 김정은 정권은 기존 선군정치를 통한 강성국가 건설노선과는 달리 과학기술의 정보화·자동화·첨단화를 목표로 연구개발체계를 개편하거나 과학기술자 우대정책을 수행하는 등 ‘과학기술에 의한 지식경제 육성’을 새로운 국가노선으로 역설하고 있으며(변상정, 2011; 이춘근, 김중선, 2015; 이춘근 외, 2015), 북한의 광업 분야 역시 기존의 경험론적 방법론에 입각한 광산 개발 및 설계가 아닌 다양한 수치해석 기법, 자동화 설계 소프트웨어를 활용한 정량적인 접근이 관측되고 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 이와 같은 북한 광업 분야 및 광산 조건의 변동을 다양한 연구자료 및 위성영상자료 등을 통해 분석하여, 보다 효율적인 북한 주요광산의 개발 전략 수립을 위한 방안을 모색하고자 하였다.

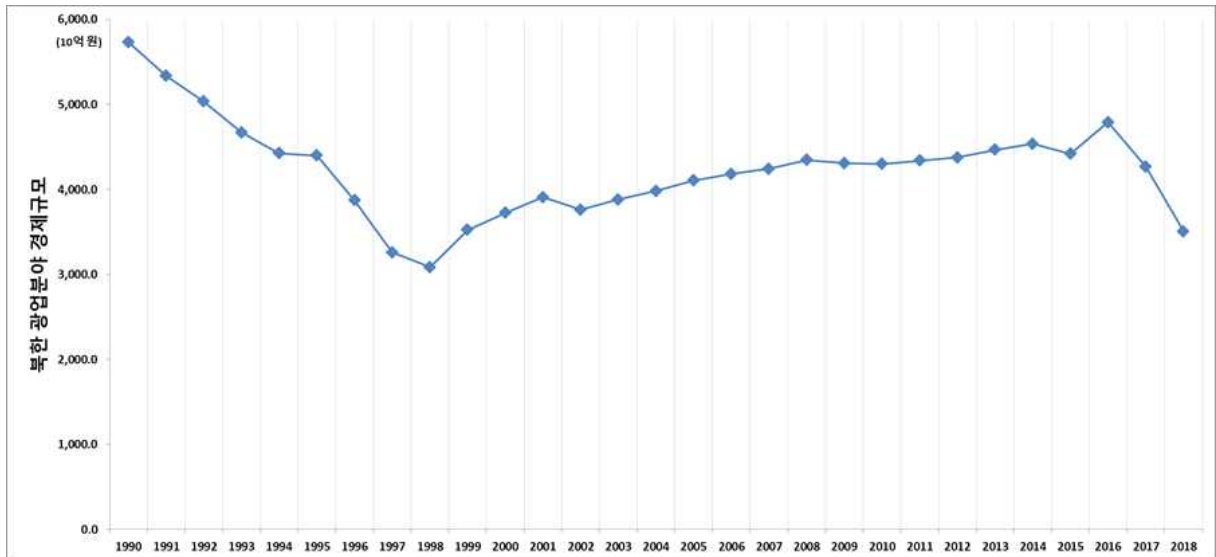


그림 2.3. 북한 광업 분야 경제규모 (1990-2018) (통계청 북한통계)

3. 북한의 광업 연구동향 분석

북한의 최근 광업 연구 동향을 직접적으로 분석하기 위해서는 북한 주요광산 및 광업 연구소와 같은 일선 현장에 대한 현지조사가 필요하나, 이는 제한적인 정보만을 공개하고 있는 북한 체제의 실정과 현재 경색된 남북관계상 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 최근 10여 년 간 출판된 북한 광업 학술지에 수록된 연구논문에 대한 문헌 조사를 수행하여, 북한의 주요 광업 대학·광업 연구소·광산에서 수행되고 발표된 연구 결과에 대한 데이터베이스를 작성하고 시대별 연구 동향 및 최신 연구 경향성을 분석하였다.

3.1 문헌 조사 대상 학술지 선정

신뢰성 있는 자료에 대한 접근이 어려운 북한 관련 연구의 특징을 고려하여, 본 연구에서는 상대적으로 접근 및 열람이 자유로운 국립중앙도서관 소재 통일부 북한자료센터에 소장된 북한 문헌 자료 중 광업 분야 학술지 3종 - ‘채굴공학’, ‘지질 및 지리과학’, ‘기술혁신’ - 을 문헌 조사 대상으로 선정하였다(그림 3.1).

‘채굴공학’은 과학백과사전출판사(구 과학기술출판사)에서 연 4회 발행하는 광업 전문 학술지로, 1965년 8월 창간 이후 2019년 9월 기준 누계 225권 발행되었다. 채굴공학은 광물자원의 채굴과 관련된 다양한 주제의 연구논문들을 수록하고 있으며, 광물자원 채굴 공법, 장비의 개발 및 개선 외에도 발파 및 타격파쇄, 지하광산 내 환기 및 배수, 광산물 운송, 노천 및 지하광산의 채광장 안정성, 암석시험법 및 수치해석기법 등 광업 및 암반 공학 분야 전반의 연구논문을 매 권 약 15 ~ 20편 수록하고 있다. ‘지질 및 지리과학’은 과학백과사전출판사에서 연 4회 발행하는 지질학 및 지리학 분야 학술지로, 1960년 8월 창간 이후 2019년 9월 기준 누계 275권 발행되었다. 지질 및 지리과학의 주요 수록 연구논문은 원격탐사 및 위성화상 자료를 활용한 지리분석, 암반 및 광체의 지질학적 특성 및 물리화학적 성인 분석, 암반 구성물질의 화학적 조성 분석 등이며, 이 중 광업 관련 연구논문의 경우 시추 및 원격탐사를 통한 광체의 부존특성 분석, 광체 탐사기법 및 탐사장비 개선, 탐사자료를 활용한 광체의 3차원 모형화 등 지하 광체의 탐사와 관련된 경우가 대부분이다. ‘기술혁신’은 중앙과학기술통보사에서 연 12회 발행하는 혁신기술

관련 학술지로, 1955년 10월 창간 이후 2019년 기준 누계 734권 발행되었다. 기술혁신은 이론적, 학문적 연구보다는 즉각적인 산업현장 적용이 가능한 신공법 개발, 장비 개선 등 현장 중심의 혁신기술 관련 연구논문을 수록하고 있다(이춘근 외, 2015). 기술혁신은 북한 내 산업분야 전반의 혁신연구를 농업·수산·화학·기계·금속·전기·건설·경공업·수송·보건 등 각 산업분야 별 소분류를 나누어 다루고 있으며, 광업 관련 연구의 경우 기술혁신 내 ‘채취’ 소분류로 나누어 매 권 약 5 ~ 7편 수록하고 있다.



(a) 채굴공학 (b) 지질 및 지리과학 (c) 기술혁신

그림 3.1. 북한 주요 광업 학술지 (통일부 북한자료센터)

본 연구에서는 북한의 최근 10년간의 광업 연구 동향을 분석하기 위해 2008 ~ 2017년 기간 동안 출판된 채굴공학, 지질 및 지리과학, 기술혁신 학술지 200권에 수록된 광업 관련 연구논문을 대상으로 하여 서지정보, 저자 및 소속, 연구요약문 및 결론 등에 대한 기초 문헌 조사를 수행하여 기초정보 데이터베이스를 작성하였다. 작성한 기초정보 데이터베이스를 활용하여 문헌 조사를 수행한 연구논문의 세부 연구 분야를 분류하고 각 세부 연구 분야별 주요 연구논문을 선정하였으며, 선정된 주요 연구논문 89편에 대해 구체적인 연구 목표 및 방법론, 활용한 기반 이론 및 수치해석 기법, 정량적인 연구 성과 등을 조사하여 세부정보 데이터베이스를 작성하였다. 그리고 작성한 기초정보 및 세부정보 데이터베이스를 활용하여, 북한의 시대별 광업 분야 연구 동향 및 최신 광업 연구현황을 분석하였다.

3.2 기초 문헌 조사 및 기초정보 데이터베이스 작성

2008 ~ 2017년 기간 동안 출판된 채굴공학, 지질 및 지리과학, 기술혁신 학술지 수록 광업 관련 연구논문을 대상으로 문헌 조사를 수행하였다. 채굴공학 324편, 지질 및 지리과학 140편, 기술혁신 330편으로 총 794편의 광업 연구논문의 수록 학술지명 및 게재 시기, 논문명, 저자 및 소속, 실마리어(핵심어), 연구요약문, 연구 결과를 조사하여 최근 10년간 북한 광업 연구논문의 기초자료 데이터베이스를 작성하였다. 표 3.1에 작성한 기초자료 데이터베이스 예시를 나타내었다.

표 3.1. 북한 광업 학술지 연구논문 기초자료 데이터베이스 예시 (기술혁신 2016년 1호)

권호수	제목	저자(소속)	실마리어	연구요약문	연구결과
주체105-1 (2016년 1호)	기선벤토르해석에 의한 국부기준점위치결정방법	진학운 (평성석탄공업대학) 한철훈 (국가과학원 지구환경정보연구소)	GPS관측 기선망 국부기준점 벤토르해석	기선벤토르해석에 의한 국부기준점위치결정방법을 새롭게 받아들여 국부망의 자리표결정정확도를 종전에 비하여 훨씬 높일수 있게 하였다.	국부망의 자리표결정정확도는 종전의 삼각측량이나 절대위치결정에 의한 방법에서보다 각각 20, 70% 높다. 새로운 방법은 수신기조건과 지형조건에 구애 없이 국부기준망에서 기준점들을 비교적 높은 정확도로 결정할수있게 한다.
	유연탄무리층의 단주식 동시채굴방법	리혁철 (평성석탄공업대학)	유연탄무리층 단주식동시채굴	유연탄광들에서 무리층조건에 맞게 석탄을 과학적으로 채굴하기 위하여 탄층사이거리가 10-15m로서 비교적 짧은 무리층을 동시에 채굴하는 단주식 채굴방법을 적용하였다.	얇은층조건에서도 종전에 비하여 석탄생산량과 채취률을 1.5배로 높였으며 준비굴진량을 줄이고 국부선풍기와 풍문, 레우와 침목, 갱목 등의 자재를 절약하여 채굴비용을 훨씬 줄일수 있었다.
	전면고착식철근콘크리트 막대동발의 부착세기를 높이는 스크류식세멘트몰탈주입기	정학명, 김중석 (평성석탄공업대학)	전면고착식 철근콘크리트 막대동발 부착세기 세멘트몰탈주입기 스크류	스크류식세멘트몰탈주입기를 새롭게 받아들여 전면고착식철근콘크리트막대동발의 부착세기를 높일수 있게 하였다.	스크류식세멘트몰탈주입기는 몰탈을 압사하여 몰탈이 잘 다져지고 치밀하게 충전되도록 하며 전면고착식철근콘크리트막대동발의 부착세기를 높여 갱도의 안전성을 원만히 보장할수 있게 한다.
	갱도굴진에서 깊은 구멍의 3단기폭으로 굴진속도제고	박철남, 한철만 (김책공업종합대학)	3단기폭 갱도굴진 굴진속도 압축장악	갱도굴진에서 깊은 구멍의 3단기폭방법을 받아들여 순환당 굴진속도를 높였다.	이러한 발파방법을 평행식속배기에 도입하여 속배기발파효율을 95%이상 보장하고 순환당 굴진거리를 1.5-1.7m로 늘일수 있게 하였다.

작성한 기초자료 데이터베이스를 활용하여, 연구논문의 세부 연구 분야를 채광·발파·장비·지보·선광·암반·탐사 및 기타 주제로 분류하여 각 학술지 게재 연구논문의 연구 분야별 게재 경향을 분석하였다. 표 3.2에 각 세부 연구 분야별 주요 연구내용을 분류하였으며, 그림 3.2에 각 학술지 수록 연구논문 분류 결과를 나타내었다.

표 3.2. 세부 연구 분야별 주요 연구내용 정리

분류	세부 연구 분야별 주요 연구내용
채광	채광법 연구 및 개발, 채광계획 설계, 채광효율 개선 등 광물자원 채취 관련 연구
발파	발파공 및 장약패턴 설계, 지연발파 설계, 도폭선 회로 구성 등 발파설계 관련 연구 폭약 폭발력 및 효율 개선, 도폭선, 뇌관, 점화장비 등 발파장비 개선 관련 연구
장비	천공, 굴착, 시추장비 등 광물자원 채취와 직접적 관련된 광산장비의 개발 및 개선 연구 광산장비의 가동 효율 분석 및 최적 가동조건 분석 연구
지보	광산 내 갱도 안정성 분석 및 지보 설계 등 갱도유지 관련 연구
선광	채취한 광석의 선별 및 분류기법, 장비 등 선광작업 관련 연구
암반	실대시험 및 수치해석을 활용한 암반의 물성시험 및 거동분석 관련 연구 각종 암석시험법 및 시험장비 개발 등 암석시험 관련 연구
탐사	다양한 탐사기법을 활용한 지질특성 및 광체 부존특성 관련 연구 위성영상, 항공사진, 입체사진측량 등을 활용한 원격탐사 관련 연구
기타	기타 광업 관련 연구 (갱내 운송, 환기, 배수 등)

채굴공학 학술지의 경우 선광을 제외한 다양한 광업 연구 분야의 논문이 고르게 투고되는 경향성을 보였으며, 최근 출판된 학술지의 경우 암석시험 등에 수치해석기법을 적용한 암반 분야의 연구논문 투고가 증가하는 경향성을 보였다. 지질 및 지리과학의 경우 학술지 특성상 채광·발파 등 채굴 관련 연구논문의 비율이 낮았으며, 기존 주로 게재되었던 석탄광 및 금속광 탐사 연구논문 이외에도 2010년 중반 이후 희토류 탐사 연구가 활발하게 진행됨을 확인하였다. 기술혁신 학술지 수록 광업 연구논문의 경우 채굴공학 학술지와 유사한 투고 경향성을 보였으나, 학술지의 연구논문 수록 경향성 상 광체 탐사 및 암석시험 관련 연구논문의 게재 비중이 상대적으로 낮았으며, 대신 채광법, 발파기법,

장비 개선 등 광산 현장과 밀접하게 관련된 연구논문의 비중이 높게 분석되었다.

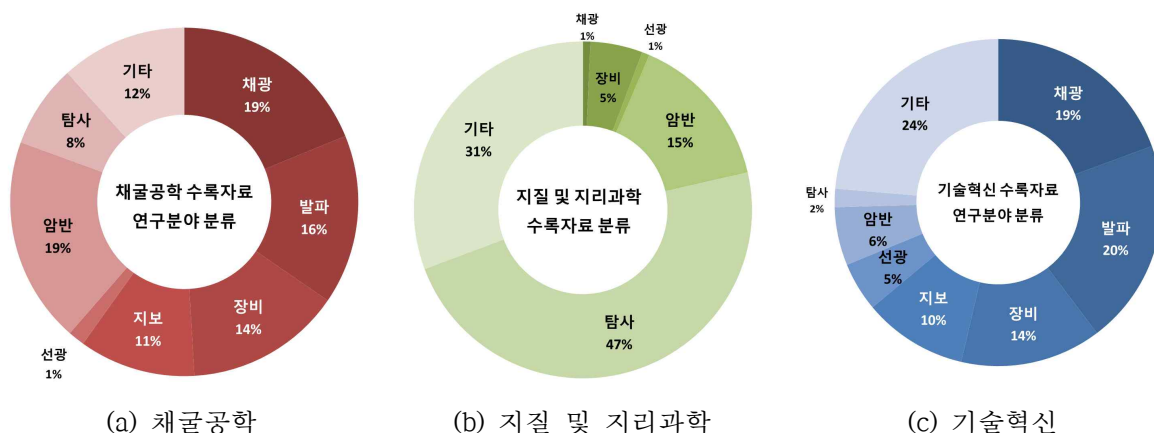


그림 3.1. 학술지별 수록 연구논문 세부 연구 분야 분류결과

3.3 세부정보 데이터베이스 작성 및 북한 광업 연구 동향 분석

작성한 북한 광업 연구논문 기초자료 데이터베이스 및 세부 연구 분야 분류결과를 활용하여, 조사 대상 연구논문 중 연구내용이 독창적이고 연구 결과가 우수하다고 판단되는 89편(채굴공학 38편, 지질 및 지리과학 21편, 기술혁신 32편)을 주요 연구논문으로 선정하였다. 주요 연구논문 목록은 표 3.3에 나타내었다.

선정한 주요 연구논문 89편에 대해 추가적인 세부 문헌 조사를 수행하여, 각 연구논문의 구체적인 연구 목표와 이론적 기반, 실험 장비 및 실험법, 수치해석 소프트웨어 및 적용 가정 등 자세한 연구 방법론, 비교분석 또는 객관적 수치를 통한 정량적인 연구 성과 등을 조사하여 북한 광업 연구논문 세부정보 데이터베이스를 작성하였다. 또한 작성한 데이터베이스를 활용하여 전체 광업 분야 및 각 세부 연구 분야별로 시대별 연구 발전 동향 및 최신 연구현황을 분석하여, 북한의 광업 조건 및 과학기술정책 변동에 따른 광업 분야 연구 동향의 거시적 경향성을 조사하였으며, 연구논문 수가 부족한 선광 및 기타 분류를 제외한 세부 연구 분야에서의 미시적 변화를 분석하였다.

거시적인 연구 동향 분석결과, 각 학술지별 투고 연구논문의 연구 분야 및 주제 측면에서 북한의 과학기술정책 노선 전환에 따른 변동 경향성이 관측되었다. 2000년대 및 2010년도 초반 투고논문의 경우 기존 가행중인 광산에서의 현장적용 사례에 기초한 경험적, 정성적인 채광법 개량 및 발파, 장비 개선 연구논문이 주로 수록되었으나, 2012년 김정은 정권 집권 이후 암반거동 분석 및 발파효율 분석 등에서 ABAQUS, COMSOL, FLAC3D 등의 수치해석 소프트웨어 또는 JKSImBlast 등의 발파패턴 설계 소프트웨어 등 수치해석기법 및 자동화 설계기법을 활용한 정량적 연구논문의 비중이 증가하였다. 또한 2010년 중반 이후 신규 광종, 광상에 대한 탐사 및 SURPAC 등을 활용한 정량적 3차원 광산설계 관련 연구논문이 다수 투자되는 경향성을 보였다. 이와 같은 북한 광업 연구논문의 투고 경향성 변동은 김정은 정권의 과학기술정책 개편에 따른 정보화·자동화·첨단화 추세를 반영함과 동시에 최근 북한 광업의 생산성 저하요소로 분석되고 있는 기존 광맥의 고갈 및 품위 저하, 신규 광산의 소형화 및 심부화, 생산 및 채광설비의 노후화 문제를 해결하기 위한 정량적·객관적인 광물자원 개발 전략 수립의 필요성이 대두되었기 때문으로 분석된다. 따라서 북한 광물자원 개발 사업을 위한 투자전략 수립 시, 광산 개발 및 경제성 평가 과정에서 북한의 광체탐사 및 광산 설계결과를 반영함과 동시에 현장정보의 제한으로 인한 불확실성을 북한 연구결과를 활용하여 보완할 수 있을 것으로 예상된다.

표 3.3. 북한 광업 학술지 주요 연구논문 목록

분류	채굴공학	지질 및 지리과학	기술혁신
채광	2008-2-리상점법에 의한 지하채광법 선택	2010-2-추공굴진속력에 대한 연구	2008-4-갱도련속배치식전면채탄법
	2009-3-비선형계획법에 의한 보통경사유연탄층의 채굴법선택요소 최량화		2010-8-보통경사탄층에서 한방향계단붕괴식 채탄법
	2013-1-조광의 풍위를 보장하기 위한 채굴분배량 고찰		2012-5-전면붕괴식채광법에 의한 잔주채굴
	2013-3-계층분석법과 유전알고리즘결합에 의한 굴진작업 결정		2016-3-광채의 채굴가능매장량평가방법
	2015-3-PFC3D에 의한 광석방출과정보의		2016-11-광산설계지원프로그램 Surpac에 의한 채굴장의 3차원설계방법
발파	2017-4-채광법의 3차원설계와 평가지표의 주관관적무게에 기초한 합리적인 채광법 선택		2017-7-지압을 고려한 막장전진속도결정방법
	2009-1-갱도굴진에서 합리적인 지체시간 고찰		2008-5-새로운 큰구멍지체발파방법
	2009-3-해석적방법에 의한 발파구멍사이 거리 해석		2009-3-깊은구멍천공에 의한 발파효율제고
	2013-3-온도-응력마당결합에 의한 발파구멍주위에서의 균열발달과정 고찰		2012-3-각식속빠기발파에서 합리적인 구멍경사각 결정
	2013-4-발파모의에 의한 대발파에서 구조물의 안정성 고찰		2013-6-분리장악, 분리층진에 의한 무연탄층붕괴 발파방법
장비	2015-3-품질공학적수법에 의한 갱도발파최량설계에 대한 연구		2017-1-심부추공발파의 균열분포특성
	2017-3-갱도굴진에서 컴퓨터를 이용한 발파구멍배치 고찰		2017-8-JKSimBlast를 이용한 지하채굴장전공발파설계방법
	2009-1-방향성추공관통기계 굴진시초방위안내부의 구조특성량 해석	2010-3-암석의 파괴세기와 추진현에 의한 시추암석과괴공구의 구조설계개선방법	2013-6-수자조종작업대차
	2009-2-천공속도변화에 주는 압축공기압력과 발파구멍깊이의 영향	2015-2-복합굴진할 때 추관주에 작용하는 점진응력계산방법	2014-5-전자석식타격기의 설계정수결정
	2010-3-무자원설계파라미터에 의한 유압작업기타격기의 설계정수 최량화	2015-3-갱내탄성파탐사용 3성분수진기의 제작과 그 특성	2017-12-타격파쇄기의 재료파쇄모형 결정
지보	2013-2-작업대차의 천공팔경위조종을 위한 천공순서 결정	2016-3-비저항영상화에 의한 갱내탐사에서 장지결수결정방법에 대한 연구	
	2017-2- 방향유도시추에서 추공막장공구조합의 역학분석		
	2008-1-후크-캠빈형등가압반모형에 의한 점탄성압반의 지압특성 고찰		2008-4-무연탄채굴갱도의 무보수유지방법
	2011-2-대형채광장의 파쇄대구간보강을 위한 세멘트용액의 주입요소 결정		2009-9-새로운 무연탄층속연층갱도의 시공 및 유지방법
	2012-1-채굴장불규칙간주의 안정성 해석		2010-11-깊은 추공의 긴 세멘트층진구간에서 2계단 세멘트층진공법
선광	2012-4-FLAC3D에 의한 무연탄환경사중박층 전반의 거동 해석		2014-5-수자광산설계지원체계와 수값모의체계의 결합에 의한 채굴막장의 안정성해석방법
	2015-2-유전산법과 인공신경망에 의한 갱도유지방법 해석		2015-8-급경사탄층조건에서 동발다리의 비대칭변위를 고려한 갱도동발시공방법
	2017-3-돌변리론과 수값해석을 결합한 채굴장간주의 안정성 평가		
	2008-4-자철정광의 예상품위 결정	2011-2-컴퓨터에 의한 금속광물감정지표의 정량화와 광물감정체계에 대한 연구	2008-12-기동식자진기에 의한 자철정광의 품위제고
	2016-1-ANSYS Workbench에 의한 대형롤분쇄기작업부의 합리적인 구조정수 결정		2010-2-광산퇴적미광에서 아연정광생산공정의 확립
암반	2008-2-채굴갱도주위암체의 파괴구역 예측	2008-4-〈σ-s〉돌출대와 그 주변에서 단층구조의 모형화와 응력마당분포에 대한 연구	2012-10-암반물성평가에서 암반의 요란정도를 고려한 GSI 결정방법
	2009-4-암석의 완전응력변형특성에 의한 암체의 세기 해석	2011-4-시추대상암석들에서 암석의 동적세기와 탄화적 성질들사이 호상관계	2014-8-갱도주위암체의 파괴구역예측프로그램개발
	2012-2-유한요소법에 의한 잔주응력상태 해석	2013-4-확률함수에 의한 〈σ〉지구의 구조응력상태에 대한 연구	2015-4-유한요소법에 의한 암반의 지움러마당모의방법
	2013-1-구조응력마당속에서 갱도의 합리적배치 고찰	2016-1-유한요소법에 의한 갱내비저항탐사법 수값모의연구	2015-4-돌변리론에 의한 기동간주의 안정성평가방법
	2015-1-모호중합법에 의한 채굴장주위에서의 암반평가방법	2016-2-유한요소법에 의한 지반의 극한세기계산	2017-1-무연탄광 환경사중박층조건에서 광폭채굴갱도에 작용하는 지압특성
탐사	2017-4-불연속암체에서 로친채굴장변두리의 안정성 분석	2017-2-암석의 이방성과 지층농입이 추공함에 주는 영향	
	2014-1-절리의 프라탈차원에 의한 갱도막장암체상태 고찰	2008-2-위성 및 지표조사자료에 기초한 〈σ〉지역 광채분포상태평가	2011-11-주향방향과 경사방향을 동시에 고려하여 탄층의 두께와 경사각을 결정
	2017-1-수자광산설계프로그램에 의한 로친채굴장설체의 3차원모형화	2009-2-〈σ〉광상의 합광구역예측을 위한 정량화된 탐사방법에 대한 연구	2012-7-Surpac에 의한 광산지형의 3차원시각화
		2010-3-합성유광민음모형에 의한 광채평가방법	
		2012-2-경수중지질자료에 기초한 복잡한 비층상광체의 3차원모형화방법	
기타		2014-1-블록모형에 기초한 광채3차원모형화방법	
		2016-2-갱도-갱도비저항탐사법의 수값모의에 대한 연구	
	2010-1-계층형모호중합평가법에 의한 채굴장의 재해위험도 평가	2008-2-GIS에 기초한 추공주상도작성체계의 설계와 실현	2009-3-보조락광정을 이용한 광석운반방법
	2013-1-추공굴진에서 추공경사의 지질학적원인 고찰	2012-1-〈σ〉지구 석탄탐사에서 분극촬영상화법의 신뢰성을 높이기 위한 연구	2011-10-갱내석탄운반방안선택방법
	2016-3-급경사탄층조건에서 채탄장의 가행가능성과 안정성 평가	2016-1-광채형성깊이결정방법에 대한 대비연구	2013-6-채탄원가에측방법

북한의 채광 분야 연구동향의 경우, 분석기간 초기 기존 채광기법의 개선 및 최적화에 주력하였던 연구 방향성에서 최근 3차원 해석기법을 활용한 광체 매장량 평가 및 채광장 설계 등의 정량적인 연구 수행 방향성이 관측되고 있다. 안영범, 조천일(2009), 오창환, 리원철(2010), 장관철, 장춘근(2012) 등은 기존 채광중인 광체의 채광법(한방향계단붕괴식채탄법, 전면붕괴식채광법)을 광산 조건에 맞게 최적화하여 채광장의 최적 높이, 갱도 간격, 갱도 길이를 결정하고 생산성 및 채취율을 증대시키는 연구를 수행하였으며, 홍근의, 리혁철(2016)은 복잡하고 불규칙적인 형상을 가지는 광체의 가채매장량 평가를 위해 3차원 광산 설계 소프트웨어 SURPAC을 활용한 크리깅(Kriging) 기법을 적용하여 광체의 3차원 블록모형을 작성하였다.

발파 분야 연구논문의 경우, 최지성, 김인봉(2015)은 수치해석 소프트웨어 LS-DYNA를 활용하여 n개의 발파공을 설치할 때 발파공 별 주응력 크기의 편차를 최소화하여 파쇄효율을 증대 및 파쇄입도 균일화 가능성을 분석하였다. 정진혁(2017)은 발파 설계 소프트웨어 JKSImBlast를 활용하여 발파공 배치 및 장약, 지체발파 시 기폭순서 및 지연시간 설계를 자동화하는 연구를 수행하였다. 특히 북한은 생산되는 폭약의 대부분이 군사용으로 활용되어 제한된 폭약을 효율적으로 활용하기 위한 발파효율 개선 연구가 활발하게 진행되었다.

채광 및 탐사장비의 개선을 위한 연구의 경우 분석기간 초기 기본적인 역학적 분석에 따른 이론적 접근법에서 최근에는 수치해석, 유전알고리즘 등을 적용한 다양한 해석적 방법이 도입되고 있다. 백기남(2013)은 4개의 천공팔을 가지는 천공장비의 최적 천공순서를 유전알고리즘을 활용해 분석하여 기존 천공방식에 비해 작업시간을 단축하였으며, 채명학, 심영택(2016)은 갱내 비저항 탐사장비의 탐사오차를 회귀식으로 정량화하여 비저항 탐사결과에 따른 광체의 3차원 영상화 정확도를 향상시켰다.

북한의 광산 안정성 관련 연구는 북한 광산의 심부화 및 소형화 경향에 맞추어, 보다 복잡한 구조의 대심도 광산에서 갱도의 안정성을 유지할 수 있도록 하는 광산 설계방안에 대한 연구가 주로 수행되고 있으며, 이를 위해 다양한 수치해석적 기법 또는 인공신경망을 활용하는 연구들이 최근 발표되고 있다. 박장혁, 변광남(2012)은 수치해석 소프트웨어 ABAQUS를 활용하여 채광장 잔주의 보강 필요성을 분석하였으며, 리태섭, 김은섭(2012)은 FLAC3D를 활용하여 무연탄 채굴 시 최적의 갱도 안정성을 확보할 수 있는 채탄갱도 굴착방식을 고찰하였다. 김은섭, 박대성(2015)은 광산 갱도의 유지보수 영향인자를 유전알고리즘을 활용해 분석한 뒤 이를 인공신경망을 통해 학습시켜 갱도유지를 위한 최적의 지보패턴 설계를 수행하였다.

탐사 분야 연구논문의 경우 시추 데이터 및 위성화상을 활용한 광체의 분포특성 추정 연구가 활발하게 진행되었으며, 2010년도 중반 이후 광산 현장 시추 데이터를 활용한 광체의 3차원 블록 모델링 및 이를 활용한 채광·탐사계획 수립과 관련된 연구가 증가하였다. 최승기, 강경석(2009)은 광체 분포지역을 0.2km 간격의 격자망 형태로 조사하여 해당 지역의 광체 부존특성을 정량화한 후 이를 탐사 대상지역에 적용하여 광체 탐사 정확도를 향상시켰다. 리성, 최명학, 전철만(2014)은 GIS 소프트웨어인 ArcView Avenue를 활용하여 채광중인 광체의 지질도에 따른 3차원 블록모델을 작성하고 이를 실제 광체 부존특성과 비교하였다.

북한에서 진행된 암반공학 분야의 연구는 주로 광업 생산성 향상을 목표로 수행되는 경우가 많았으며, 이를 위해 노천 및 지하광산의 채광효율 개선과 안정성 확보를 주요 연구주제로 하는 다양한 연구들이 발표되었다. 김경일, 리철진, 리룡길(2008)은 조사 대상 지역의 단층구조와 지압특성간의 정량적 관계를 분석하기 위해 대상 지역 암석시료의 실내시험을 통해 암반의 물성값을 계산하였으며, 이를 가상변위법에 따르는 유한요소해석을 진행한 결과 분석된 응력 집중구역과 단층 발달지역이 일치함을 확인하였다.. 김철룡

(2009)은 암석의 소성변형 시 발생하는 강도약화특성을 암석의 응력-변형률 특성을 활용하여 분석하였으며, 소성변형 시 암석의 강도약화를 단축압축 시 암석의 균열 발달로 인한 RMR지수 변동으로 해석하여 암석의 소성변형특성을 RMR지수 중 균열인자의 변동으로 정량화하여 표현하였다. 김영희, 리효원(2017)은 노천광산 경계부 암반의 안정성 분석을 위해 해당 암반의 불연속면 분포특성을 조사하였으며, 유전알고리즘 및 통계분석모형(RSM)을 활용해 불연속면의 방향 및 간격조건에 따른 해당 암반의 안정성을 확률적으로 분석하였다.

수치해석 기법을 활용한 암반공학 분야 연구 역시 북한의 많은 연구자들에 의해 수행되었으며, 다른 연구 분야에 비교할 때 김정은 체제 이전부터 수치해석적 방법론이 활발하게 사용되고 있음을 확인하였다. 리철영, 서원석(2008)은 유한요소 수치해석 소프트웨어인 COSMOS/M을 활용하여 광체 채광 시 발생하는 채광장 주변 암반의 응력변동을 계산하고 이에 따르는 파괴구역의 변동을 분석하였다. 김혁진, 최종수(2012)는 주방식 채광장 조건에서 잔주의 열 수와 잔주의 너비 및 높이, 갱도 폭 간의 비율에 따른 잔주의 응력상태를 해석하기 위해 수치해석 소프트웨어 ABAQUS 및 Z-Soil을 활용하였으며, 분석 결과 잔주의 응력상태를 오차수준 3% 이내로 분석하였다. 황룡현(2013)은 복잡한 지반조건에서 갱도의 배치와 지압조건에 따르는 갱도의 안정성 변동을 분석하기 위해, COMSOL 소프트웨어를 활용하여 수직응력과 최대·최소 수평응력의 비율 1:2:1 조건에서 갱도의 굴착방향에 따른 갱도 측벽 응력수준 및 파괴영역을 분석하였다. 김초향(2016)은 복잡한 암반의 강도특성을 분석하기 위해 암반 구성 암종의 영률, 포아송비, 마찰계수, 점착력, 내부마찰각 및 팽창각 조건에 따르는 암반의 강도를 ABAQUS를 활용해 2차원 및 3차원 조건에서 분석하였으며, 이를 일반적으로 사용되는 해석적 방법론과 비교하였다. 또한 암반의 팽창각 조건에 따른 암반 강도의 변동을 분석하였다.

4. GIS 데이터베이스 구축

북한 내 광산에 대한 정보는 접근 가능한 양이 적으며 한정적이다. 접근, 취득 가능한 정보는 출처별로 속성이 상이해 활용에 어려움이 있다. 예를 들어 북한지하자원넷을 통해 찾을 수 있는 광산 정보는 단순 이미지 및 텍스트 형태로 공간분석에 부적합하며 공간정보 형태인 USGS(미국지질조사국) 광산 정보는 세부 정보가 부재하며 위치정보의 정확도가 낮다. 각 정보원, 출처별 광산 정보의 특성과 형태는 표 4.1과 같다.

이렇게 분산되어 존재하는 정보를 수집하고 취합해 공간정보화하는 것은 정보 활용의 효율성과 공간분석을 위해 선행되어야 한다. 본 연구에선 북한 광산 GIS DB 구축을 위해 표 4.1에 명시된 6개 정보원에서 정보를 취득하여 적절한 가공을 거쳤다. DB 구축 순서도는 그림 4.1과 같다. 가장 중심이 된 정보는 북한지하자원넷 정보로 취득된 광종별 광산 이미지에 지오레퍼런싱을 통해 공간 속성을 부여하고 각 광산을 디지털화해 13개 광종에 대해 광산 425 개소 정보를 포인트 벡터 자료로 구축하였다. 그후 북한정보포털 자료에서 시군구 위치 정보를 갖는 광산들을 해당 시군구 중심에 포인트로 표기하고 북한지하자원넷 정보와 중복되는 정보를 삭제하였다. 노천광산의 경우 위성사진을 통한 정확한 위치 파악이 가능하므로 위치 정보를 갱신해 정확도를 높였다. 한국지질자원연구원 정보는 중복 정보였기에 사용되지 않았다. 외국 정보원인 USGS, Google Earth, Open Street Map 정보는 구축된 포인트 벡터자료의 보완에 활용되었다. 최종적으로 13개 광종에 대한 533개 광산 정보를 GIS 포인트 벡터 자료로 구축할 수 있었다.

표 4.1 정보원별 북한 광산 정보 특성

정보원	소속	내용	제공 데이터 형태	비고
북한지하자원넷	남북교류협력 지원협회	광산 위치 지도 및 광종, 생산량, 매장량	단순 이미지 및 텍스트	공간자료화 필요
북한정보포털	통일부	광산 광종, 품위, 매장량, 생산량, 위치	텍스트, 온라인 지도	온라인 지도 상 공간 정보 취득 불가, 한정된 세부 정보 제공
한반도광물자원 개발 DRM 융합 연구단	한국지질자원 연구원	광상위치, 품위, 매장량, 광물자원분포도	단순 이미지 및 텍스트	공간자료화 필요
Mineral Resources Online Spatial Data	USGS	광산명, 광종, 매장량, 위치, 가행 여부	공간 자료	위치정보의 정확도가 낮음
GoogleEarth Map	Google	광산 위치	공간 자료	세부 정보 부재
Open Street Map	오픈스트리트맵	광산 위치	공간 자료	세부 정보 부재

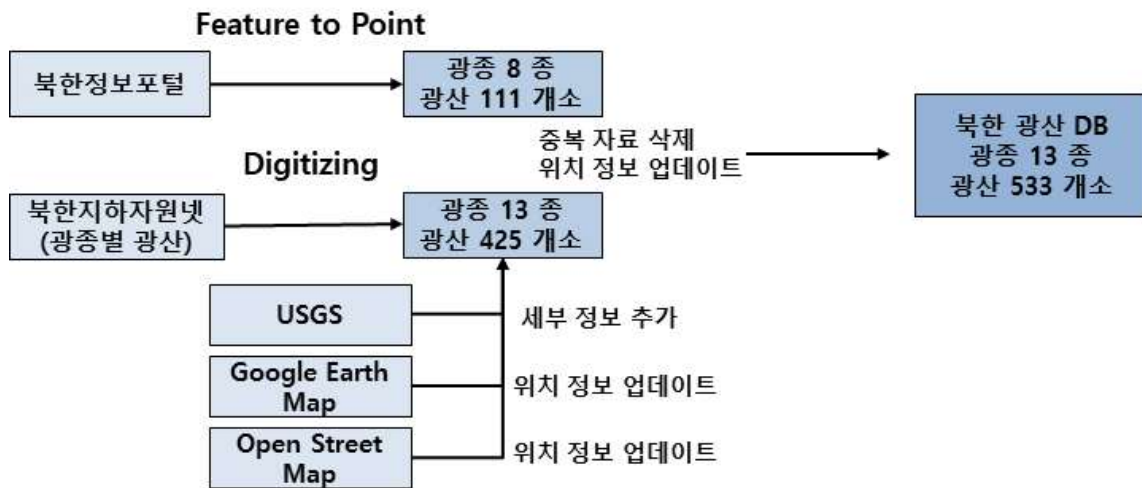


그림 4.1 북한 광산 GIS DB 구축 순서도

이를 북한 지도상에 가시화한 결과는 그림 4.2와 같다. 북한 전역에 고르게 수많은 광산이 분포하고 있음을 알 수 있으며 개중 석탄광이 가장 많은 수를 차지한다는 것을 쉽게 확인 가능하다. GIS엔 두 가지 정보 형태가 존재하며 래스터 자료와 벡터 자료가 바로 그것이다. 래스터 자료는 그리드 형태의 자료로 각 픽셀이 정수, 실수, 문자 등 한 가지 정보를 담을 수 있다. 연산이나 처리가 쉬운 반면 공간 정보의 왜곡이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 반면 벡터자료는 점, 선, 면으로 이뤄진 정보로 보다 정확하게 위치, 형태를

담을 수 있고 속성 정보와 연결되어 하나의 객체가 다양한 정보를 갖을 수 있다는 특징을 띤다. 그림 4.3은 광산 정보의 속성 테이블을 나타낸다. 각 광산이 객체로써 포인트 형태이며 속하는 도, 시군구, 명칭, 광종, 가행 여부, 정보원, 정확도, 매장량, 생산량 정보를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 위성영상을 통해 확인되어 정확한 위치 정보를 갖는 광산의 정확도는 1이며 북한지하자원넷 자료에서 디지털라이징을 통해 취득되어 수 km 이내 오차를 갖는 광산의 정확도는 2이다. 그 외는 시군구 수준 정확도로 3의 값을 갖는다.

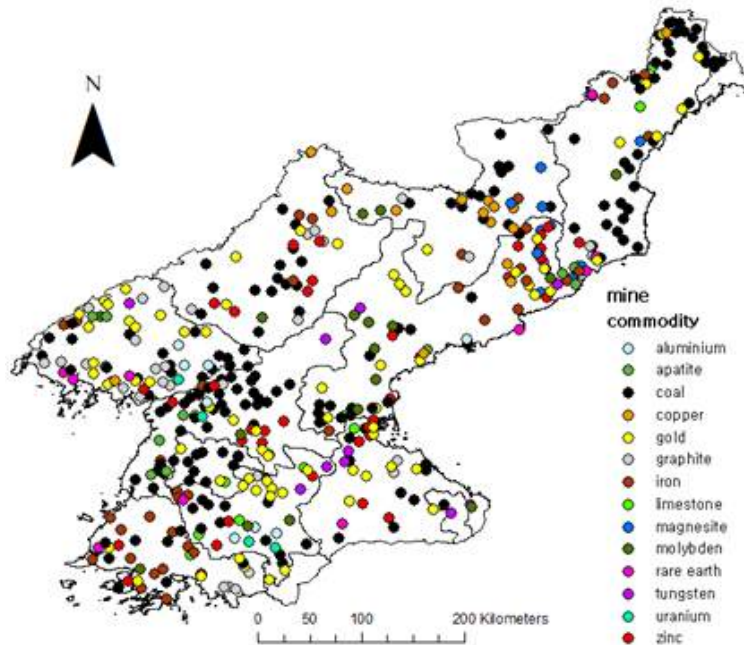


그림 4.2 북한 광산 GIS DB 구축 결과

OB	Shape *	province	city_county	name_english	name_korean	commodity	status	source	precision	reserves_	production
270	Point	Hamgyong	Sudong	Sibiwolsibyugil	12월16일탄광	coal	<Null>	북한지하자원	2	<Null>	<Null>
482	Point	Pyonganna	Sunchon	2.8 Jikdong	2.8직동탄광	coal	<Null>	openstreetmap	1	34000	<Null>
119	Point	Jagang	Junggang	Samworoil	3월5일정년광산	copper	<Null>	openstreetmap	1	300000	<Null>
39	Point	Pyonganna	Sunchon	Owolsail	5월4일광산	limestone	<Null>	북한정보포털	3	<Null>	<Null>
205	Point	Hamgyong	Undok	Yuwolsipsamil	6월13일탄광	coal	<Null>	북한지하자원	2	150000	<Null>
507	Point	Yanggang	Kapsan	Parwol	8월광산	copper	<Null>	북한지하자원	2	5408	<Null>
293	Point	Hwanghae	Singye	Gamuri	가무리광산	molybden	<Null>	북한지하자원	2	5408	<Null>
509	Point	Yanggang	Kapsan	Gapsan	갑산광산	copper	<Null>	openstreetmap	1	<Null>	<Null>
495	Point	Pyongyang	Kangdong	Gangdong	강동탄광	coal	<Null>	북한지하자원	2	40000	1000

그림 4.3 북한 광산 GIS DB 속성정보

5. 분석 대상 선정

북한 광산 GIS DB 구축 후 북한 주요 광산에 대한 분석들을 수행하기 위해 분석 대상 선정이 이뤄졌다. 다양한 광종과 지형, 위치의 광산 중 규모가 큰 노천 광산 위주로 대상을 선정하였고 선정된 광산의 목록은 표 5.1과 같다. 은물 광산은 황해남도 은물군에 위치한 철광산으로 해안 평야 지대에 존재한다. 매장량은 1억 톤으로 추산되고 있으며 2017년 갯 붕괴 사고로 사상자가 발생한 적이 있다(VOAKOREA, 2017). 무산 광산은 중국 접경지대에 위치하는 광산으로 북한 최대의 철광산이다. 매우 큰 규모의 노천 채광 방식으로 개발되었으나 2016년 수해로 큰 피해를 입었다(노컷뉴스, 2016). 또한, 전력난, 자연재해, 대북제재의 여파로 2018년 여름 가동이 중단된 전적이 있다. 중국과의 협력 개발로

철광석 생산을 정상화하려는 노력 중이다(데일리NK, 2018). 무산 광산은 고위도 상에 존재하며 주변 산맥이 험하고 높은 환경에 위치해 있다. 대홍 광산, 룡양 광산은 함경남도 단천시에 인접해 있는 광산으로 북한 최대 마그네사이트 광산들이다. 해당 광산은 과거 남북교류협력 사업의 일환으로 공동개발이 진행되었던 광산이며 2012년 폭우로 인해 산사태가 발생하고 시설물이 유실되는 등 큰 피해를 경험한 이력이 있다(연합뉴스, 노컷뉴스, 2012). 상농 광산은 단천시 인근 허천군에 위치한 금, 동 광산이다.

표 5.1 분석 대상 광산 (매장량, 생산량 정보 (한반도광물자원개발 DMR 융합연구단광산 DB))

위치		광산	광종	채광 방식	매장량	생산량	비고
황해남도	은률군	은률광산	철	노천	1억톤 (Fe48%)	연 160만톤	해안가인근위치 2017년 갯 붕괴 사 고로 6명 사망
함경북도	무산군	무산 광산	철	노천	15억 톤 (Fe25-35%) 1억톤 (Fe48%)	연 800만톤 (30%) 연 300만톤 (60%)	북한 최대 철광산 전력난, 자연재해로 인한 피해와 대북 제재 여파로 2018년 7월 가동 중단 소식
함경남도	단천시	대홍 광산	마그네사이트	노천	8억 8천만 톤 (MgO46.7%)	연 100만 톤	북한 최대 마그네사이트광산 2012년 8월 폭우로 큰 피해
		룡양 광산	마그네사이트	갱내 노천	7억 7천만 톤 (MgO45.8%)	연 100만톤	북한 최대 마그네사이트광산 2012년 8월 폭우로 큰 피해
	허천군	상농 광산	금, 동	갱내	금 200 톤 동 50만 톤 (금속 기준)	연 280만톤 (선광능력Au lgt, Cu 0.23%)	-

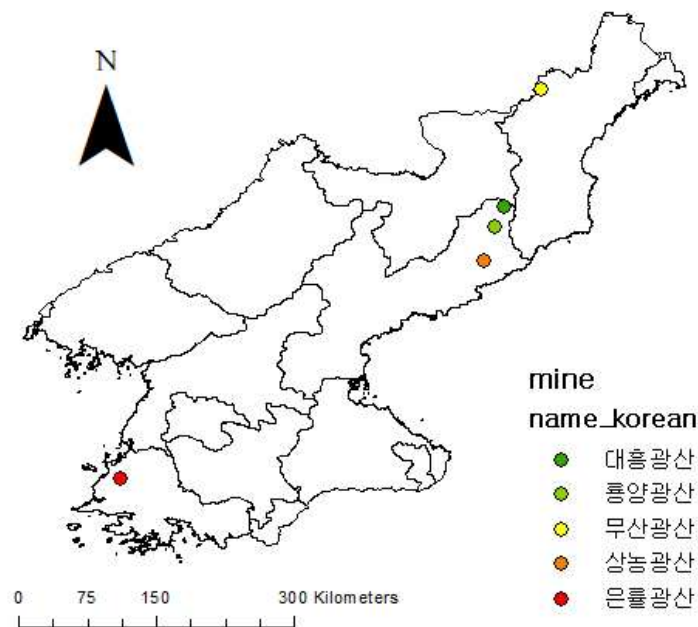


그림 5.1 북한 GIS 분석 대상 광산

분석 대상 광산의 북한 내 위치는 그림 5.1과 같다. 해안가와 고위도 산악 지역, 일반적

산림에 고르게 분포해 있다.

6. 산사태 위험도 평가

북한의 주요 5개 광산에 대한 재해 위험도 평가는 산사태 위험도 평가와 침수 위험도 평가로 구성되어 있다. 산사태 위험도 평가와 지도 작성 방법은 결정론적 방법, 휴리스틱 방법, 통계적 방법 등 다양한 방면에서 발달해왔다(Chen et al., 2017). 개중 빈도 비 분석법, 로지스틱 회귀를 비롯한 통계적 방법은 전 세계적으로 널리 사용되며 신뢰할 수 있는 결과를 제공한다고 알려져 있다(Tien Bui et al., 2011). 나아가 최근 십여 년 간은 인공지능 분야 기법인 기계학습이 자연과학 분야에 널리 적용되고 있으며 산사태 평가 분야 역시 그러하다(Kawabata, D., Bandibas, J., 2009). 기계학습에 속하는 인공신경망(ANN)은 입력 값과 결과 값을 통해 예측 값과 결과 값의 오차가 가장 작도록 학습되어 새로운 입력 값에 대해 분류, 예측을 수행해준다. 산사태 분야에서 인공신경망이 훈련 값들의 특성을 학습해 좋은 성능을 보인다는 것이 검증되었고 다양한 기법이 시도되고 있다.(Kawabata, D., Bandibas, J., 2009). 본 연구에서는 대상 광산 간의 상호 비교를 위해 제 3의 광산인 북한 혜산 구리 광산 정보를 활용해 훈련시킨 인공신경망을 통해 산사태 위험도를 평가하였다. 입력 값으로 산사태 위험도 분석에 많이 사용되는 주요 인자 5가지가 사용되었고 결과 값으로 산사태 인벤토리 맵이 사용되었다. 산사태 위험도 평가 순서는 그림 6.1과 같다. 우선 고해상도 위성영상을 통해 산사태 발생 정보를 파악해 혜산 광산 인근 산사태 인벤토리 맵을 구축하였다(그림 6.2). 그리고 DEM(수치고도모델, 고도 정보)에서 GIS 분석을 통해 해당 지역의 경사도, 경사 방향, 곡률 정보를 취득하였고, 수계 자료를 통해 수계로부터의 거리 정보를 구했다. 이 영향 인자를 최대최소 정규화를 통해 전처리하고 인공신경망 모델을 훈련 시켰다. 다양한 조합의 인공신경망을 시도해 가장 좋은 성능을 보인 노드 3개를 갖는 은닉층 1개로 이뤄진 모델을 최종모델로 선정하였으며 해당 모델의 퍼센트 에러는 0.7 %, AUC는 97 %로 준수한 성능을 보였다.

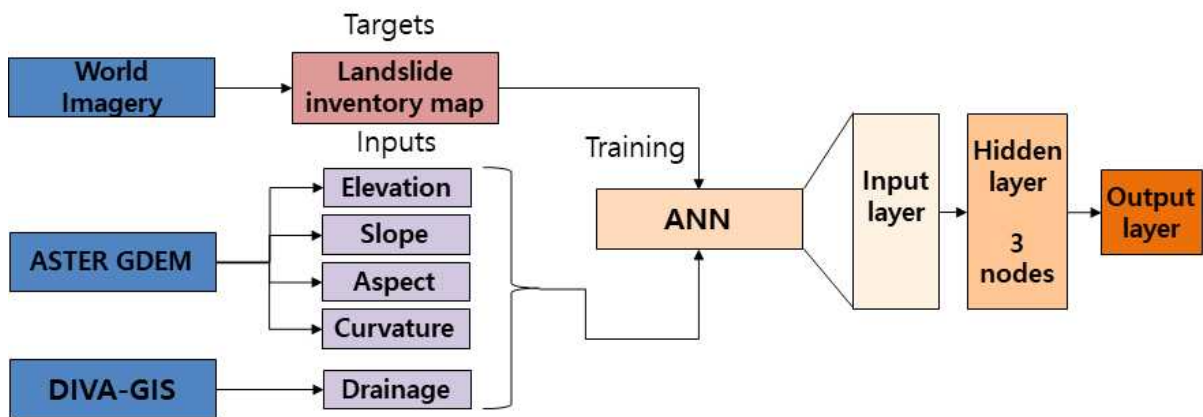


그림 6.1 산사태 위험도 평가 순서도

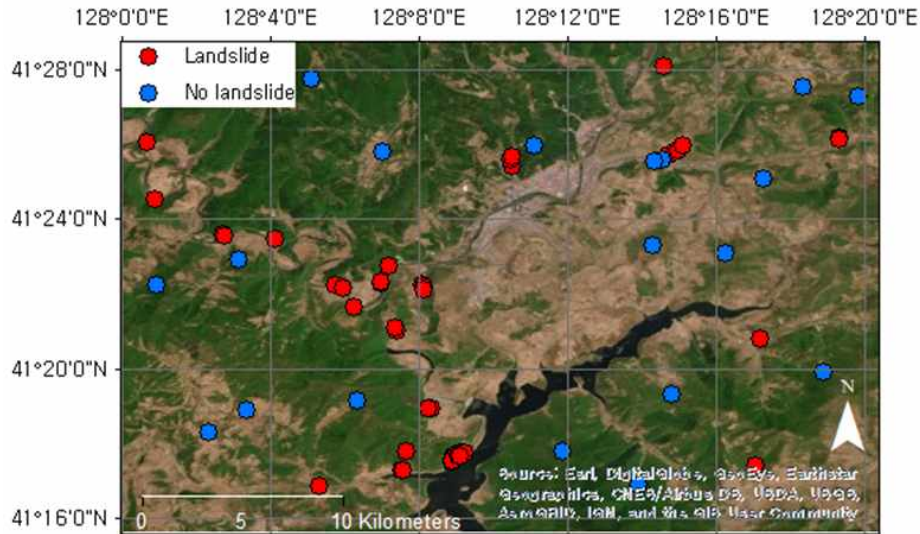


그림 6.2 혜산 광산 산사태 인벤토리 맵
(산사태: 85,500 m², 미발생: 156,600 m²)

구축된 인공신경망 모델에 각 광산들의 광산 중심 반경 3 km에 대해 5개 산사태 영향 인자를 입력한 결과 산사태 위험도를 얻을 수 있었으며 그 결과는 그림 6.3와 같다. 산사태 인덱스가 1에 가까울수록 산사태 발생위험도가 높다고 추정된다.

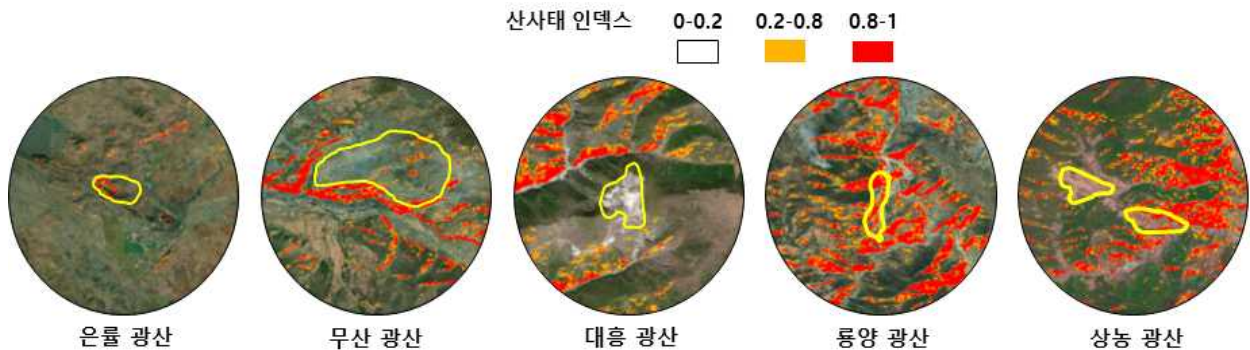


그림 6.3 산사태 위험도 평가 결과 (선-광산 형태)

보다 구체적으로 광산 반경 3 km 지역의 산사태 위험도 값을 살펴보자면 산사태 인덱스가 0.8-1인 위험면적은 룡양 광산에서 가장 크게 나타난다(표 6.1). 이는 룡양 광산 주변이 기복이 심해 경사도가 크고 인근에 수계가 발달되어 산사태에 취약하기 때문이라고 추정된다. 반면 위험 면적이 가장 작은 은률 광산은 평탄한 해안 평야지대에 위치해 있어 상대적으로 산사태 위험으로부터 안전하다고 분석된다. 은률 광산은 노천 채굴로 급한 경사를 보이는 광산 내 일부가 위험하다. 이 결과를 토대로 위험지대에 속한 도로, 광물 처리 인프라 시설에 대한 대책 마련이 필요하다.

표 6.1 산사태 위험도 평가 통계

광산	위험 면적 (km ²)	비율 (%)
은률	0.15	0.54
무산	1.91	6.77
대흥	1.47	5.20
룡양	4.28	15.13
상농	3.48	12.31

7. 홍수 위험지역 평가

한반도의 산사태 피해와 침수 피해는 강우가 집중되는 장마철에 많이 일어난다. 강우량과 직접적으로 연관이 있는 홍수뿐만 아니라 산사태 역시 비가 유발 요인으로 작용하기 때문이다. 침수는 광산 주변 시설의 정상가동에 장애가 될 뿐만 아니라 도로, 전력선 등을 파괴할 수 있고 나아가 일반적으로 광산 주변에 적치되는 광미 유실을 야기해 환경적 오염을 일으킨다. 따라서 광산과 관련해 침수에 대한 평가가 중요하고 고려되어야 한다. 본 연구에서 홍수로 인한 침수 위험지역에 대한 평가는 DEM을 활용해 지표에 고르게 비가 내렸을 때 표면을 따라 모이는 비의 양을 분석하는 누적 흐름량이 1,000 이상인 지역 주변 100 m와 수계에서 수위가 15 m 상승 시 침수되는 지역을 합해 추정하였다. 평가 순서도는 그림 7.1과 같다.

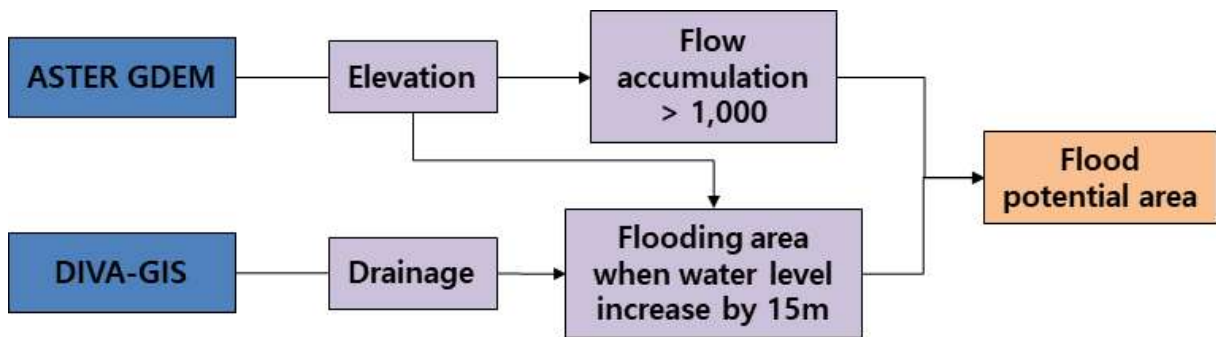


그림 7.1 침수 위험도 평가 순서도

각 광산 별 침수 위험 지역은 그림 7.2와 같으며 수계의 영향이 지대함을 알 수 있다. 평탄한 지역이 재해 위험을 낮추는 이점으로 작용한 산사태의 경우와 대조적으로 은률광산은 수위 상승에 매우 취약하다(표 7.1). 이러한 경우는 빗물이 분수령을 따라 배수되기 쉽지 않으므로 광산 내에 적절한 배수 설비를 갖추는 것이 중요하다. 그 외 수계가 가까이 발달해 있을수록 침수 위험이 크다. 무산 광산과 상농 광산은 광산 남쪽에 동서 방향 강이 흐르고 있으며 룡양광산은 광산 동쪽에 남북 방향 강이 흐르고 있다. 수계를 따라 도로가 건설되어 있고 각종 설비가 존재하기 때문에 충분한 유의가 필요하다.

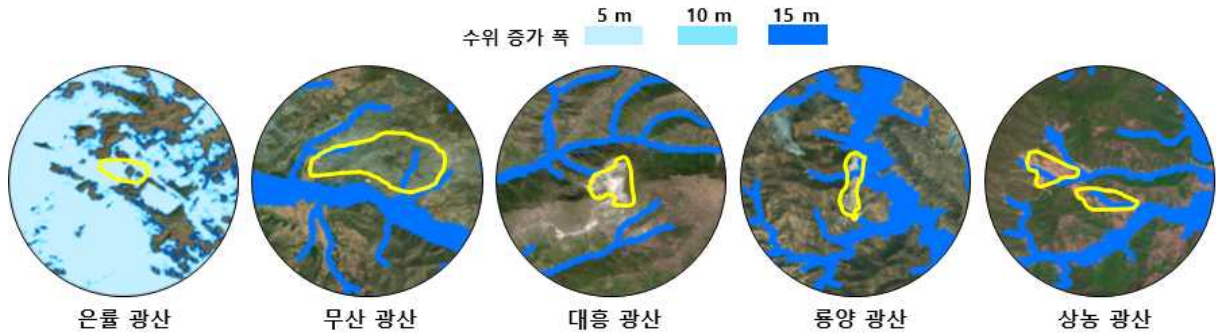


그림 7.2 침수 위험도 평가 결과 (선-광산 형태)

표 7.1 침수 위험도 평가 통계

광산	침수 면적 (km ²)	비율 (%)
은를	23.03	81.46
무산	6.11	21.61
대홍	4.11	14.53
통양	8.29	29.34
상농	5.89	20.83

8. 태양광 일사량 잠재량 평가

북한 광산 정상 운영의 주된 장애 요인 중 하나는 전력 공급 문제이다. 2017년 기준 북한의 발전설비 용량은 7,721 MW 규모로 화력 38%, 수력 62 %로 구성되어 있다(전력통계 정보시스템). 이는 남한의 7 % 수준이다. 편중적 전력원 구성은 북한의 불안정한 전력 공급상황에 일조하고 있다. 더욱이 시설 노후화 문제로 설비 이용률이 남한의 61 % 수준인 35.6 % 정도에 그쳐 전력 부족 문제를 심화시키고 있다. 북한의 송전 전압은 남한의 1/3 수준으로 장거리 송전에도 취약한 특징을 보인다(윤재영, 2019). 북한 광산 정상가동을 위해선 안정적 전력 공급이 매우 중요하며, 이를 해결할 수 있는 대안으로 신재생 에너지의 보급이 있다. 신재생에너지는 전통적 전력 생산과 다르게 분산형 전력망에 적합하며 적정히 설계되어 보급될 경우 큰 발전소를 건설하는 것 보다 시간적, 공간적으로 효율적일 수 있다. 태양광 에너지는 신재생 에너지 중 가장 주목 받는 에너지로써 풍력, 지열 같은 신재생 에너지에 비해 입지 조건이 상대적으로 까다롭지 않다. 하지만 광산에 전력 공급을 위한 태양광 발전 설비를 계획한다면 해당 지역의 태양광 에너지 잠재성 평가가 선행되어야 함은 당연하다. 본 연구에선 선행된 재해 위험도 분석 결과를 통해 위험지역을 배제하고 북한 지역의 일사량 잠재량을 평가할 것이다. 북한 지역의 일사량 정보는 북한 내부에서 측정된 데이터가 없으며 외부 추정 자료만이 존재한다.

본 연구에서는 태양의 위치 관련 인자 두 가지(Zenith angle, Hour angle)와 천리안 기상 위성과 남한의 일사량 정보를 통해 인공신경망을 훈련시키고 북한의 일사량 정보를 추정하여 광산 인근 수평면 전일사량(GHI) 잠재성 평가에 활용하였다(그림 8.1). 일사량 측정이 불충분한 상황에서 위성영상은 한반도 일사량 추정에 유용하게 활용될 수 있다(Koo et al. 2020). 인공신경망 모델의 구조는 각각 30개의 노드를 갖는 은닉층 두 개로 이뤄져 있으며 훈련 결과 rRMSE는 약 13 %, rMBE는 약 0.08 % (rRMSE: relative Root Mean Square Error, rMBE: relative Mean Bias Error)의 성능을 보였다.

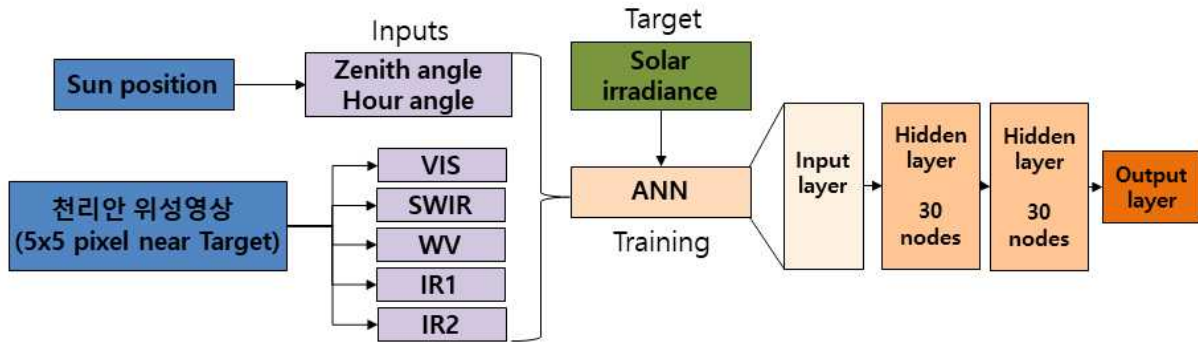


그림 8.1 태양광 일사량 잠재량 평가 순서도

각 광산 반경 내 3 km 지역에 대해 위험지역을 제외하고 가시화한 결과는 그림 8.2와 같다. 일간 일사량이 3,500 Wh/m² 이상일 때 태양광 에너지의 잠재성이 높다고 할 수 있다. 분석 결과 은률광산은 평탄 지역에 위도가 낮아 일사량 잠재성이 큰 지역이 넓게 분포하고 있다. 반면 산간 지역은 전반적으로 낮은 일사량 값을 보이고 있으며 무산 광산과 대흥 광산의 경우 일사량이 3,500 Wh/m² 이상인 영역이 존재하지 않는다(표 8.1)

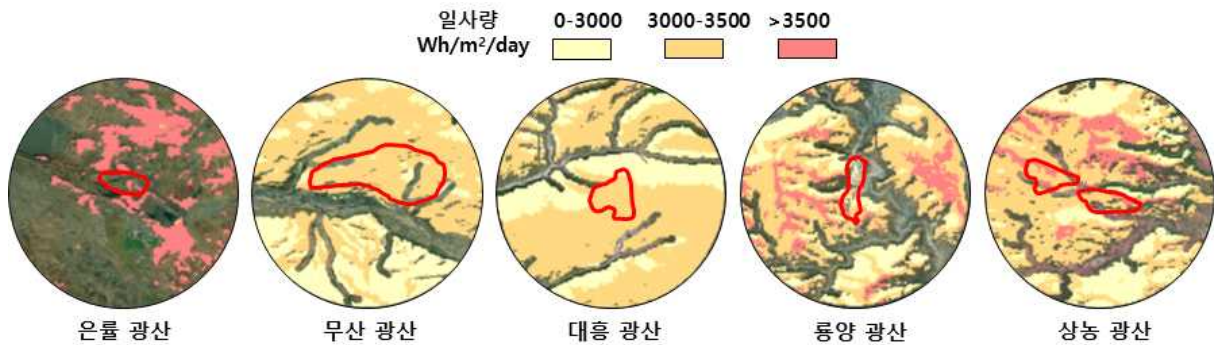


그림 8.2 태양광 일사량 잠재량 평가 위험지역 제외 결과 (선-광산 형태)

표 8.1 태양광 일사량 잠재량 평가 위험지역 제외 통계

광산	면적 (km ²)				평균 일사량 (Wh/m ² /day)
	>3500	3500-3000	3000-0	면적 합	
은률	5.19	0.02	0	5.22	3782
무산	0	21.09	2.62	23.71	2850
대흥	0	16.66	6.45	23.11	3066
룡양	3.00	9.89	4.37	17.27	3154
상농	2.71	11.50	5.52	19.74	3116

실제 발전량 추정을 위해선 태양광 패널의 각도에 따른 분석을 위해 법선면 직달일사량(DNI) 혹은 수평면 산란일사량(DHI) 정보가 추가적으로 필요하며 지표 경사도, 경사 방향, 그림자를 만들 수 있는 주변 환경에 대한 고려가 추가적으로 필요하다.

9. 광산 연계 교통 인프라 분석

9.1 필요성 및 북한 교통 인프라 현황

북한의 열악한 광산 개발 환경에 대해 접근하기 위해선 광산 자체뿐만 아니라 광산 관련 인프라의 현황을 파악하고 분석할 필요가 있다. 교통 인프라는 광산 개발 및 광산 생산물의 자원처리, 제련 과정과 수출입 문제에 직결되기 때문에 추후 남북 교류 확대를 위한 북한 광산에 대한 투자가 가능해지고 협력·개발이 재개될 경우 원활한 광산 운영을 위해 전제되어야 할 요소이다. 북한의 도로, 철도, 항만 등 교통 인프라는 공간적으로, 종류에 따라 편중되어 발전되어 효율성이 떨어지며 질적으로 낙후되어 있다(한국정책금융공사, 2010). 더욱이 1990년대 이후 경제난이 심화함에 따라 신규 개발이 둔화하고 기존 시설 유지·보수 면에서도 문제를 겪고 있다고 알려져 있다. 이러한 문제는 북한 내부 체제적 폐쇄성으로 인한 원유난, 산업 낙후, 대외교류 부족과 밀접히 연관되어 있으므로 문제 해결을 위해선 외부의 투자 협력이 절실한 상황이다. 우리나라의 입장에서도 북한의 교통 인프라 문제는 통일 과도기적 시점에선 북한과의 협력·개발의 주요 대상일 뿐만 아니라 차후 북한을 지나 유라시아 국가들과 연결되기 위한 교통망 체계의 일부로서 중대한 의의가 있다.

북한의 교통 인프라 현황을 보다 면밀하게 살펴보기 위해선 도로, 철도, 항만 세 요소에 대한 분석이 필요하다. 우선 북한 내 도로는 2009년 기준 연장 길이 측면에서 남한의 1/4 수준이며 대부분이 비포장도로로써 질적으로도 낙후되어 있다. 또한, 지형적, 정치적, 산업적 이유로 단거리 수송 위주로 건설되어 있다(한국정책금융공사, 2010). 육상수송 중 도로가 차지하는 비중은 12%에 불과하다(KDB산업은행, 2015). 북한에서 철도는 장거리 화물수송과 여객수송 대부분의 비중을 차지하는 가장 중요한 교통 인프라이다. 육상수송 중 86%가 철도를 통해 이뤄지지만 북한 내 철도 중 98%가 단선, 70% 이상이 시설 노후화 문제를 겪고 있다고 알려져 있다. 국제적 연결성을 살펴보면 중국 세 지역, 러시아 한 지역, 남한 지역 두 지역(경의선(문산-개성), 동해선(고성-온정리))과 연결되어 있다. 여러 문제에도 불구하고 철도는 북한 내 장거리 화물수송의 주요 요소이며 국제적 연결성을 유지하고 있다. 따라서 광업을 비롯한 가치 창출을 위해선 철도 시설의 개보수 및 현대화를 할 수 있는 발전 모델 개발이 요구된다. 항만은 국외 자원교류를 위한 중요 시설로 북한 내에선 2000년대에 주요 44여 개 항만(무역항 9개, 원양수산지항 5개, 어항 30여 개)에 대해 항만시설 기술개선 및 현대화 사업이 추진되었다. 북한의 대표적 9개 무역항은 남포항, 원산항, 송림항, 나진항, 선봉항, 청진항, 단천항, 홍남항, 해주항 으로 조수간만의 차가 심한 서해안에 비해 수심이 깊은 동해안에 있는 항만에 선박 접안 여건이 양호한 특성을 띤다(한국정책금융공사, 2010). 하지만 항만 역시 경제난으로 인해 시설 노후화, 장비 부족, 전기 공급 불안정 문제를 겪고 있다. 항만은 철도와 연계해 지하자원 수송 및 수출입 통로로써 중요한 임무를 수행하므로 잠재성이 크다.

북한의 철도, 항만에 대한 과거 교류 상황은 철도의 경우 과거 남북관계가 우호적이던 상황에서는 남북화물 열차가 10.4선언 합의에 따라 2007년 12월부터 문산·봉동 간 1일 1회 운행해 오다 2008년 12월 북한의 출입제한조치로 중단되었다. 이후 최근 2018년 4월 27일 판문점 선언과 6.1 남북고위급회담에서 남북철도도로 연결 및 현대화에 남북이 합의함으로써 교류 재개의 가능성이 되살아났다. 항만은 대외교류를 통한 개발이 철도와 비교하면 상대적으로 활발했다. 우호국인 중국과 러시아를 중심으로 나진항이 나진-하산 공동개발 합의에 따라 개발된 바 있으며 청진항, 송림항은 이들과 물자 교류의 중심항 역할을 수행하고 있다(한국정책금융공사, 2010).

과거에는 북한의 광산 개발을 위해 중국과 EU 중심의 외국인 직접투자가 이뤄졌으나 북한의 국제신용도 하락과 대북제재 강화에 따라 재개 가능성이 불분명한 상황이다. 남한 지역 역시 2007년 7월 ‘남북 경공업 및 지하자원 개발 협력사업 이행을 위한 세부합의서’에 근거해 검덕, 대흥 광산지역에 대한 공동 현지 조사를 수행한 이력이 있다. 하지만 현재는 북한 광산 관련 모든 투자사업의 검토나 협의가 중단된 상태이다.

이러한 열악한 교통 환경을 고려했을 때 남북 자원개발 협력 재개 시 광산을 효과적으로 개

발하고 광산 산출물 수입하기 위해선 개별 광산과 북한 교통 인프라 연결성에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에선 연결성 분석을 통해 대상 광산과 연결된 교통망, 경제적 경로 그리고 가장 효율적 교역 수단, 위치를 파악하고자 한다.

9.2 북한 광산과 교통 인프라 네트워크 분석

이처럼 열악한 북한 내 교통 인프라 환경에서 광산 개발을 도모하기 위해선 북한 내 광산들과 교통 인프라 간의 연결성을 파악할 필요가 있다. 본 연구에선 기구축한 북한 광산 GIS DB를 활용하여 도로, 철도, 항만 세 요소의 연결성 분석을 시행하였다. 대상 객체 간 연결성을 분석하는 GIS 기법인 네트워크 분석을 사용해 광산과 교통 인프라시설에 대한 연결성 분석이 수행되었다. 사용된 네트워크 분석 기법은 최적 경로 분석(Least cost analysis)과 입지 배분 분석(Location-allocation analysis)으로 최적 경로 분석은 두 포인트 객체 간에 특성에 따라 비용 혹은 가중치가 할당된 복수의 경로 중 최적 비용을 소모하는 경로를 찾아내는 분석법이며 입지 배분 분석은 주어진 조건에서 수요 위치(광산)에 최적 목적 위치(교통 인프라 포인트)를 결정해준다. 전체적 분석 순서는 그림 9.1과 같이 GIS 정보 취득, 전처리 후 최적 경로 분석, 입지 배분 분석 순으로 이뤄졌다. 네트워크 분석 결과를 통해 북한 내 광산과 남한과 이어진 철도 연결부, 항만 사이에 연결성을 파악할 수 있으며 연결의 최적 경로 정보를 얻을 수 있다.

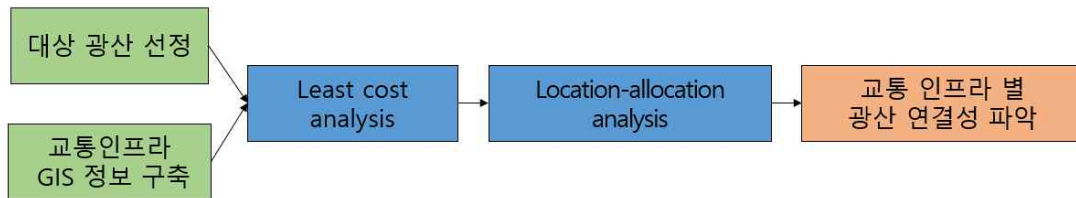


그림 9.1 광산과 교통 인프라 네트워크 분석 순서도

대상 광산은 광물자원공사 광물종합지수의 대상이 되는 15종의 광물 중 광산 GIS DB로 구축된 주광종 8종의 132개 광산으로 선정되었다(표 9.1). 그림 9.2는 이들 광산의 공간적 분포를 나타낸다. 대상 광산은 함경북도에서 시작해 평안남도 북동단까지 이어지는 함경산맥 일대 일부를 제외하고 북한 내에 고르게 분포하고 있다.

표 9.1 분석 대상 광종 및 광산 개요

광물종합지수 대상 광종(15종)	광산 GIS DB 구축 개수
철	40
구리	16
연, 아연	36
우라늄	4
희토류	11
알루미늄	8
몰리브덴	17
유연탄, 니켈, 리튬, 크롬, 망간, 주석, 코발트	미구축 (부광종 미포함)

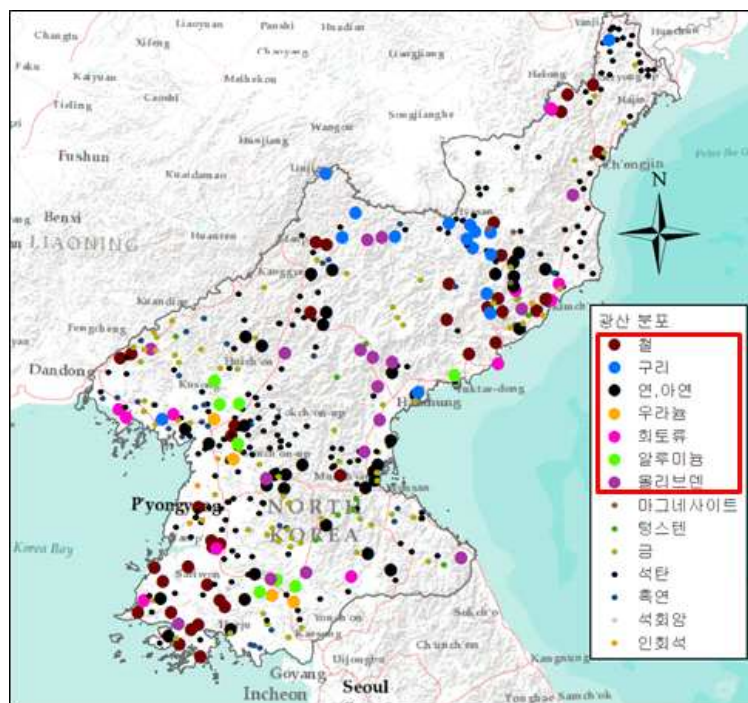


그림 9.2 북한 내 광산 분포 (붉은 박스 - 대상 광종 광산)

교통 인프라 GIS 자료 중 도로 및 철도 자료는 Open Street Map에서 취득되어 네트워크 분석을 위해 연결성, 위상 구조를 확인하고 수정하는 전처리 과정을 거쳤으며 항만은 북한 정보포털 지도를 통해 주요 항만 9개소에 대한 디지털링을 수행해 취득하였다. 추가적으로 남북한 철도 연결부는 경의선, 경원선, 동해선 3개 선에 대한 연결 지역을 디지털링해 추가하였다. 그림 9.3은 분석에 사용될 광산, 철도 및 남한과의 연결부, 도로, 항만의 위치를 나타낸다. 각 객체의 공간 정보 특성을 살펴보면 광산, 철도 연결부, 항만은 포인트 벡터 자료이고 도로와 철도망은 폴리라인 벡터 자료이다. 포인트 벡터 자료는 분석의 대상이 되며 폴리라인 벡터 자료는 포인트를 연결해 포인트 간 관계를 분석할 수 있도록 한다.

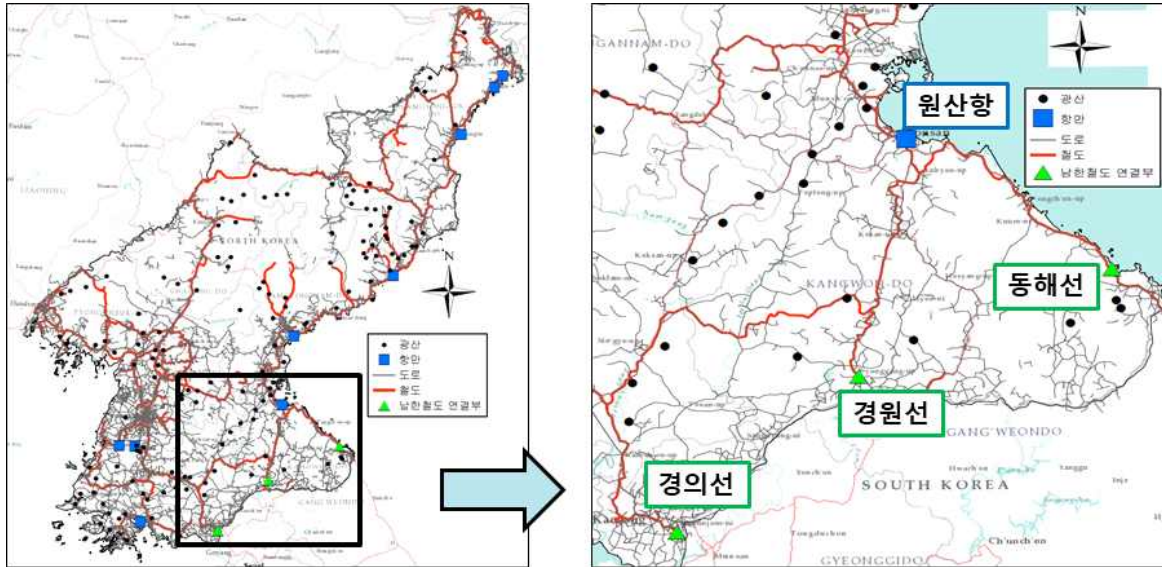
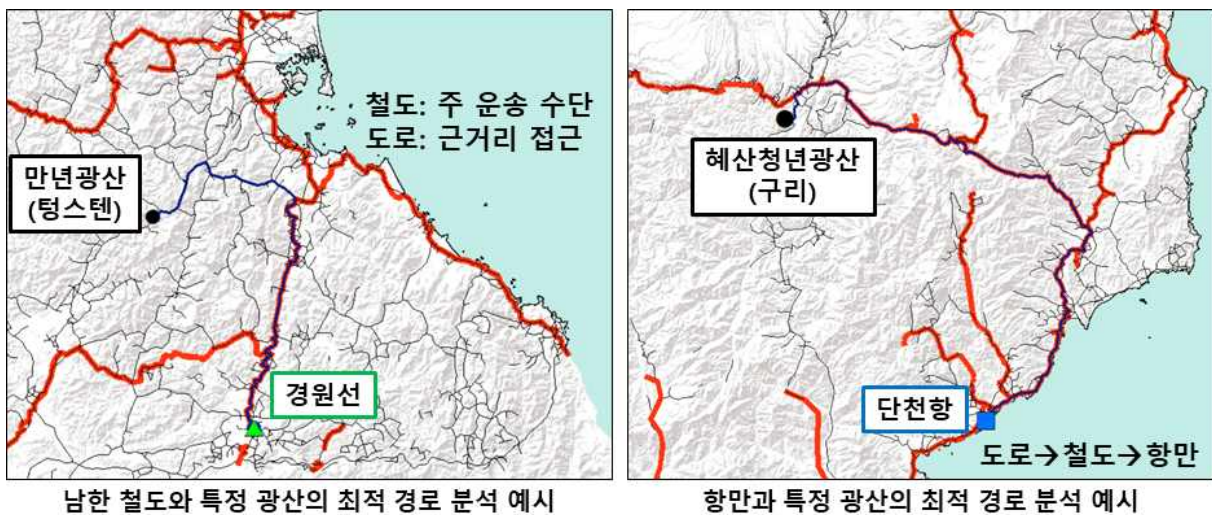


그림 9.3 (좌) 네트워크 분석 대상 광산 및 교통 인프라, (우) 남한 철도 연결부

최적 경로 분석 시 고려되어야 할 변수는 출발지점과 도착지점, 교통수단별로 경로에 부과될 운송비용과 비용한계설정이다. 출발지점은 광산 포인트 자료이며 도착지점은 철도 연결부와 항만으로 설정되었다. 북한이 도로망 포장률이 매우 낮으며 대량 수송에 적합하지 않음을 고려해 도로에 철도보다 높은 비용을 할당했다. 또한, 거리가 멀거나 접근성이 떨어져 비용이 크게 들어가는 광산은 분석에서 제외되도록 한계값을 설정한 후 분석을 수행하였다. 최적 경로 분석 결과의 예시는 그림 9.4와 같다. 좌측 그림은 만년광산 사례로 경원선 연결부까지의 경로 중 가장 비용이 적은 경로를 나타낸다. 도로를 통해 철도로 접근 후 철도를 통해 연결부로 운송되는 형태를 보인다. 우측 그림은 해산청년광산의 사례로 단천항까지의 최적 경로를 보여준다. 항만에 대한 최적 경로 역시 도로에서 철도로 연결되어 운송되는 것이 가장 효율적인 것으로 분석되었다.



남한 철도와 특정 광산의 최적 경로 분석 예시

항만과 특정 광산의 최적 경로 분석 예시

그림 9.4 특정 광산의 철도 및 항만과의 최적 경로 분석 예시
(검은 선 - 도로, 붉은 선 - 철도, 파란 선 - 최적 경로, 초록 점 - 철도 연결부, 파란 점 - 항만)

대상 객체 간의 최적 경로 분석이 완료된 후 각 광산별로 어떤 도착지점(철도 연결부, 항만)이 가장 연결성이 좋은지 결정하기 위해 입지 배분 분석을 수행하였다. 그 결과는

그림 9.5와 같다. 철도 연결부의 경우 경의선 연결부가 서부 광산들과 연결성이 좋으며 동부 광산들은 경원선과 연결성이 좋은 것으로 드러났다. 동해선의 경우엔 강원도 지역 일부 광산들만 할당되었다. 이는 동해선이 타 철도선과 연결성이 상대적으로 떨어지고 원산항이 주변 광산과 더 좋은 연결성을 지니기 때문으로 추정된다. 항만들과의 연결성을 살펴보면 송림항이 서부 광산과 광역적으로 연결되며 동부 광산은 원산항으로 연결되는 것을 알 수 있다. 북부의 광산은 청진항과 단천항에 나뉘어 연결된다.

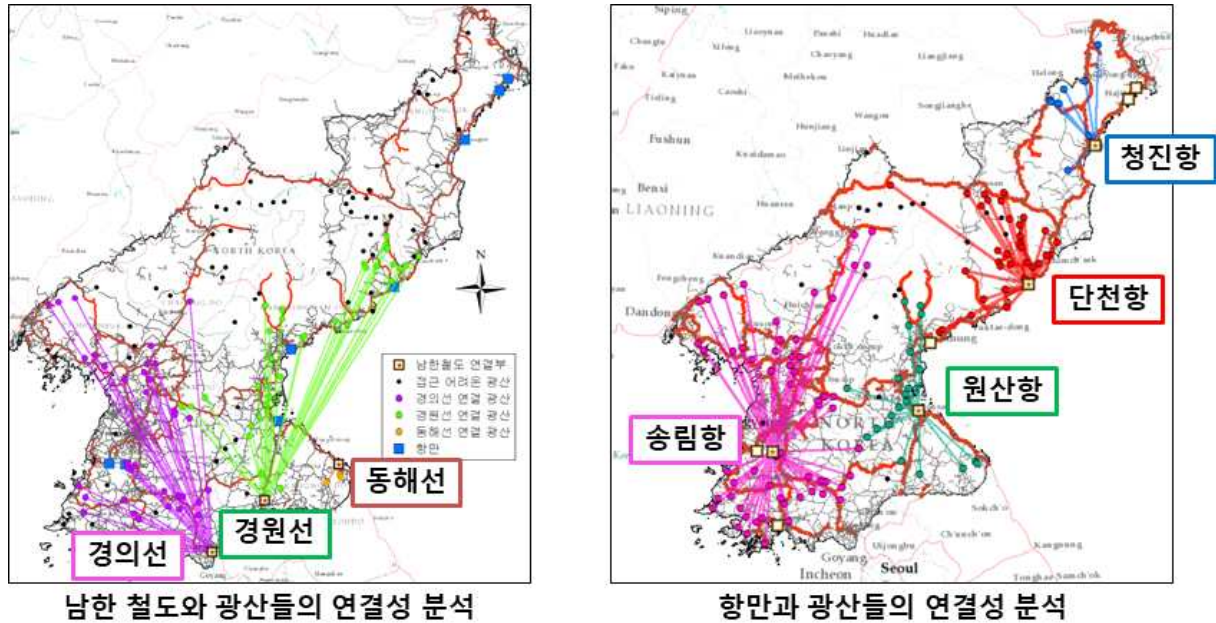


그림 9.5 Location-allocation 분석 결과 (좌 - 철도 연결부 결과, 우 - 항만 결과)

10. 결론

본 연구에서는 북한의 광업 동향 및 연구현황 분석, 북한 GIS DB 구축, 북한 주요광산의 지질재해 위험성 및 태양광 잠재성 분석, 교통인프라 분석을 수행하였다. 먼저 북한 광업 동향 분석을 통해 북한 광업의 잠재성 및 경제적 중요성을 파악하였으며, 최근 북한의 정치, 경제적 환경 및 광업조건 악화에 따른 광업 분야의 변동 경향을 분석하였다. 또한 북한의 광업 연구동향을 분석하여 최근 10년간 광업 분야의 연구 성과를 파악하였으며, 북한 광업 연구논문에서 나타나는 정량화, 자동화 추세를 분석하였다. 이와 같은 연구결과는 기존 수행하였던 북한의 구리, 철, 아연, 마그네사이트 광산에 대한 경제성 평가 결과와 연계하여 향후 북한 광산의 경제성 평가 및 개발 전략 수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상되며, 추가적인 문헌조사 및 북한 광산 현지조사를 통해 보다 보완된 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구를 통해 구축된 북한 광산 GIS DB는 GIS 분석 과정에서 유용하게 활용되었다. 이 자료는 앞으로도 특정 광산의 공간분석에 다방면으로 사용될 수 있으리라 기대된다. 또한 지난 연구 결과와 연계시켜 후속 연구 방향을 설정하기 위한 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다. 앞으로 이 DB를 보다 발전시키기 위해선 위치 정확도의 지속적 개선과 추가 자료의 확보가 필요하다.

북한 주요광산의 산사태 위험도 평가를 통해서도 룡양 광산이 산사태 위험도가 크다고 추정되었으며 위험지역이 광산 주변 시설과 일치해 신중한 접근이 필요하다고 분석된다. 룡양 광산은 과거 남북협력 대상이 되었던 광산임을 고려할 때 미래 남북관계 완화 시

협력 재개를 기대해 볼 수 있다. 그러한 상황에서 본 분석은 인프라 구축을 위한 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다. 다른 한편으로 은률 광산은 산사태 위험도가 낮으며 태양광 잠재성이 높은 광산으로써 광산 개발 자체 외에 태양광 발전 면에서의 접근이 가능하다. 광산 DB에 따르면 은률광산 인근 15 km에 3 개의 광산이 존재한다. 연구 반경을 넓혀 서해 평야 지대 광산 개발을 위한 분산형 전력 그리드 구축에 대한 연구가 이뤄진다면 잠재성이 클 것으로 예상된다.

북한 광산과 교통 인프라 간의 네트워크 분석 결과 최적 육상 운송 경로와 광산별로 적합한 남북철도 연결부 및 항만 교역 후보지가 확인되었다. 이 결과는 북한 광산과 교통 인프라의 연결성과 공간적 특성에 대한 이해를 넓혔을 뿐만 아니라 추후 남북 광산 개발 협력 재개 및 투자, 자원교류 시작 시 인프라 확충과 의사결정을 위한 참고 자료로 활용될 수 있다는 점에서 의의가 있다. 본 연구에서는 도로와 철도의 차별성과 이동 거리만을 고려하였으나 더욱 정확한 분석을 위해서는 개별 도로 및 철도 노선의 노후 정도, 운행 가능 속도 등을 고려할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 개별 광산의 중요도를 동일하게 고려하였으나 광산의 유형과 광종, 규모 등 세부 정보가 추가되어 후속 연구가 진행될 수 있다. 이에 더해 인구, 도시 분포, 지형 등 지리적 요인을 함께 고려한다면 연구를 발전시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) “北 노동신문, 태풍 피해 복구 노력집중 보도”, 연합뉴스. 2012.9.7,
<https://www.yna.co.kr/view/AKR20120907097700014> (2019-11-22 접속)
- (2) [평양은 지금] “북한 은률광산 붕괴 사고, 속도전 원인일 것”, VOAKOREA, 2017.3.24,
<https://www.voakorea.com/a/3779153.html> (2019-11-22 접속)
- (3) 北 최대 무산광산도 수해로 큰 피해...“일부 생산 공정 재가동”, 노컷뉴스, 2016.9.24,
<https://www.nocutnews.co.kr/news/4658712>(2019-11-22 접속)
- (4) 北, 태풍으로 세계 최대 마그네사이트 광산지구 큰 피해, 노컷뉴스, 2012.9.7,
<https://www.nocutnews.co.kr/news/965228> (2019-11-22 접속)
- (5) 김유동, 박홍수, 김성용, 이재호, 2005, 북한의 광물자원개발과 남북간 자원협력방안, 자원환경지질, 38(2), 197-206.
- (6) 변상정, 2011, 북한 과학기술정책 연구동향과 과제, 현대북한연구, 14(2), 167-216.
- (7) 석근우, 2016, 북한의 석탄산업 현황 및 진출전략, 한양대학교 공학대학원, 석사학위논문, p.4-7, 20-25.
- (8) 윤재영, 2019, 북한 전력산업 현황 및 남북한 전력협력 방안, KDB북한개발, 2019년 겨울호 (통권21호), 54-75.
- (9) 이춘근, 김종선, 2015, 북한 김정은 시대의 과학기술정책 변화와 시사점, STEPI Insight, 173, 1-29.
- (10) 이춘근, 김종선, 박은혜, 남달리, 2015, 통일 이후 남북한 과학기술체제 통합방안, 과학기술정책연구원, 정책연구 2015-20, 38-40.
- (11) 전력통계정보시스템, 북한전력지표, 발전설비용량, <http://epsis.kpx.or.kr/> (2020-02-24 접속)
- (12) 통계청, 2019.11.21. 통계정보-북한통계-주제별.
http://kosis.kr/bukhan/statisticsList/statisticsList_01List.jsp
- (13) 통일부. “주요인물동정: 박봉주(내각총리).” 주간북한동향1158 (2013): 9.
- (14) 한국광물자원공사, 2011, 북한 광물자원 개발현황, 한국광물자원공사 남북사업팀, 478p.

- (15) 한국광물자원공사, 2017, 북한의 광물자원 통계
- (16) 한국광물자원공사 한국자원정보서비스, 광물종합지수,
<https://www.kores.net/komis/price/priceStocks/pricestocks/priceStocks.do> (2019-11-25
 접속)
- (17) 한국정책금융공사, 2010, 북한의 산업, 797p.
- (18) 한국지질자원연구원, 2019, 광산물 수급분석 2018/2019
- (19) 한국지질자원연구소, 『한반도광물자원개발 DMR 융합연구단광산 DB』,
<https://dmr.kigam.re.kr/>
- (20) 함북 무산광산에 무슨 일이? 주민들 “고난의 행군 시기 같아”, 데일리NK,
 2018.10.30, <https://www.dailynk.com/함북-무산광산에-무슨-일이-주민들-고난의-행군-시기/> (2019-11-22 접속)
- (21) Chen, W., Pourghasemi H. R., Kornejady, A., Zhang, N., 2017, Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques. *Geoderma*, 305,314-327.
- (22) Chung, W., 2019, Mineral Resource Industry of North Korea and Two Korea' s Cooperation, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 56(2), 204-211.
- (23) Kawabata, D., Bandibas, J., 2009, Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN).*Geomorphology*, 113(1-2), 97-109.
- (24) Koo, Y., Oh, M., Kim, S.-M., Park, H.-D. 2020, Estimation and mapping of solar irradiance for Korea by using COMS MI satellite images and an artificial neural network model. *Energies*, 13 (2), art. no. 301.
- (25) KDB 산업은행, 2015, 북한의 산업 2015
- (26) I-RENK, 2019.11.20. 북한 지하자원 매장. <https://www.irenk.net/>
- (27) Lim, S., 2014, North Korea' s Underground Natural Resources and Promotion of the Exchange between South and North Korea, *The Journal of Peace Studies*, 15(1), 111-128.
- (28) Tien Bui, D., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O., 2011, Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59, 1413.
- (29) USGS, 2019, 2016 Minerals Yearbook: North Korea, p.14.4-14.5.
- (30) USGS, 2020, Mineral Commodity Summaries 2020
- (31) Yoon, D. Song, J., 2019, conceptual Economic Evaluation of a Copper Mine in North Korea, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 56(2), 183-196.

참고문헌(북한)

- (1) 김경일, 리철진, 리룡길, 2008, <○-스>돌출대와 그 주변에서 단층구조의 모형화와 응력마당분포에 대한 연구, *지질 및 지리과학*, 49(4), 40p.
- (2) 김영희, 리효원, 2017, 불린속암체에서 로천채굴장변두리의 안정성 분석, *채굴공학*, 53(4), 2-3.
- (3) 김은섭, 박대성, 2015, 유전산법과 인공신경망에 의한 갱도유지방법 해석, *채굴공학*, 51(2), 4-5.
- (4) 김철룡, 2009, 암석의 완전응력변형특성에 의한 암체의 세기 해석, *채굴공학*, 45(4),

2-3.

- (5) 김초향, 2016, 유한요소법에 의한 지반의 극한세기계산, 지질 및 지리과학, 57(2), 7-8.
- (6) 김혁진, 최종수, 2012, 유한요소법에 의한 잔주응력상태 해석, 채굴공학, 48(2), 18-20.
- (7) 리성, 최명학, 전철만, 2014, 블록모형에 기초한 광체3차원모형화방법, 지질 및 지리과학, 55(1), 39p.
- (8) 리철영, 서원석, 2008, 채굴갱도주위암체의 파괴구역 예측, 채굴공학, 44(2).
- (9) 리태섭, 김은섭, 2012, FLAC3D에 의한 무연탄완경사중박층 천반의 거동 해석, 채굴공학, 48(4), 11-12.
- (10) 박장혁, 변광남, 2012, 채굴장불규칙잔주의 안정성 해석, 채굴공학, 48(1), 15-16.
- (11) 백기남, 2013, 착암대차의 천공팔정위조종을 위한 천공순서 결정, 채굴공학, 49(2), 31-33.
- (12) 안영범, 조천일, 2009, 비선형계획법에 의한 보통경사유연탄층의 채굴법선택요소 최량화, 채굴공학, 45(3), 24-25.
- (13) 오창환, 리원철, 2010, 보통경사탄층에서 한방향계단붕괴식채탄법, 기술혁신, 56(8).
- (14) 장관철, 장춘근, 2012, 전면붕괴식채광법에 의한 잔주채굴, 기술혁신, 58(5).
- (15) 정진혁, 2017, JKSImBlast를 리용한 지하채굴장천공발파설계방법, 기술혁신, 63(7).
- (16) 채명학, 심영택, 2016, 비저항영상화에 의한 갱내탐사에서 장치결수결정방법에 대한 연구, 지질 및 지리과학, 57(3), 27-28.
- (17) 최승기, 강경석, 2009, 모호모임합광성종합평가법의 정량화된 등급상태구분, 지질 및 지리과학, 50(1), 29p
- (18) 최지성, 김인봉, 2015, 품질공학적수법에 의한 갱도발파최량설계에 대한 연구, 채굴공학, 51(3), 9-12.
- (19) 홍근의, 리혁철, 2016, 광체의 채굴가능매장량평가방법, 기술혁신, 62(3).
- (20) 황룡현, 2013, 구조응력마당속에서 갱도의 합리적배치 고찰, 채굴공학, 49(1), 37-38.