

한반도 폐광산의 평화적 활용방안 연구

박형동^{1,2}, 송재준^{1,2}, 강일석², 구지윤², 김한진¹, 임준수², 최지원²

¹ 서울대학교 에너지자원신기술연구소

² 서울대학교 공과대학 에너지자원공학

³ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

1. 서론

노후광산의 폐광에 따른 광산 주변지역의 경기침체 및 광해 문제를 해결하는 것은 광업 분야의 주요한 당면 과제이다. 폐광산 유휴 부지를 활용한 산업 및 인프라 시설 구축은, 광산 주변지역 주민의 복지를 향상시키고 동시에 광산폐기물의 외부 유출을 방지할 수 있는 대안으로 제시되고 있다. 대한민국 (이하 남한)의 경우 폐광산 부지를 활용한 데이터센터 구축 추진 (황미정, 2023), 스마트 팜 구축 (박성준, 2020), 풍력 및 태양광 발전 연구 (장미향 외, 2013; 송진영 외, 2014) 등 다양한 방향의 연구 및 실증사업 사례들이 존재한다. 해외 역시 활발한 폐광산 부지 활용 연구가 이루어지고 있으며, 특히 중력 에너지 저장시설 (Morstyn et al., 2019), 양수식 에너지 저장시설 (Fan et al., 2020) 및 이를 태양광, 풍력, 바이오매스와 결합한 복합 에너지 저장시설 (Nield, 2017) 등 폐광산 부지를 에너지 저장시설로 활용하기 위한 연구 및 사업 사례가 다수 보고되고 있다.

북한 특유의 경제 및 사회 구조를 고려할 때, 북한의 폐광산 유휴 부지를 활용함으로써 얻을 수 있는 효용은 타 국가 대비 상대적으로 높을 것으로 예측된다. 북한 경제에서 광업은 유의미한 비중을 차지하고 있으며 (2022년 기준 북한 실질 국내총생산의 약 8.8%)(국가통계포털, 2023), 북한 내 가행중인 광산의 수는 2021년 기준 710개소로 동시기 남한의 325개소 대비 약 2.2배에 달하는 수준이다 (국가통계포털, 2023). 또한 북한 내 광업 종사자의 수는 2016년 기준 약 1,093,700명으로 추정되며, 이는 북한이 남한 (광업 종사자 약 7,221명) 대비 극단적으로 노동집약적인 광업 구조를 보유하고 있음을 시사한다 (방경진, 2018). 이와 같이 광산의 수가 많고 다수의 광산 노동자들이 광산 주변에 거주할 것으로 예상되는 북한의 실정을 고려할 때, 북한 폐광산 부지의 활용은 다수의 북한 주민을 대상으로 한 인도적 지원 방안으로 작용할 수 있다.

또한 북한 폐광산 부지의 활용은 한반도의 평화기조 확보에 기여할 수 있다. 폐광산 부지에 존재하는 지하갱도는 기후·온도·진동·전자파·방사능 등 외부 환경에 대한 탁월한 격리성을 보유함과 동시에 외부로부터의 관측 및 공격이 사실상 불가능하여, 지하 병커나 탄약고와 같이 안정성·기밀성을 요구하는 군사적 목적 시설로의 전환이 용이하다 (한국지질자원연구원, 2016). 특히 북한은 2006-2017년 기간 함경북도 길주

군에 위치한 풍계리 핵실험장에서 총 6차례의 핵실험을 진행한 바 있다 (이원진 외, 2018). 해당 시설은 약 2,000m 고도의 성층화산 및 200m 두께의 화산 퇴적물 아래 위치한 지하 시설로, 향후 북한이 유사한 조건을 가진 폐광산 지하갱도를 활용해 추가적인 핵실험을 수행할 가능성은 한반도 평화에 있어 무시할 수 없는 위험 요소이다. 따라서 북한 폐광산 부지를 평화적 용도로 활용함으로써, 핵실험과 같은 군사적 목적의 폐광산 부지 활용을 사전에 방지하는 선제적 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 북한 폐광산 부지의 평화적 활용방안으로 신재생에너지를 활용한 에너지 저장시설 (Energy Storage System, ESS)을 제시하였다. 활용 가능한 북한 폐광산 입지 후보는 북한의 최근 30년간 주요 광물자원 생산량 데이터와 주요 가행광산 위치 정보를 종합하여 결정하였다. 일정 수준의 에너지 산출량 확보를 위해 풍력·태양광을 함께 적용한 에너지 발전설비를 가정하였으며, 에너지 저장설비는 중력식·양수식 저장의 복합적 도입을 가정하였다. 에너지 발전설비의 발전 용량은 남한 폐광산 부지를 대상으로 수행된 신재생에너지 발전 잠재량 연구 결과에 기초하여 결정하였다. 에너지 저장설비의 저장 용량은 해외 폐광산 지하갱도 조건에서 수행된 에너지 저장량 연구 결과를 활용하였다. 정확한 현장 조건을 특정하기 어려운 북한의 특성을 고려하여, 각 폐광산 입지 후보의 위치와 에너지 발전설비 규모, 에너지 저장설비의 설치 심도에 따라 총 24개의 시나리오를 구축하였다. Rocscience사의 2차원 유한요소법 기반 수치해석 소프트웨어인 RS2를 활용하여, 각 시나리오에서 암반의 물성과 설비 하중, 설비 위치에 따른 폐광산 부지의 역학적 안정성을 분석하였다. 최종적으로 각 시나리오 조건에서 폐광산 부지의 에너지 저장시설 설치 가능성과 안정성 관련 고려 사항에 대해 제시한다.

2. 북한 폐광산 입지조건 분석

현재 북한 광산의 폐광 여부는 공개되지 않은 상태로, 북한 폐광산의 위치를 직접적으로 특정하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 대외적으로 공개된 데이터인 북한의 주요 광물자원 생산량과 가행광산 분포도를 활용하여, 유력한 폐광산 위치로 예상되는 북한 내 4개 지역을 최종 입지 후보로 결정하였다.

2.1 광물자원 생산량 변동에 기초한 폐광산 입지 후보 결정

일반적으로 특정 광물자원의 생산량이 유의미하게 감소할 경우, 해당 광물자원을 생산하는 광산의 폐광 빈도가 증가하였다고 간주할 수 있다. 본 연구에서는 미국 지질조사국 (United States Geological Survey, USGS)에서 매년 발행하는 'Mineral Yearbook'에 수록된 북한의 연도, 광종별 북한 광물자원 생산량 데이터를 참고하여, 다수의 광산이 폐광되었을 것으로 예상되는 광종을 결정하였다. 현재 USGS에서 대중에게 공개하고 있는 북한 광물자원 생산량 데이터는 1990-2019년 기간의 데이터로, 전체 데이터는 표 2.1에 제시하였다.

표 2.1. 1990-2019년 연도, 광종별 북한 광물자원 생산량 (USGS, 1994-2019)

Category	Mineral	Unit	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004		
Metal	Au (Gold content, mine)	kg	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	4,500	2,500	6,600	6,600	-	-	-	2,000	
	Ag (Silver content, mine)	ton	50	50	50	50	50	50	50	50	45	40	20	20	20	20	20	20	
	Cu (Cu content, mine)	ton	15,000	15,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	15,000	14,000	14,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	
	Pb (Pb content, mine)	ton	80,000	80,000	75,000	80,000	80,000	80,000	80,000	75,000	70,000	60,000	90,000	9,000	10,000	12,000	13,000	13,000	13,000
	Zn (Zn content, mine)	ton	230,000	200,000	200,000	210,000	210,000	210,000	210,000	150,000	100,000	100,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	62,000	
	W (W content, mine, concentrate)	ton	1,000	1,000	1,000	1,000	900	900	900	900	500	500	500	500	500	600	600	280	280
Non-Metal	Fe (Fe content, mine)	10 ³ ton	470	470	490	490	490	510	510	490	850	1,100	1,100	1,200	1,150	1,260	1,300	1,300	
	Graphite (gross sum)	ton	35,000	35,000	38,000	38,000	38,000	40,000	40,000	40,000	35,000	33,000	30,000	25,000	25,000	25,000	25,000	30,000	
	Magnesite	10 ³ ton	1,500	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,500	1,000	1,000	1,000	1,000	1,200	1,200	60	
Coal	Cement (hydraulic)	10 ³ ton	16,000	16,000	17,000	17,000	17,000	17,000	17,000	7,000	3,200	4,000	4,600	5,160	5,320	5,540	5,630	5,630	
	Anthracite Coal	10 ³ ton	68,000	70,000	70,000	71,000	70,000	71,000	70,000	2,500	13,000	15,000	16,000	16,000	17,000	16,000	16,300	16,300	
	Bituminous Coal	10 ³ ton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Lignite Coal	10 ³ ton	22,000	20,000	21,000	21,000	20,000	20,000	20,000	15,000	5,500	5,500	6,500	7,000	7,000	6,300	6,500	6,500	
	Gross Coal	10 ³ ton	90,000	90,000	91,000	92,000	90,000	91,000	90,000	40,000	18,500	20,500	22,500	23,000	24,000	22,300	22,800	22,800	

Category	Mineral	Unit	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Metal	Au (Gold content, mine)	kg	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
	Ag (Silver content, mine)	ton	20	20	20	20	20	50	50	50	50	50	50	30	20	20	20	
	Cu (Cu content, mine)	ton	12,000	12,000	12,000	12,000	3,700	4,600	12,000	16,000	17,000	19,300	20,000	25,000	10,000	10,000	10,000	10,000
	Pb (Pb content, mine)	ton	13,000	13,000	13,000	13,000	22,000	26,000	32,000	38,400	58,800	30,000	35,000	42,000	35,000	30,000	26,000	26,000
	Zn (Zn content, mine)	ton	67,000	67,000	70,000	70,000	29,000	29,000	34,000	35,000	36,000	32,000	26,000	30,000	20,000	20,000	10,000	10,000
	W (W content, mine, concentrate)	ton	650	930	230	270	100	110	110	100	65	70	70	50	310	1,410	1,130	
Non-Metal	Fe (Fe content, mine)	10 ³ ton	1,400	14,000	1,400	1,488	550	2,500	3,000	3,220	3,400	3,390	3,040	3,250	3,560	2,030	1,750	
	Graphite (gross sum)	ton	30,000	30,000	30,000	30,000	10,000	10,000	10,000	30,000	30,000	5,500	5,500	5,500	5,500	6,000	6,000	
	Magnesite	10 ³ ton	45	60	55	150	250	250	250	500	700	400	320	350	380	70	70	
Coal	Cement (hydraulic)	10 ³ ton	5,700	6,160	6,130	6,415	6,400	6,400	6,400	6,400	6,600	6,680	6,700	7,080	6,840	5,830	5,600	
	Anthracite Coal	10 ³ ton	16,500	17,200	17,100	25,060	36,000	41,000	25,500	25,800	26,600	12,200	12,400	21,700	15,200	12,700	14,200	
	Bituminous Coal	10 ³ ton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,400	11,600	9,320	6,500	5,420	6,060	
	Lignite Coal	10 ³ ton	7,000	6,500	7,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Gross Coal	10 ³ ton	23,500	23,700	24,100	25,060	36,000	41,000	25,500	25,800	26,600	23,600	24,000	31,020	21,700	18,120	20,260	

그림 2.1-2.11은 표 2.1의 연도별 북한 광물자원 생산량을 각 광종별로 나타낸 그래프이다. 대부분의 그래프에서 1996-1998년 기간 급격한 생산량 감소가 관측되며, 이는 ‘고난의 행군’으로 대표되는 북한의 극심한 경제난과 이에 따른 북한 산업구조 붕괴의 영향으로 분석된다 (정우진, 2014). 고난의 행군 시기 이후 광물자원 생산량은 2000년대를 거쳐 회복세를 보이나, 2016년 전후로 다시 급격한 감소를 보인다. 해당 감소세는 2010년대 중후반의 국제적인 대북제재 기조에 따라 북한 광물자원의 수입이 금지된 영향으로 분석된다.

개별 광종의 경우, 금 (그림 2.1) 및 은 (그림 2.2)의 생산량은 언급된 감소 시기 이외에는 일정한 수준을 유지하였다. 구리 (그림 2.3)는 2008년 이전까지 15,000톤 내외의 일정한 생산량을 유지하였으나, 2008-2016년 시기 증가세 이후 생산량이 크게 감소하였다. 납 (그림 2.4)의 경우 2000년 생산량이 약 1/8로 감소한 후, 구리와 유사한 생산량 추이를 보인다. 아연 (그림 2.5)의 생산량은 1990년대 이후 약 23만톤에서 6만톤으로 생산량의 지속적인 감소세가 나타난다. 텅스텐 (그림 2.6)은 2018년 이후 급격한 생산량 증가를 보이며, 이는 북한 내 신규 대형광산의 개발이 있었을 것으로 추정된다. 철 (그림 2.7)의 경우 상대적으로 절대적 생산량이 많으며 (평균 약 1백만 톤), 데이터 오류의 가능성이 높은 2006년을 제외하면 꾸준한 생산량 증가가 관측된다. 하지만 2018년 이후 기간에서는 철 생산량의 급격한 감소세가 관측된다. 석탄 (그림 2.8) 및 시멘트 (그림 2.9)의 경우 고난의 행군 시기 급격한 생산량 감소가 이루어졌으나, 이후 일정한 생산량 수준을 유지하고 있다. 마그네사이트 (그림 2.10)는 1990년대의 약 1.5백만톤 수준에서 2000년대 이후 약 6만톤으로 급격한 생산량 감소가 이루어졌으며, 이후 생산량 회복과 감소가 반복되고 있다. 흑연 (그림 2.11)의 경우 2000년대 중후반에 생산량이 급격히 감소한 후, 마찬가지로 생산량이 회복되지 않는 경향성을 보인다.

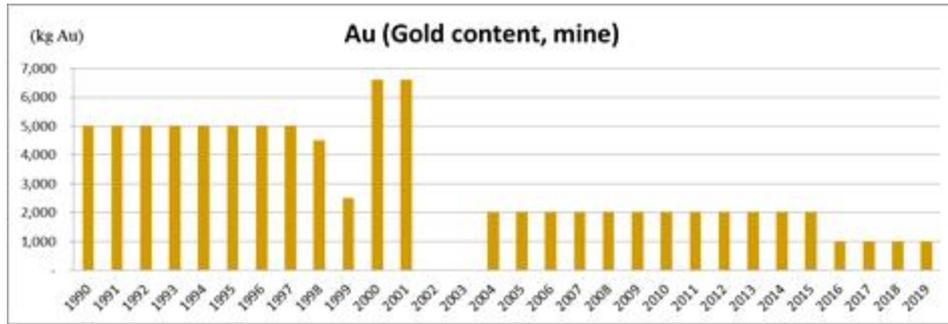


그림 2.1. 1990-2019년 북한 연도별 금 (Au) 생산량 (USGS, 1994-2019)

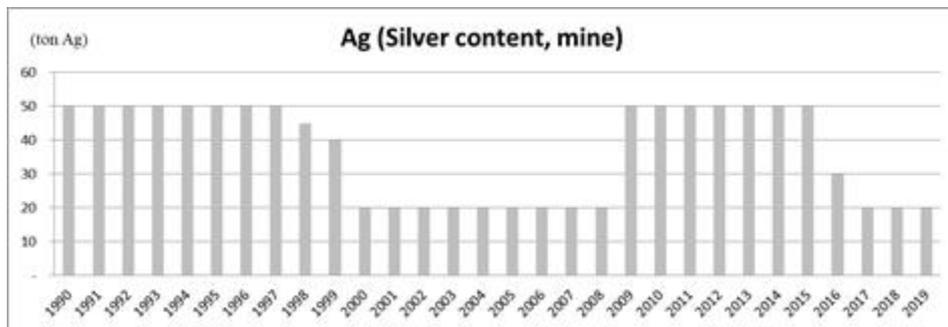


그림 2.2. 1990-2019년 북한 연도별 은 (Ag) 생산량 (USGS, 1994-2019)

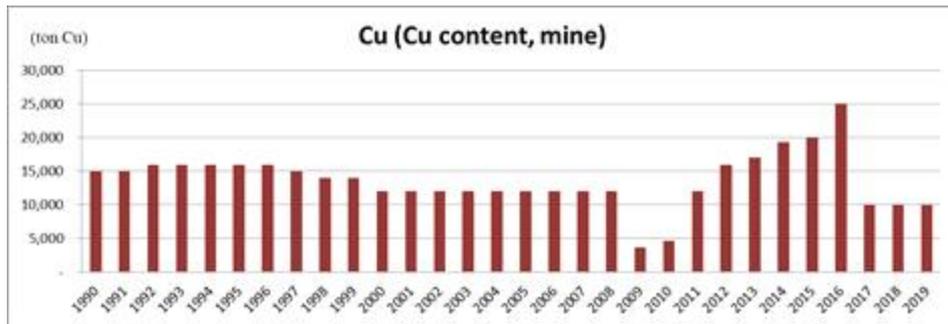


그림 2.3. 1990-2019년 북한 연도별 구리 (Cu) 생산량 (USGS, 1994-2019)

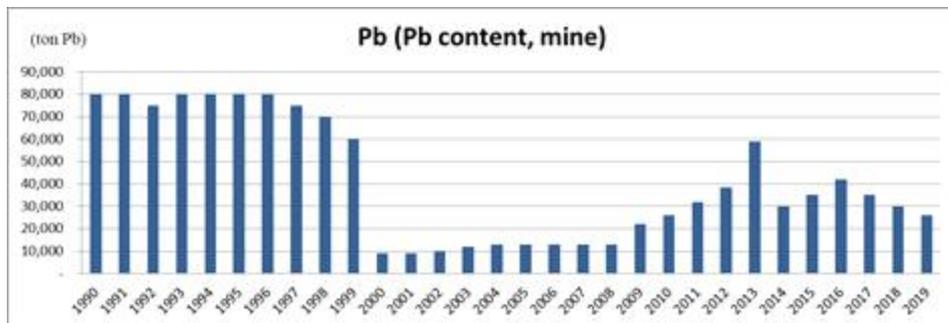


그림 2.4. 1990-2019년 북한 연도별 납 (Pb) 생산량 (USGS, 1994-2019)

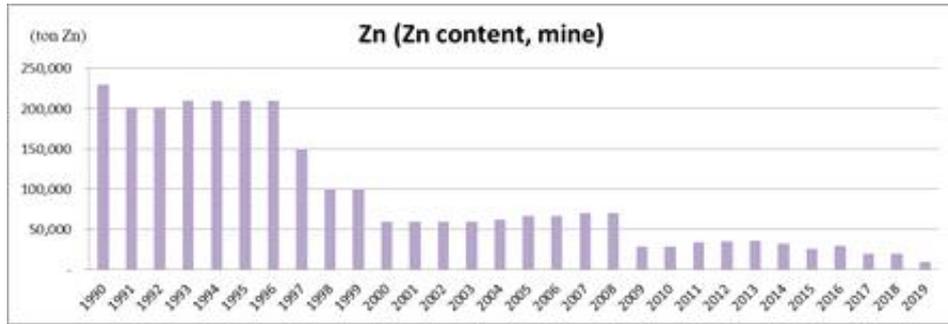


그림 2.5. 1990-2019년 북한 연도별 아연 (Zn) 생산량 (USGS, 1994-2019)

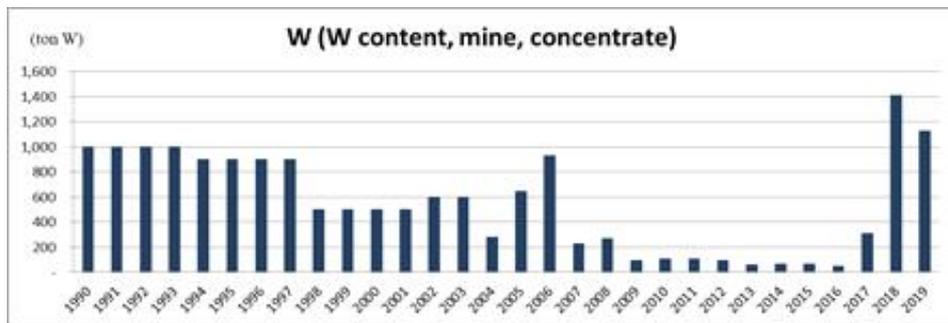


그림 2.6. 1990-2019년 북한 연도별 텅스텐 (W) 생산량 (USGS, 1994-2019)

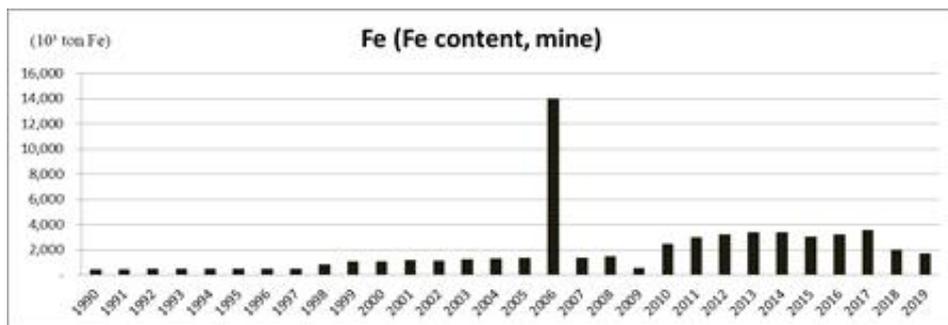


그림 2.7. 1990-2019년 북한 연도별 철 (Fe) 생산량 (USGS, 1994-2019)

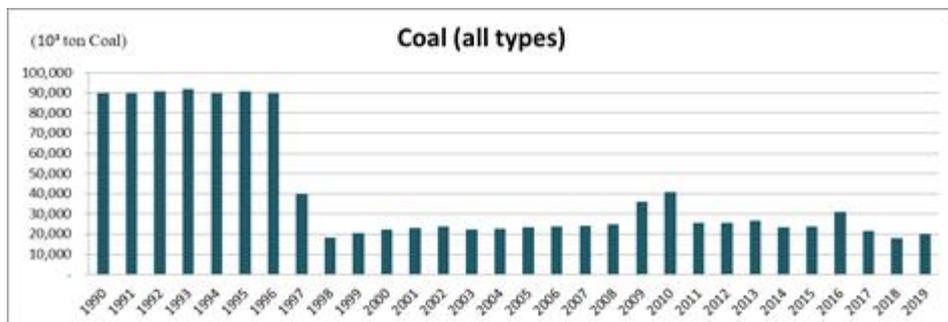


그림 2.8. 1990-2019년 북한 연도별 석탄 (Coal) 생산량 (USGS, 1994-2019)

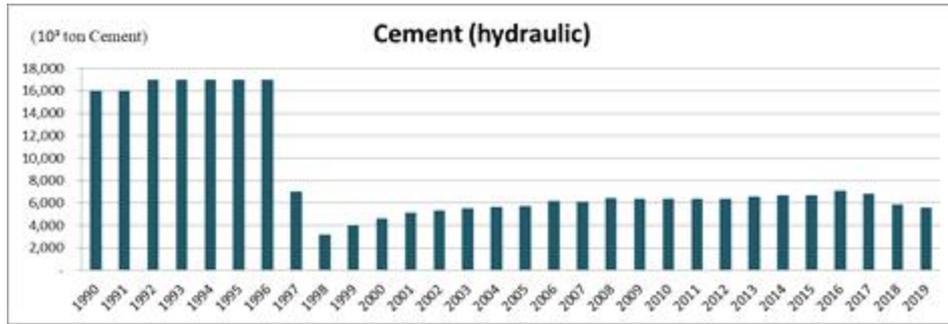


그림 2.9. 1990-2019년 북한 연도별 시멘트 생산량 (USGS, 1994-2019)

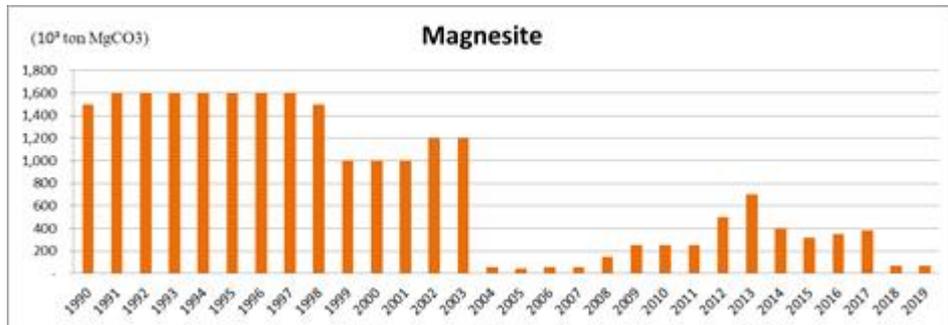


그림 2.10. 1990-2019년 북한 연도별 마그네사이트 생산량 (USGS, 1994-2019)

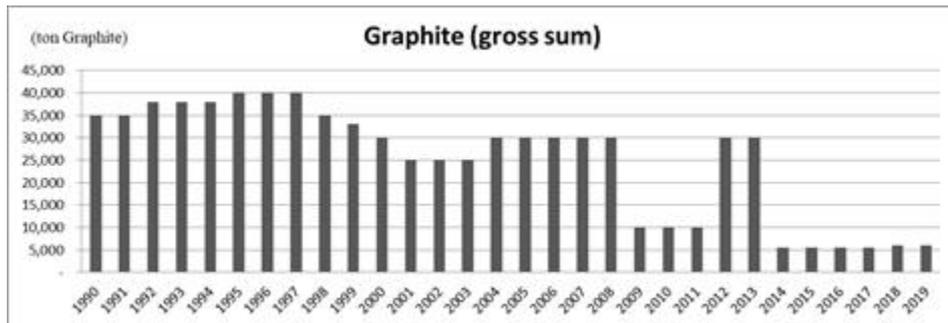
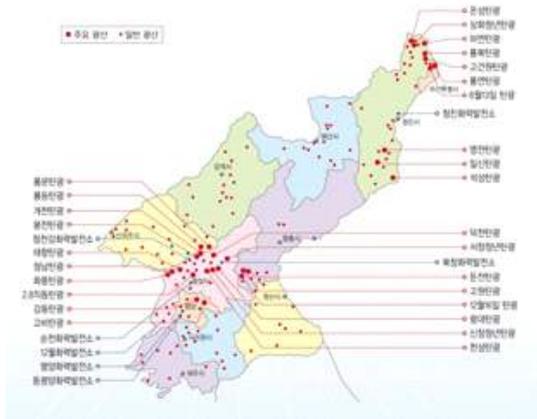


그림 2.11. 1990-2019년 북한 연도별 흑연 (Graphite) 생산량 (USGS, 1994-2019)

본 연구에서는 2010년 하반기 유의미한 생산량 감소세를 보임과 동시에 절대적인 생산량이 높으며, 밀집된 가행광산 분포를 보이는 석탄, 철, 구리, 마그네사이트 광산 분포 지역을 폐광산 입지 후보로 결정하였다. 그림 2.12는 석탄, 철, 구리, 마그네사이트 가행광산 분포도이며, 그림 2.13은 해당 광종들의 가행광산이 밀집된 지역을 폐광산 입지 후보로 표기한 것이다. 최종적으로 함경북도 북부, 함경도 경계부, 평안남도 전역, 황해남도 서부의 총 4개 지역이 폐광산 입지 후보로 결정되었다.



(a) 석탄



(b) 철



(c) 구리



(d) 마그네사이트

그림 2.12. 선정 광종별 주요 가행광산 분포도 (북한지하자원넷)

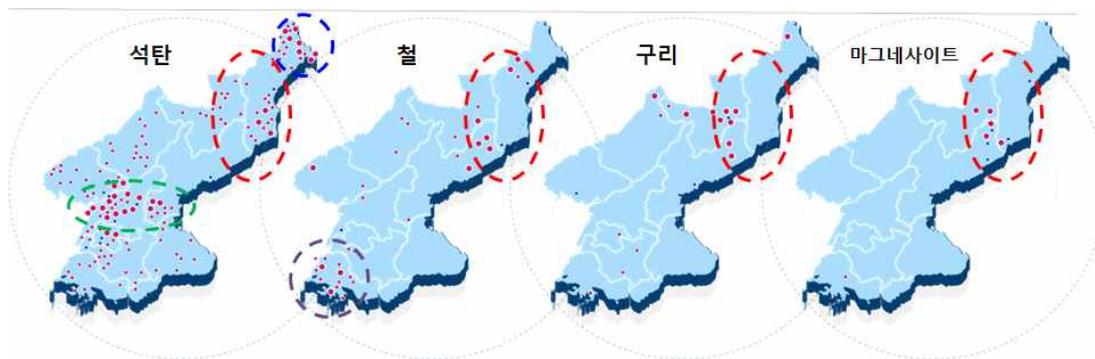


그림 2.13. 광종별 주요 가행광산 분포에 따른 폐광산 입지 후보 결정 (파랑: 함경북도 북부, 빨강: 함경도 경계부, 초록: 평안남도 전역, 보라: 황해남도 서부)

2.2 폐광산 입지 후보의 암종 및 암반물성 추정

현재 북한 지역에서 암반 시료를 채취하여 물성시험을 수행하는 것은 사실상 불가능하며, 북한 폐광산 입지 후보에 대한 신뢰성 있는 암반물성 조사 결과 역시 존재하지 않는 실정이다. 이에 본 연구에서는 국토지리정보원에서 2020년 발간한 '대한민국 국가지도집 II'에 수록된 한반도 전역 지질도를 활용하여, 북한 폐광산 입지 후보의 암종 및 암반물성을 간접적으로 추정하였다. 그림 2.14는 해당 지질도 중 북한 지역의 지질도 및 각 폐광산 입지 후보를 나타낸 것이다.

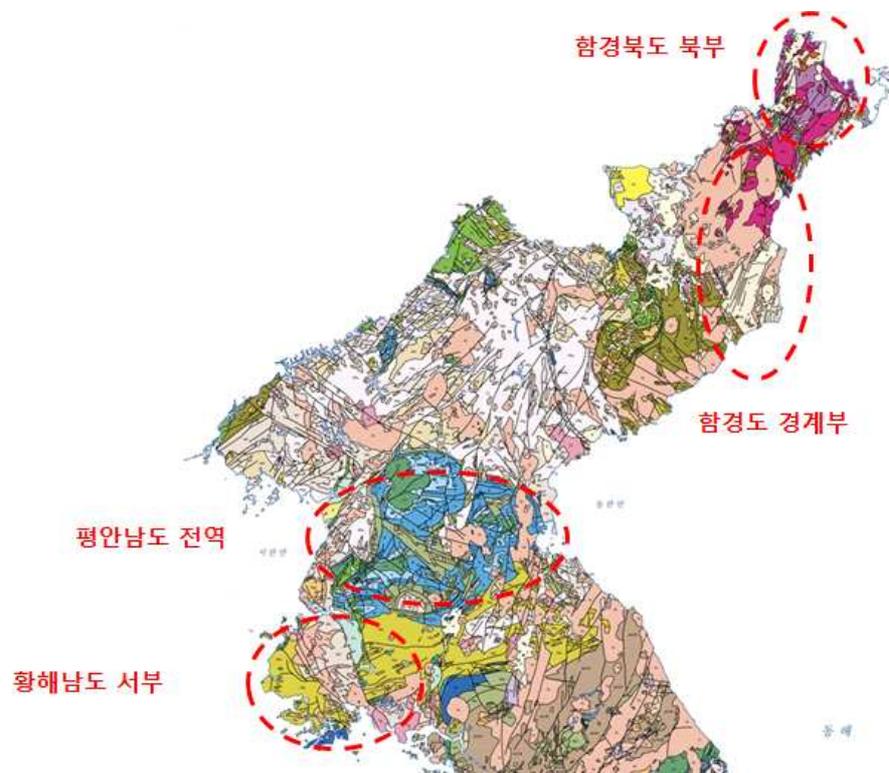


그림 2.14. 북한 지역 지질도 및 폐광산 입지 후보 지역 (국토지리정보원, 2020)

지질도 상에서 서로 다른 색상으로 구별된 지질 분류에 따라, 해당 폐광산 입지 후보의 지질 분류 및 대표 암종을 결정하였다. 결정된 폐광산 입지 후보별 지질 분류 및 대표 암종은 표 2.2와 같다. 본 연구에서는 폐광산 부지를 각 폐광산 입지 후보의 대표 암종으로 이루어진 단일 지질 암반으로 가정하여 이후 연구를 수행하였다. 표 2.2에 제시된 각 대표 암종의 물성값은 이후 4장에서 설명될 수치해석 기반 폐광산 부지 안정성 평가의 입력 파라미터로 활용되었다.

표 2.2. 지질도 기반 폐광산 입지 별 지질분류, 대표암종, 암반물성 데이터

지역	지질 분류	대표 암종	암반물성					
			밀도 (kg/m ³)	UCS (MPa)	영률 (GPa)	포아송비	인장강도 (MPa)	공극률 (%)
함경북도 북부	두만중군 두만강복합체	화강섬록암 ¹	2,590	121.0	44.0	0.23	6.2	0.87
함경도 경계부	함경중군 단천복합체	대보화강암 ²	2,610	125.3	91.0	0.21	10.8	1.00
평안남도 전역	양덕중군 북부 상원중군	장산규암 ³	2,649	139.0	69.0	0.23	20.0	0.30
황해남도 서부	남림중군 남부 상원중군	흑운모편마암 ⁴	2,740	74.5	25.3	0.18	14.5	0.74

1 김영균, 2015; 2 Zhang, 2021; 3 선우춘, 2011; 4 서용석, 2016

3. 북한 폐광산 활용 에너지 저장시설 도입 가능성 연구

3.1 폐광산 활용 에너지 저장시설 도입의 필요성

북한의 에너지 인프라는 절대적인 에너지 생산량 부족과 장기간의 경기침체에 따른 시설 노후화로 인해 매우 열악한 수준으로 알려져 있다. 특히 북한은 체제 유지를 위해 한정된 에너지를 군사·산업 부문에 우선적으로 공급하여, 북한 주민들에게는 제한된 에너지 공급이 이루어지고 있다. 표 3.1에 제시된 북한 주민의 에너지 소비실태 조사 결과에 따르면, 조명·취사·난방 등의 필수적인 에너지 소비 항목에서조차 국가 공급이 제한적으로 이루어져, 주민 자체적으로 에너지 부족분을 대체하고 있는 실정이다 (빙현지, 이석기, 2017). 또한 그림 3.1에 제시된 탈북주민 대상 설문조사 결과, 대다수의 주민들이 하루 평균 1-2시간, 한달 평균 11-20일 가량의 제한된 기간에만 전력이 공급되었다는 답변을 얻었다 (북한 전기산업 정보포탈시스템). 이와 같은 조사 결과를 종합할 때, 북한 주민이 겪는 에너지, 특히 전력 공급의 부족 문제가 심각한 수준임을 예측할 수 있다.

북한이 겪고 있는 전력 공급의 부족 문제를 해결하기 위한 방안으로 화력·수력발전소와 같은 대형 발전소의 설치 지원을 생각할 수 있다. 하지만 대형 발전소는 북한 측 건설비용과 부지, 송·배전설비를 확보하기 어렵다는 단점이 존재한다. 또한 대형 발전소에서 생산되는 전력을 북한 당국이 군사적 용도로 유용할 가능성이 존재하며, 이에 따른 북한 발전소 설치 지원에 대한 남한의 국민감정 문제 역시 존재한다 (문승일, 2018). 반면 폐광산 부지를 활용한 에너지 저장시설의 경우, 북한 내 산재한 폐광산을 활용하여 부지 확보에 용이하는 장점이 있다. 또한 해당 시설은 대형 발전소에 비해 전력 생산·공급량이 적어 군사적 활용이 어려우며, 광산 주변지역 주민에게 전력을 직접적으로 공급하여 투명한 전력망 구축이 가능하다. 이와 같이 북한의 현황 및 특수성을 고려할 때, 폐광산 활용 에너지 저장시설은 북한의 전력 공급 부족 문제를 효과적으로 활용할 수 있는 방안으로 볼 수 있다.

표 3.1. 북한주민의 에너지 소비구조와 실태
(빙현지, 이석기, 2017)

		소비자	국가공급 여부	공급실태	부족분 대체
조명	전기	전체주민	○	일부공급	양초, 석유등잔, 산업용 기름등잔
	가스	평양주민	○	일부공급	석유 시장구입
취사	석탄	지방도시주민	○	거의 미공급	나무, 대궐밥, 톱밥
	나무	농촌주민	○	거의 미공급	뱃짚, 옥수수짚 등
	석유	평양주민	○	일부공급	시장에서 자체구입
		일부지방주민	×	자체	-
	전기히터	일부주민	×	자체	-
난방	온수	평양주민	○	거의미공급	석유히터, 숯방울 등 자체
	석탄	지방도시주민	○	거의미공급	석탄, 나무, 대궐밥, 톱밥 등
	나무	농촌주민	○	거의미공급	일부 석탄가스에 의한 난방뱃짚, 옥수수짚, 톱대
	석유난로	일부주민	×	자체	-
가전제품	전기	전체주민	○	일부공급	자동차 배터리 충전 이용
배터리충전	전기	일부주민	×	자체	-
전기계봉	전기	가내수공업자	×	자체	-

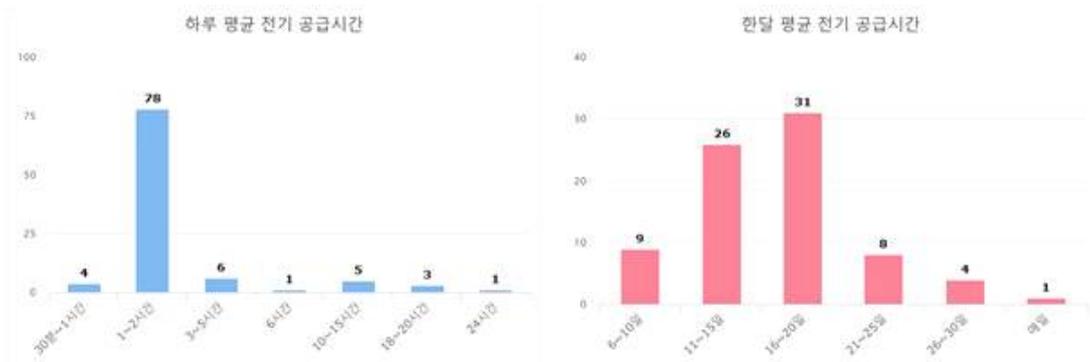


그림 3.1. 탈북주민 대상 평균 전력 공급시간 설문조사 (북한 전기산업 정보포탈시스템)

3.2 에너지 저장 및 발전설비 용량 분석

3.2.1 양수식 에너지 저장설비

양수식 에너지 저장은 전력 생산량이 소비량보다 많은 시간대에 잉여전력을 활용해 물을 상부 저수지에 저장한 후, 전력이 필요한 시간대에 상부 저수지에 저장된 물을 하부 저수지로 방류시키며 발전기를 가동하는 에너지 저장 방식이다 (그림 3.2). 양수식 에너지 저장은 타 에너지 저장방식에 비해 장기간·대용량의 에너지 저장이 가능해 많은 국가에서 에너지 저장방식으로 사용되고 있다. 남한 역시 1,000 MW 규모의 발전설비 용량을 보유한 양양 양수발전소를 비롯하여, 다수의 양수식 에너지 저장설비가 설치 및 가동되고 있다.

폐광산 부지에 양수식 에너지 저장설비를 설치할 경우, 광산 개발 과정에서 굴착된 지하갱도, 채굴장 등을 저수지, 수로 및 발전설비 설치 공간으로 활용 가능해 부지 확보 및 건설비용의 측면에서 많은 이점이 존재한다. 폐광산 부지에서의 양수식 에너지 저장 메커니즘은 각 채굴적 (광물의 채광으로 인해 생성되는 빈 공간) 간의 심도 차이를 물의 낙차로 이용하는 방식이다. 본 연구에서는 Jinyang et al. (2020)이 수행한 폐석탄광 활용 양수식 에너지 저장설비의 설계 파라미터를 참고하였으며, 해당 연구에서 구성한 에너지 저장설비의 개략도는 그림 3.3과 같다. 저수지 역할을 하는 상하부 채굴적의 심도 차이를 150m 로 설정했을 때, 단위 에너지 저장량 (regulating energy density, REPV)인 1.59 kWh/m^3 을 길이 100m, 높이 10m, 너비 6m 의 단일 채굴적에 적용하였다. 하루 1회의 양수와 배수가 이루어지는 에너지 저장 사이클을 가정하여, 해당 조건에서의 에너지 저장량인 9.54 MWh/day를 양수식 에너지 저장설비 용량으로 결정하였다.

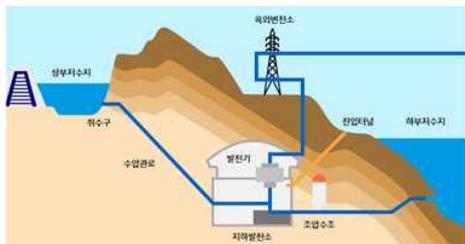


그림 3.2 양수발전소 구조도
(한국수력원자력(주))

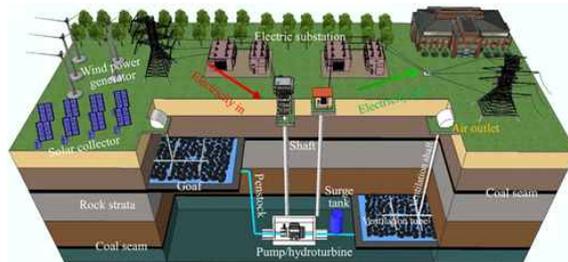


그림 3.3 폐석탄광 활용 양수식 ESS 개략도
(Jinyang et al., 2020)

3.2.2 중력식 에너지 저장설비

중력식 에너지 저장은 잉여전력을 활용해 무게추 등의 중량물을 시설 상부로 이동시킨 후, 이를 낙하시켜 발전기를 가동하는 기계식 에너지 저장 방식이다. 중력식 에너지 저장설비는 유사한 기계식 저장설비인 플라이휠 또는 압축공기저장 (Compressed Air Energy Storage, CAES)과 비교할 때 높은 기술력을 필요로 하지 않고 설비 구축이 간단하여, 상대적으로 기술·자본이 부족한 북한의 실정에 적합한 에너지 저장 방식으로 예상된다.

중력식 에너지 저장설비의 저장용량은 에너지 저장에 사용되는 중량물의 무게와 낙하 높이에 따라 이론적으로 결정할 수 있다. 본 연구에서는 Morstyen et al. (2019)의 폐광산 수직갱도를 활용한 중력식 에너지 저장설비 연구를 참고하였다. 그림 3.4과 같은 수직갱도 및 중량물 구조에서, 깊이(D) 300m 및 직경(d) 6m의 수직갱도와 3,000톤 무게의 중량물을 활용한 에너지 저장설비 규모를 가정하였다. 양수식 저장과 유사하게 하루 1회 중량물의 상승 및 낙하를 가정할 때, 그림 3.5와 같이 중력식 에너지 저장설비의 용량을 약 1.80 MWh/day로 결정하였다.

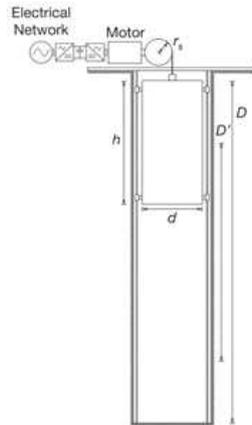


그림 3.4. 중력식 에너지 저장설비 내 수직갱도 및 중량물 구조 (Morstyn et al., 2019)
 (D: 수직갱도 깊이, D': 유효낙차, h: 중량물 높이, d: 수직갱도 직경)

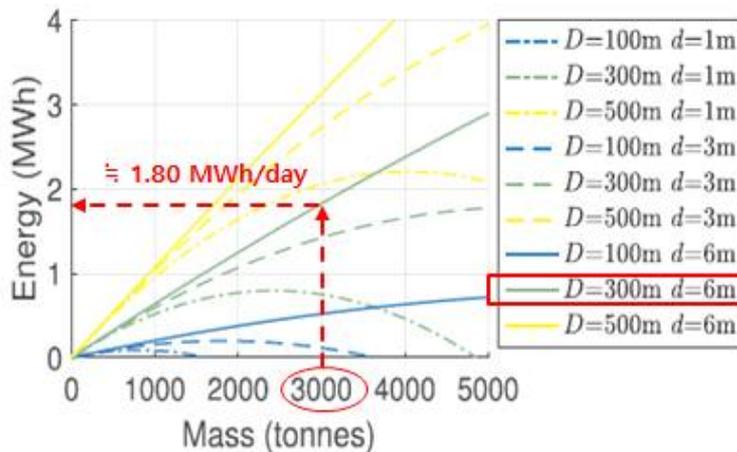


그림 3.5. 수직갱도 깊이, 직경 및 중량물 무게에 따른 중력식 에너지 저장설비 용량 (Morstyn et al., 2019)

3.2.3 풍력 에너지 발전설비

유휴 폐광산 부지를 활용한 전력 발전 방식 중, 풍력발전은 폐광산 부지의 넓은 여유 공간과 풍부한 풍력 자원량을 활용하기 용이한 방식이다. 북한 폐광산 부지 역시 풍력발전의 도입이 가능할 것으로 예상되나, 풍력발전 설비의 발전량 계산에 필요한 풍속, 온도 등의 기후 데이터의 획득이 제한되어 정확한 발전량을 추정할 수 없다. 이에 본 연구에서는 남한 강원도 지역의 폐광산 부지에서 조사된 풍력자원 잠재량이 북한의 경우와 유사할 것이라고 가정하여, 북한 폐광산 부지에서의 풍력 에너지 발전 설비 용량을 추정하였다.

송진영 외 (2014)는 남한 강원도 지역에 위치한 연곡, 물노, 부영 폐광산 부지를 대

상으로, 600kW 발전용량을 가지는 Nordex N43 풍력 터빈 1대를 연간 가동했을 때 총 발전량을 분석하였다. 분석 결과는 표 3.2와 같으며, 본 연구에서는 해당 연구에서 제시된 남한 폐광산 부지 3개소의 연간 풍력 발전량의 평균인 약 1,184.3 MWh/year를 복한 폐광산 부지의 풍력 터빈 1대당 풍력 에너지 발전설비 용량으로 결정하였다.

표 3.2. 남한 폐광산 부지 (연곡, 물노, 부영) 연간 풍력발전 파라미터 (송진영 외, 2014)

Type	Parameter	Booyoung	Mulno	Yeongok
Energy	Electricity exported grid in the first year (MWh/year)	873.0	1186.0	1494.0
Emission	Net annual GHG emission reduction (tCO ₂ /year)	408	557	698
Finance	First year income (10 ⁶ KRW)	226	308	386
	Net present value (10 ⁶ KRW)	5,318	7,776	10,102
	Equity payback (Year)	5.9	4.4	3.6

3.2.4 태양광 에너지 발전설비

태양광발전 역시 풍력발전과 함께 유휴 폐광산 부지를 활용한 전력 발전에 적극적으로 활용되는 방식이다. 특히 태양광발전은 시간대 별 발전량 편차에 따른 잉여전력의 발생이 많아, 해당 잉여전력을 효율적으로 저장 가능한 에너지 저장설비와의 연계성이 뛰어나다는 특성이 있다 (오명찬 외, 2018).

본 연구에서는 3.2.3절의 풍력 에너지 발전설비와 동일한 방법론을 적용하여, 송진영 외 (2014)가 남한 강원도 지역 폐광산 부지를 대상으로 수행한 태양광 발전량 분석 결과를 참고하였다. 발전용량 250W를 가지는 Samsung LPC250SM 태양광 패널을 2,400대 설치하여 풍력발전과 동일한 설비용량 (600kW)을 갖추었을 때, 각 폐광산 부지 조건에서 추정된 연간 태양광 발전량은 표 3.3과 같다. 본 연구에서는 조사 대상 폐광산 부지들의 연간 태양광 발전량의 평균인 약 809.6 MWh/year를 복한 폐광산 부지의 태양광 에너지 발전설비 용량으로 결정하였다.

표 3.3. 남한 폐광산 부지 (연곡, 물노, 부영) 연간 태양광발전 파라미터 (송진영 외, 2014)

Type	Parameter	Booyoung	Mulno	Yeongok
Energy	Electricity exported grid in the first year (MWh/year)	789.7	830.5	808.5
Emission	Net annual GHG emission reduction (tCO ₂ /year)	373	388	377
Finance	First year income (10 ⁶ KRW)	267	277	270
	Net present value (10 ⁶ KRW)	6,390	6,922	6,692
	Equity payback (Year)	5.3	5.1	5.2

3.2.5 총 에너지 저장 및 발전량

일반적으로 풍력·태양광 등의 신재생에너지는 시간과 계절에 따른 발전량 편차가 크게 나타난다. 따라서 발전량이 많은 시기의 잉여전력을 적절하게 활용 또는 저장하는 방안을 마련하는 것이 신재생에너지의 효율을 극대화하기 위해 필수적으로 요구된다. 본 연구와 같이 폐광산 부지에 에너지 저장시설을 설치할 경우, 앞선 3.2.1-3.2.4절에서 언급된 다양한 발전 및 저장설비를 연계하여 최종적인 에너지 산출량 (Load profile)을 그림 3.6과 같이 일정하게 유지하는 방안이 일반적으로 제안된다 (Jinyang et al., 2020). 본 연구에서는 풍력·태양광 발전과 양수식·중력식 저장을 동시에 적용한 에너지 저장시설을 설정하였다.

에너지 저장설비를 최대한으로 활용하는 상황을 가정할 때, 발전설비의 총 발전량은 확보된 저장설비 용량의 100% 규모를 갖추어야 한다. 앞서 결정한 설비용량에 따른 총 에너지 발전량은 약 1,993.9 MWh/year, 총 에너지 저장량은 약 4,139.1 MWh/year (연간 저장량 환산)으로 (표 3.4), 총 저장량이 발전량의 약 2.08배 규모를 가진다. 따라서 본 연구에서는 해당 비율로 에너지 발전설비의 규모를 증가시키는 형태의 시나리오를 구성하였다. 이때 상대적으로 단위 설비 (풍력터빈)당 발전량이 많은 풍력발전의 규모를 기준으로 태양광발전 규모를 조절하는 형태로 시나리오를 구성하였으며, 자세한 시나리오 구성 및 파라미터 수치는 4.1-4.2절에 제시하였다.

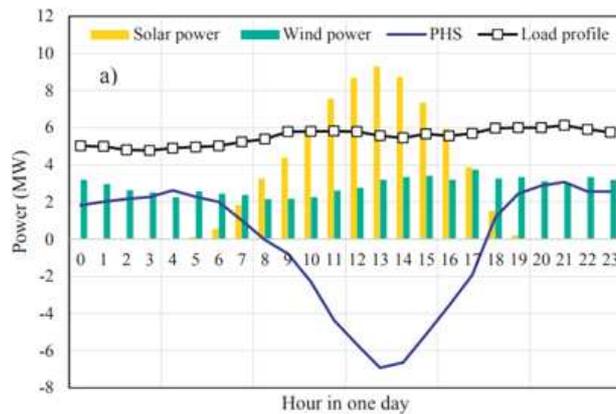


그림 3.6. 설비 종류 별 하루 중 에너지 발전, 저장량 변동 추이 (Jinyang et al., 2020)

표 3.4. 에너지 발전·저장설비에 따른 개별 발전·저장량 및 총 발전·저장량

분류	저장/발전기법	일간 저장/발전량 (MWh/day)	연간 저장/발전량 (MWh/year)	연간 저장/발전량 합 (MWh/year)
에너지 저장	양수식 ESS	9.54	3,482.1	4,139.1
	중력식 ESS	1.80	657.0	
에너지 발전	풍력발전	-	1,184.3	1,993.9
	태양광발전	-	809.6	

4. 시나리오 별 북한 폐광산 부지 안정성 분석

4.1 에너지 저장시설 설치 시나리오

현장 조건을 특정하기 어려운 북한의 특수성을 고려하여, 본 연구에서는 폐광산 부지 에너지 저장시설의 설치 변수를 크게 폐광산 입지·발전설비 규모·저장시설 심도의 3가지로 분류하여 시나리오 분석을 수행하였다. 먼저 폐광산 입지 조건 및 이에 따른 암반 물성을 2.2절에서 결정한 4종류의 폐광산 입지 후보별 조사 결과에 따라 결정하였다. 발전설비의 규모는 3.2.5절에서 언급된 총 발전량 조건 하에서, 풍력터빈이 각 1, 2, 3대 설치되는 경우를 가정하였다. 마지막으로 에너지 저장설비가 설치되는 폐광산 내 지하갱도 심도를 천부 (100m)와 심부 (200m)로 분류하였다. 최종적으로 총 24개 (4x3x2)의 폐광산 에너지 저장시설 설치 시나리오를 구성하여, 각 시나리오별 조건 하에서 폐광산 부지의 역학적 안정성을 분석하였다.

폐광산 입지 시나리오	발전설비 규모 시나리오	저장시설 심도 시나리오
함경북도 북부	풍력 터빈 1개 설치	천부 (100m)
함경도 경계부	풍력 터빈 2개 설치	심부 (200m)
평안남도 전역	풍력 터빈 3개 설치	
황해남도 서부		

그림 4.1. 북한 폐광산 에너지 저장시설 설치 시나리오 분류

4.2 안정성 분석기법 및 수치해석 파라미터

폐광산 부지의 역학적 안정성 분석에는 Rocscience사의 2차원 유한요소법 (Finite Element Method, FEM) 기반 수치해석 소프트웨어인 RS2를 활용하였다. 해당 소프트웨어는 암반·토양의 거동 해석에 특화되어, 본 연구에서 수행한 지표면 및 지하 갱도의 시설 하중에 따른 암반의 역학적 안정성 분석에 적합하다 (Rocscience, 2023).

암반의 역학적 안정성의 경우 암석의 거동 해석에 일반적으로 활용되는 파괴기준인 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 적용하여 분석하였다. Mohr-Coulomb 파괴기준식의 적용을 위해 각 폐광산 입지 조건별 시나리오에 사용한 파라미터는 표 4.1과 같으며, 이는 2.2절의 표 2.2에 제시된 데이터에 기초하여 결정되었다.

표 4.1. 북한 폐광산 입지 조건 별 Mohr-Coulomb 파라미터

지역	지질 분류	대표 암종	Mohr-Coulomb 파라미터	
			c (MPa)	ϕ (°)
함경북도 북부	두만중군 두만강복합체	화강섬록암	14.0	51.3
함경도 경계부	함경중군 단천복합체	대보화강암	24.3	53.6
평안남도 전역	양덕중군 북부 상원중군	장산규암	35.0	55.0
황해남도 서부	남림중군 남부 상원중군	흑운모편마암	12.9	47.5

폐광산 부지에 설치되는 발전 및 저장설비의 하중은, 폐광산 부지의 지표면과 지하 강도 바닥면에 작용하는 하중 경계조건 (boundary condition) 형태로 설정하였다. 각 발전설비 규모별 시나리오에서 풍력터빈의 설치 대수에 따른 연간 발전량 및 이에 따른 하중 조건은 표 4.2와 같다.

수치해석 모델에서 풍력터빈의 하중은 일반적인 풍력터빈의 하부 면적인 10m²(Guo et al., 2011) 영역에 작용하는 경계하중 형태로 설정하였다. 또한 2개 이상의 풍력터빈이 설치될 때, 풍력터빈 사이의 간섭을 최소화 할 수 있는 최적 설치간격은 풍향과 수직한 방향으로 로터 직경의 약 8-12배, 풍향과 평행한 방향으로 로터 직경의 약 2-4배로 알려져 있다 (Dunlap, 2018). 본 연구에서는 풍향과 평행한 방향으로 터빈을 배치하는 경우를 가정하여, Nordex N43 터빈의 로터 직경인 43m의 약 3배인 130m를 풍력터빈 간격으로 설정하였다.

태양광 설비의 경우, 본 연구에서 가정한 Samsung LPC250SM 태양광 패널의 면적인 1.6m²에 패널 설치를 위한 여유 공간 10%를 추가하여 단일 태양광 패널의 설치 면적을 계산하였다. 최종적인 태양광 패널 설치 면적은 정사각형 형태의 배치를 가정하여 표 4.3과 같이 결정하였다.

표 4.2. 풍력 터빈 및 태양광 패널 설치 대수에 따른 발전량 및 하중 조건

에너지 생산시설 설치 시나리오	풍력발전			태양광발전		
	터빈 수 (대)	발전량 (MWh/year)	하중 (톤)	패널 수 (대)	발전량 (MWh/year)	하중 (톤)
풍력 터빈 1대	1	1,184.3	108.0	8760	2,954.8	162.9
풍력 터빈 2대	2	2,368.6	216.0	5250	1,770.5	97.7
풍력 터빈 3대	3	3,552.9	324.0	1740	586.2	32.4

표 4.3. 풍력 터빈 및 태양광 패널 설치 대수에 따른 발전량 및 하중 조건

태양광 패널 개수 (대)	8,760	5,250	1,740
총 설치 면적 (m ²)	15,400	9,200	3,000
설치 부지 폭(m)	124	96	55

4.3 입지후보 별 안정성 분석 결과 및 결론

4.3.1 수치해석 모델링 개요

본 연구에서는 앞서 제시한 24개의 폐광산 에너지 저장시설 설치 시나리오 별 역학적 안정성 분석을 위하여, 그림 4.2와 같이 RS2 소프트웨어를 활용한 수치해석 모델을 구성하였다. 분석 대상 북한 폐광산 부지 모델은 전체 심도 600 m, 너비 1000 m로 설정하였다. 에너지 발전설비의 경우, 풍력터빈 및 태양광 패널이 폐광산 부지 지표 양쪽에 설치되는 형태로 하중조건을 설정하였으며, 에너지 저장설비의 경우 3장에서 설정한 규모로 폐광산 부지 지하 양쪽에 설치되는 형태로 설정하였다. 이후 Mohr-Coulomb 파괴기준 하에서 에너지 저장시설의 역학적 안정성을 분석하였으며, 이때 적용한 시나리오별 하중 조건은 4.2절에 제시된 내용과 같다. 풍력-태양광 발전설비 간 간격은 100 m, ESS 설비 간 간격은 400 m로 설정하였다.

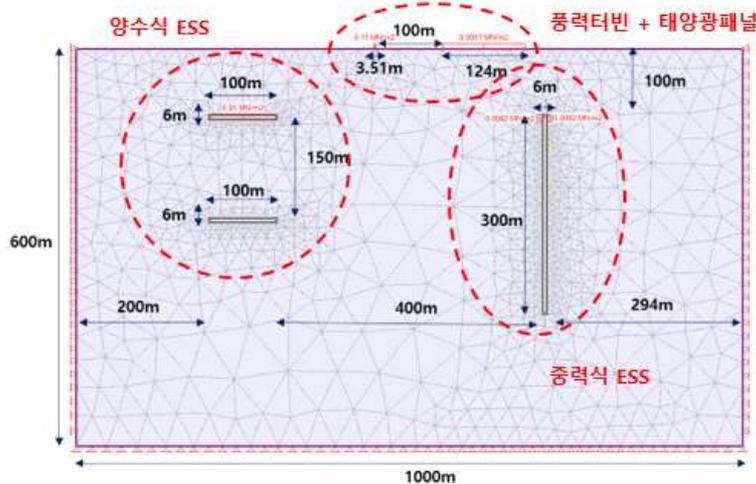


그림 4.2. 북한 폐광산 부지 내 에너지 저장시설 구조 및 하중조건 설정 예시
(풍력터빈 1개, 심도 100 m 조건)

4.3.2 시나리오별 수치해석 결과

생산시설 규모 및 저장시설 심도 조건에 따른 안정성 변동 여부를 분석하기 위해, 풍력 터빈 개수와 심도 변화에 따른 각 부지의 안정성을 분석하기 위하여 강도지수 (strength factor, Mohr-Coulomb 암반강도/최대응력)을 해석하였다.

- 함경북도 북부

함경북도의 경우 에너지 생산시설의 경우, 설치 조건에 관계없이 폐광산 부지 암반

의 역학적 안정성에 유의미한 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 또한 천부 (심도 100 m)에 비해 심부 (심도 200 m)에 ESS 설치 시, 갯도 주변부 암반의 역학적 안정성이 두드러지게 감소하는 것으로 분석되었다 (그림 4.3).

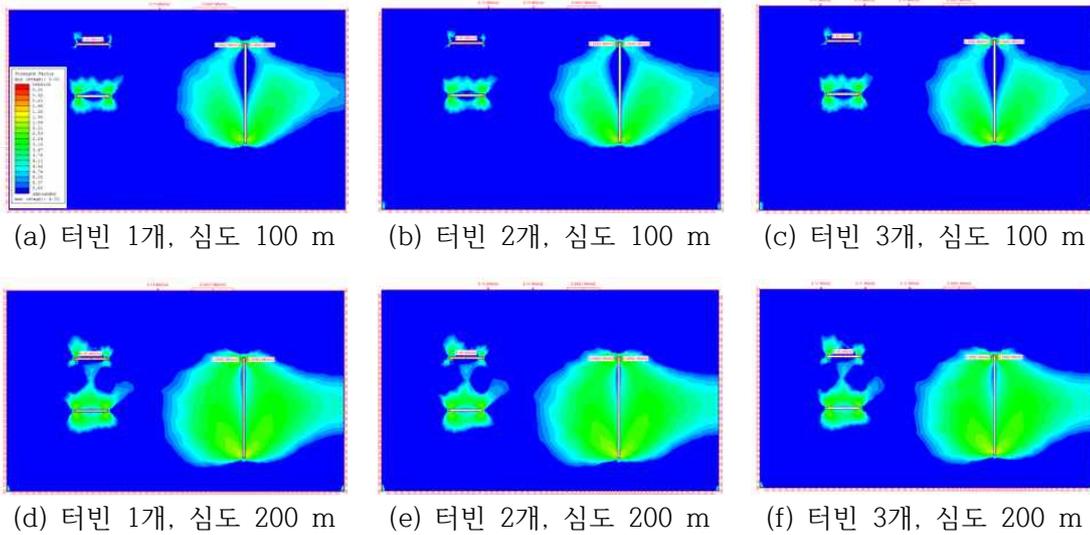


그림 4.3. 함경북도 북부에서 풍력 터빈 설치 대수와 심도 조건에 따른 강도지수 해석 결과

- 함경도 경계부

함경도 경계부 조건에서는 상대적으로 강한 암반 물성 조건으로 인해, 갯도 주변 안저서 저하 영역의 분포가 함경북도 북부 입지 시나리오에 비해 크게 감소하는 경향성을 보였다. 또한, 심부 심도 조건 적용 시, 수평 및 수직갯도 전체 영역에서 역학적 안정성이 유의미하게 저하되는 경향성을 보였다 (그림 4.4).

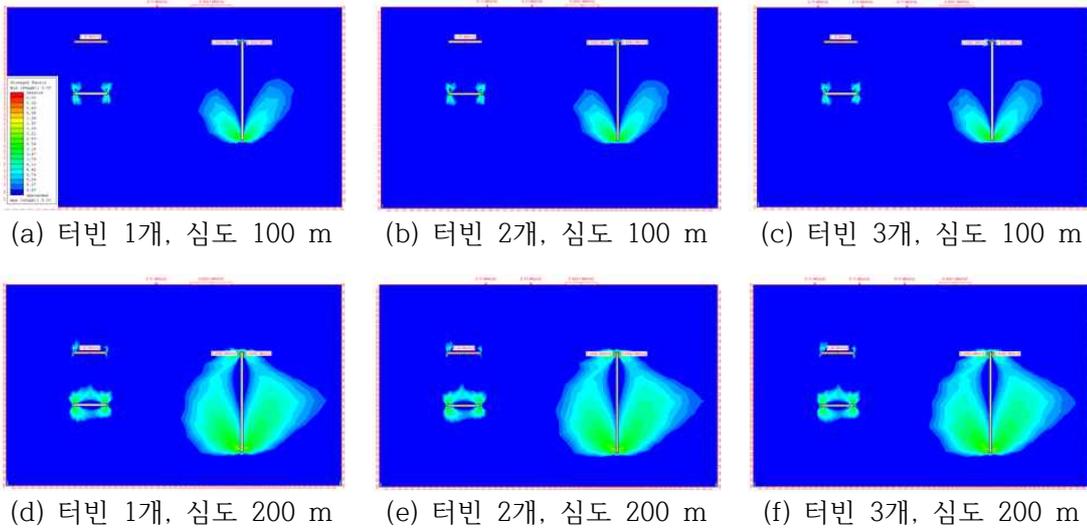


그림 4.4. 함경도 경계부에서 풍력 터빈 설치 대수와 심도 조건에 따른 강도지수 해석 결과

- 평안남도 전역

평안남도 전역 조건에서는 본 연구에서 설정한 암반 물성조건 중 가장 높은 UCS 및 점착력 수치를 적용하여, 다른 폐과산 입지 시나리오에 비해 높은 역학적 안정성이 관측되었다. 또한 심부 조건에서도 역학적 안정성이 저하되는 영역이 확대됨이 관측되었으나, 그 분포는 갯도 끝부분에 한정되는 경향성을 보였다 (그림 4.5).

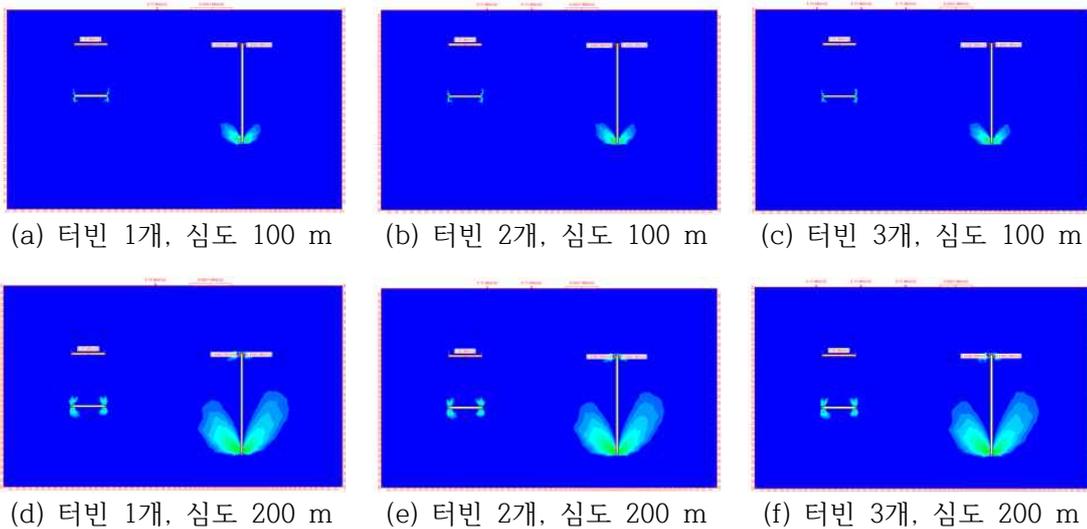


그림 4.5. 평안남도 전역에서 풍력 터빈 설치 대수와 심도 조건에 따른 강도지수 해석 결과

- 황해남도 서부

황해남도 서부 조건에서는 상대적으로 약한 암반 강도 및 물성 조건으로 인해, 다른 폐광산 입지와 비교할 때 갯도 주변 암반의 취약 영역이 크게 증가함을 확인하였다. 마찬가지로, 심부 ESS 설치 시 암반의 역학적 안정성이 감소함을 확인하였으며, 풍력 터빈 개수를 증가시킬 경우 각 ESS 설치 갯도 사이 암반의 안정성 역시 감소하는 것으로 분석되었다 (그림 4.6).

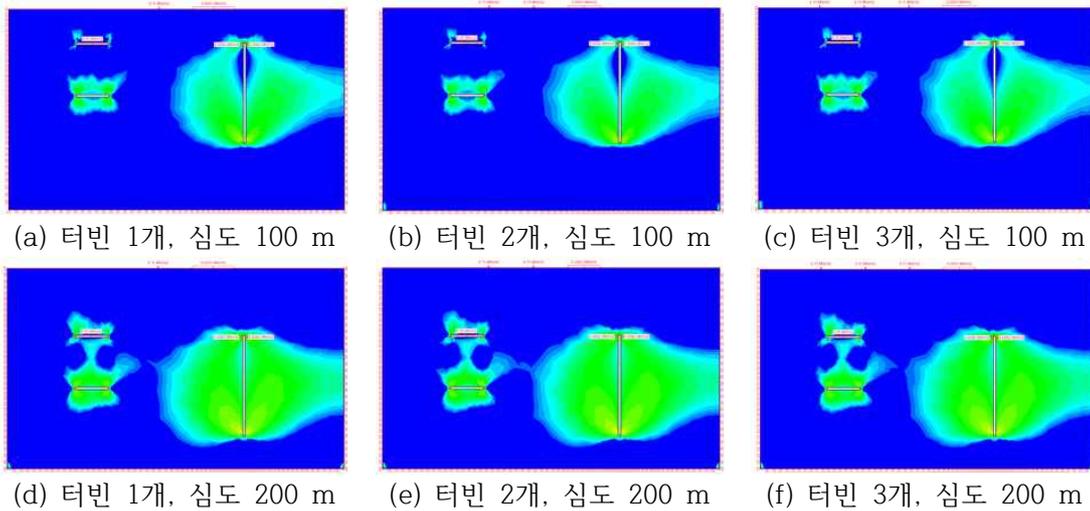


그림 4.6. 황해남도 서부에서 풍력 터빈 설치 대수와 심도 조건에 따른 강도지수 해석 결과

4.4 결과 분석

북한 폐광산 부지에 대한 에너지 저장시설 도입 가능성 분석 결과, 대부분의 시나리오에서 폐광산 부지 암반의 강도지수가 1 이상의 값을 가져 역학적 안정성을 확보 가능함을 확인하였다. 이는 본 연구에서 가정한 에너지 저장시설의 규모가 상대적으로 작은 규모 (풍력터빈 최대 3대 설치 가정, 단일 수평 및 수직갯도만을 활용한 에너지 저장설비 가정)이기 때문으로 판단되며, 향후 보다 대규모의 에너지 저장시설의 도입을 고려할 경우 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 분석된다.

본 연구에서 가정한 에너지 저장시설 규모 하에서, 발전설비 (풍력터빈, 태양광패널)의 규모 변동은 폐광산 부지의 역학적 안정성에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 발전설비의 규모는 역학적 안정성과 관계없이 시설의 생산성 및 경제성을 최대화하는 형태로 구축하는 것이 합리적으로 판단된다.

폐광산 입지 조건의 경우, 상대적으로 취약한 암반 물성을 보이는 입지 (황해남도 서부, 흑운모편마암 암반)에서 암반의 강도지수가 넓은 범위에서 감소하는 것이 확인되었다. 또한 해당 입지에서는 일부 시나리오에서 수평 및 수직갯도 사이의 암반에서도 강도지수가 감소함이 확인되었다. 이는 본 연구에서 적용한 암반 물성에 비해 취

약한 암반 물성 또는 근접한 지하갱도 간격을 고려할 경우, 지하갱도 주변 암반뿐만이 아닌 갱도 사이 암반의 역학적 안정성도 필수적으로 고려되어야 함을 시사한다.

또한 심부 심도를 가정한 시나리오에서 암반의 역학적 안정성이 크게 감소하는 경향성을 보였으며, 이는 수직갱도 주변 암반에서 특히 두드러졌다. 따라서 수직갱도를 활용한 중력식 에너지 저장설비를 설치 시, 최대한 얇은 심도의 수직갱도를 활용하는 것이 암반의 역학적 안정성 확보 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

5. 광산지의 산악 중력 에너지 저장 시설로의 활용 잠재성 평가

5.1 광산지에서의 산악 중력 에너지 저장 시설 활용

원격지에 위치한 광산에서 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지 기술을 도입하는 것은 친환경성과 에너지 자립성 측면에서 장기적인 이점을 지닌다. 그러나 재생에너지의 간헐적인 공급과 계절적 변화를 고려할 때 추가적인 유연한 에너지 솔루션이 필요하다. 산악 중력 에너지 저장 시설(Mountain Gravity Energy Storage, MGES)을 활용하여 재생에너지원과 연계한다면, 발전량을 늘리고 전력 공급을 안정화시킬 수 있다. MGES는 충전 모드에서 고체 물질을 높은 곳으로 이동시키고, 필요할 때 이를 낮은 곳으로 이동시켜 전기를 생산하는 방식이다. Hunt et al. (2020)에 의해 소개된 이 기술은, 모래나 자갈과 같은 물질을 에너지 저장 매체로 사용하여 장기간에 걸쳐 에너지를 저장할 수 있다.

MGES 시스템은 산 아래와 꼭대기에 위치한 저장 장소 간에 모래나 자갈을 운반할 수 있을만큼 도달 거리가 충분한 가파른 협곡 또는 산 가장 자리에 두 개의 크레인을 건설하는 것으로 구성된다. 이 시스템은 하부 저장 장소에서 상부 저장 장소로 물질을 운반함으로써 위치 에너지로 에너지를 저장하고, 반대로 물질을 하부 저장 장소로 낮추어 전기를 생산한다. 광산지는 MGES 구축에 적합한 장소이다. 광산 주변에는 에너지 저장 매체로 활용할 수 있는 재료가 풍부하며, 높은 고도 차이를 이용할 수 있다. 또한, 추가적인 굴착 비용 없이도 충분한 수두 차이를 확보할 수 있다.

본 연구는 북한 광산의 MGES 시스템의 적용 가능성과 주변 재생에너지 설비 설치의 잠재력을 분석했다. 이 시스템에서 수두 차이는 에너지 생산량을 산출하는 데 중요한 요소이다. 하지만, 북한 폐광산에 대한 상세한 정보가 부족하기 때문에, 북한 지하자원넷에서 제공하는 광산 위치 데이터를 사용하여 위경도를 파악하였다. 이 데이터는 폐광산과 현재 운영 중인 광산 정보가 통합된 자료로, 총 광산의 수는 1,129개이다.

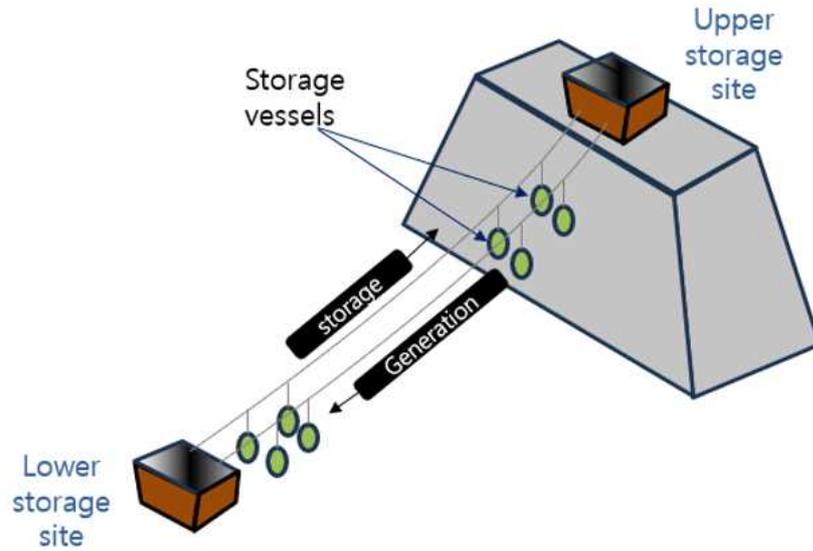


그림 5.1. MGES (Mountain gravity energy storage) 시스템 스케치

5.2. MGES 잠재량 분석

MGES에서 저장되는 에너지는 식 (1)을 통해 계산할 수 있으며, 수두 차이와 저장 질량이 클수록 더 많은 에너지를 저장할 수 있다. 식에서 E 는 저장된 에너지(J), m_s 는 모래나 자갈의 질량(kg), h 는 높이 차(m), g 는 중력 가속도(m/s^2)를 나타낸다. 여기에 e_h 는 시스템에서 발생하는 수두 손실, e_s 는 시스템의 효율을 의미하며, 이는 표준적으로 80~60% 범위의 효율성을 갖는다. 본 연구에서는 MGES 시스템이 효율적으로 설계되었다고 가정하여 시스템 효율 값을 85%로 설정하였다 (Hunt et al., 2020).

생성되는 전력은 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있으며, 여기서 전력(P , 단위: W)은 저장된 에너지(E , 단위: J)를 낮추는 데 걸리는 시간(T , 단위: sec)으로 나눈 값으로 표현된다. 물체의 자유 낙하 속도가 약 33 m/s에 근접할 경우, 시스템의 효율성은 현저히 감소하여 거의 0에 가까워진다. 따라서 높은 효율을 달성하기 위해서는 속도가 10 m/s 이하가 되도록 조절하는 것이 중요하다.

$$E = m_s \times h \times g \times e_h \times e_s \quad (1)$$

$$P = E / T \quad (2)$$

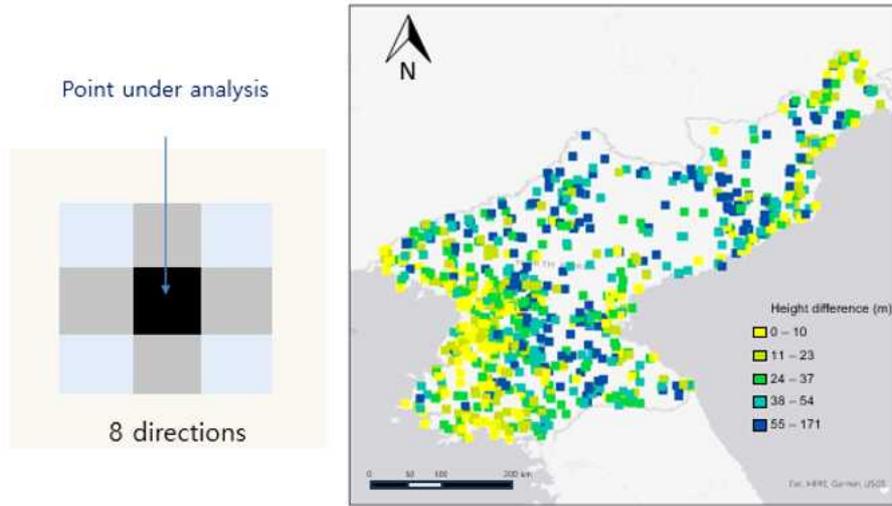


그림 5.2. Point under analysis 분석 방법과 북한 광산지 높이 차이 분포

MGES 시스템에서 저장되는 에너지는 위치 에너지에 의해 발생하므로 높이 차가 중요한 파라미터이다. 이를 계산하기 위해, 북한의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 활용하여 상부 및 하부 저장소 간의 높이 차이를 측정하였다. Point under analysis 방법을 사용하여 광산 위치로부터 90 m 거리에서 8개 방향으로 최대 높이 차이를 비교하였다. 90 m 이격거리 설정은 Hunt et al. (2020)의 연구 방법을 참조하였으며, 북한 DEM 데이터는 ASTERGDEM의 공간 해상도 30 m 위성 기반 데이터를 사용하였다 (METI and NASA, 2019).

표 5.1. MGES 시스템 구성에 따른 장기 잠재량

Sand or gravels (tons)	Height (m)	Long-term energy storage (MWh)
5,000	55	0.60
	95	1.04
	135	1.48
	175	1.92
50,000	55	6.05
	95	10.44
	135	14.84
	175	19.23

MGES 시스템의 성능은 에너지 저장 매체의 무게와 높이 차이에 비례한다. 에너지 저장 매체의 무게는 Hunt et al. (2020)을 참고하여 5,000 ton과 50,000 ton으로 설정하여 두 경우에 대해 계산하였다. 북한 내 광산에 대한 분석 결과, 에너지 저장 시설과 광산 주변 지역 간의 높이 차이는 0 m부터 171 m까지 분포한다. 경사도가 60% 이상일 때 경제성이 확보되므로, 이에 따라 55 m 이상의 높이 차이를 기준으로 하여 40 m 간격으로 발전 잠재량 분석을 수행하였다. 높이 차이가 175 m이고 무게가 50,000 ton인 경우, 장기 에너지 저장 잠재력은 약 20 MWh에 이를 수 있다.

6. MGES와 연계한 재생에너지 발전설비 분석

6.1 MGES 인근 태양광 발전 적지 선정

태양광 발전은 친환경적인 에너지 공급 수단으로, 원격 지역에 위치한 광산에 전력을 공급하는 데 필수적이다. 또한, 에너지 저장 시설과 결합할 경우 전력 공급의 불안정성을 완화하는 데 도움이 된다. 중력 에너지 저장 시설 인근의 태양광 발전 적지 선정 시, 경사각, 경사 방향, 인접성 및 도로와의 이격 거리 등을 고려했다. 이러한 각 요소는 지리 정보 시스템(Geographic Information Systems, GIS)의 불리언(Boolean) 연산을 사용하여 적지를 도출하는 데 활용되었다. 본 연구에서는 태양광 시스템 설치 시 사면의 안전성을 확보하기 위해 지형의 경사각이 10° 이하인 지역을 선정하였다(환경부, 2018). 또한, 일사량 도달을 극대화하기 위하여 북반구의 지리적 특성에 맞추어 경사 방향을 남향($135^\circ \sim 225^\circ$)으로 설정하여 설치 장소를 분석하였다. 주민의 불편을 최소화하기 위하여 설치 장소는 도로로부터 최소 100m 이상 떨어진 곳으로 정하였고, 송배전 비용을 최소화하기 위해 MGES 시설로부터 반경 1km 이내에 위치한 지역을 대상으로 하였다. 선정된 태양광 설치 적지에 대하여 태양광 발전량을 계산할 때는 외기 복사량을 고려한 물리 모델을 기반으로 한 연간 일사량을 ArcGIS Pro의 Solar radiation 계산 방법을 참고하여 산출하였으며, 지형에 의한 그림자 효과를 포함하여 일사량 감소를 고려하였다(ESRI, 2022), 일사량에서 태양광 발전량으로의 전환 시에는 25%의 발전 효율을 가정하였다(Gilman, 2020).

1,129개 광산 인근의 태양광 발전 적지에서 연간 생산 가능한 에너지는 평균적으로 27 MWh로 추정되었으며, 이러한 분포는 그림 6.1에서 확인할 수 있다.

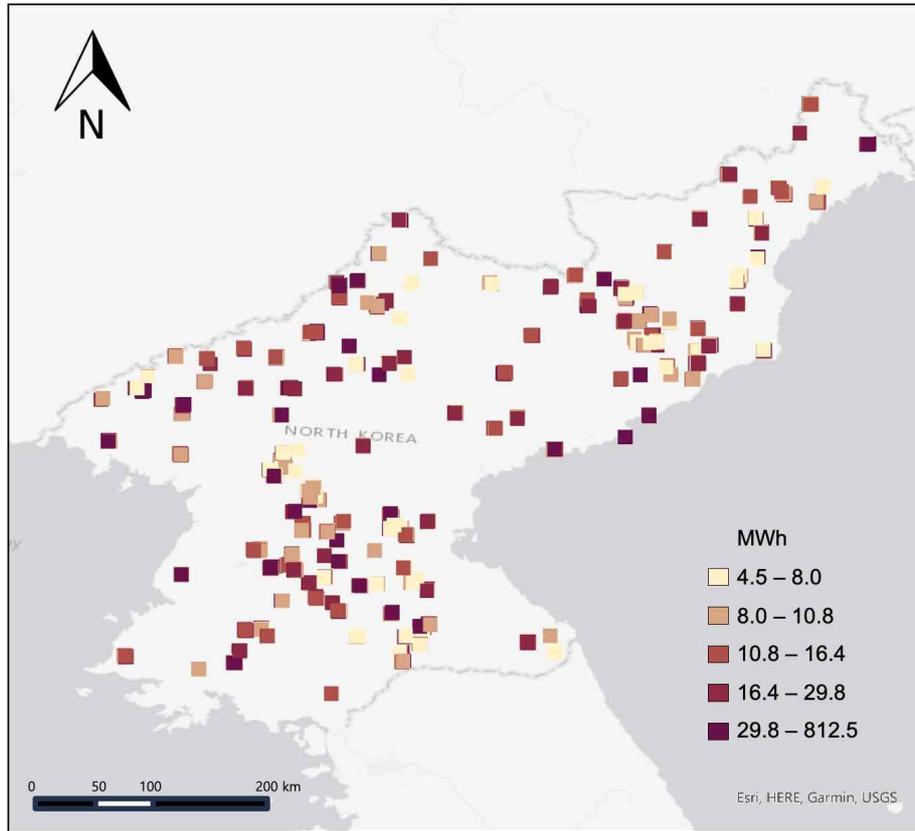


그림 6.1 MGES 인근 연간 태양광 발전 잠재량

6.2 중력에너지저장시설 인근 풍력 발전 설비 적지 선정

풍력 발전은 산악 지역에 위치한 북한 광산에서 높은 풍속을 활용하여 발전량을 얻을 수 있는 수단이다. 에너지 저장 시설과의 연계를 통해 전력 수급의 안정화에 기여할 수 있다. 중력 에너지 저장 시설 인근의 풍력 발전 적지 선정 과정에서는 경사각, 경사 방향, 인접성, 도로와의 이격 거리를 고려하여 GIS boolean 연산을 통해 분석하였다. 풍력 발전기의 설치를 위한 사면 안전성 확보를 중점으로, 지형의 경사각이 10° 이하인 지역을 우선적으로 선정하였다(KEI, 2019). 또한, 주민의 생활 불편을 최소화하고, 풍력 발전기 진입 도로 개설의 효율성을 고려하여 설치 장소는 도로로부터 최소 100m 이상, 최대 2km 이내의 거리에 위치하도록 정하였다(KEI, 2019). 송배전 비용의 최소화를 위해 MGES 시설로부터 반경 1 km 이내에 위치한 지역을 설치 후보지로 선정하였다.

풍력 터빈의 출력은 풍속의 세제곱에 비례하며, 풍속 데이터는 북한통계포털에서 제공하는 10년간(2013-2022)의 연평균 풍속 데이터를 활용하여 북한 내 27개 지점에 대해 분석하였다. 풍력 발전 잠재량 계산에는 UNISON 터빈 모델 113의 파라미터를 사용하였으며, 북한의 10년 연평균 풍속이 1.47 m/s로 나타나 저풍속에 적합한 모델의 파라미터를 고려하여 결정하였다. 로터의 직경은 113 m, 터빈의 출력 용량은 2.3

MW이다. 풍속의 경우, 터빈 허브 높이 83.5 m에 맞춰 높이 보정을 진행한 값을 사용하였다. 발전량 계산은 식 (3)과 같이 계산되며, 여기서 A는 풍력 발전기의 바람에 수직인 면적(m²), v는 풍속(m/s), ρ는 공기 밀도(kg/m³)이다. 풍력 터빈 당 차지하는 면적은 한 방향으로 3개의 회전자 직경, 다른 방향으로 10개의 회전자 직경을 고려하여 평균 위치 값을 이용하여 계산하였다 (Dunlap, 2018). 발전 효율 (μ)은 식 (4)와 같이 계산되며, 여기서 C는 터빈 효율, k_w 후류 손실, k_m 기계적 손실, k_e는 터빈의 전기적 손실, k_{e,t}는 그리드 손실, k_t는 유지보수로 인한 손실값이며, 이에 대한 값은 Haider et al. (2022)을 참고하였다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \times A \quad (3)$$

$$\mu = (1 - k_m) \times (1 - k_e) \times (1 - k_{e,t}) \times (1 - k_t) \times (1 - k_w) \times C_p \quad (4)$$

$$\text{Annual } P_{\text{output}} = \mu \times P_{\text{wind}} \times \text{FLH(Full Load Hour)} \quad (5)$$

풍력 발전소 설치 적합 지역 분석 결과, 설치 가능 면적은 평균 0.32 km²로 산정되었다. 풍력 발전은 평균 연간 68 MWh의 발전 잠재량을 가지고 있다고 추정되었다. 그러나 이는 북한의 실제 토지 이용 현황 및 환경적 영향, 설치 제한 지역을 고려하지 않고 오로지 도로와의 거리만을 기준으로 산정한 것이므로, 실제 설치 가능한 면적은 과대 추정될 수 있다.

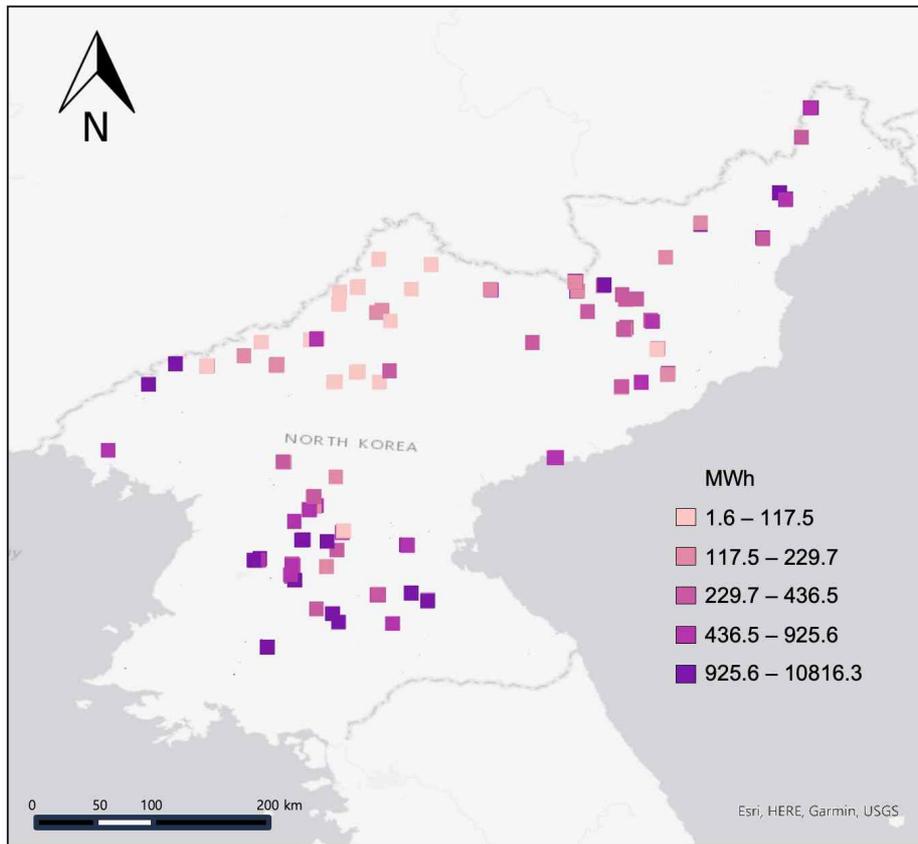


그림 6.2 MGES 인근 연간 풍력 발전 잠재량

6.3 연구 결과

본 연구에서는 풍력 및 태양광 발전의 잠재력과 MGES를 통한 장기 에너지 저장의 가능성을 조합하여 분석하였다. 그림 6.3에서는 북한 자강도 자강군에 위치한 동남광산을 대상으로 한 MGES의 잠재적 활용 사례를 보여준다. 이 사례에서 MGES는 연간 6.1 MWh의 에너지를 저장할 수 있는 것으로 나타났으며, 풍력 발전은 212 MWh, 태양광 발전은 MGES 인근 네 개의 구역에서 7.4 ~ 18.7 MWh의 에너지를 생산할 수 있는 잠재력이 있다고 평가되었다.



- 풍력 발전
- 태양광 발전
- 동남광산

그림 6.4 동남광산 인근 태양광 및 풍력 발전 잠재량

표 6.1 동남광산 인근 태양광 및 풍력 발전 잠재량

	Specifications	Long term energy (MWh)
GES	Height: 66 m	6.1
	Mass: 50,000 ton	
Wind	Area: 0.3 km ²	212
	Windspeed: 1.4 m/s	
Solar	Area: 0.013 km ²	18.7
	kWh/m ² /year: 6.22	
	Area: 0.007 km ²	10.7
	kWh/m ² /year: 6.26	
	Area: 0.005km ²	7.6
	kWh/m ² /year: 5.93	
Area: 0.005 km ²	7.4	
kWh/m ² /year: 5.75		

본 연구에서는 경제성을 충분히 확보하기 위해 높이 차가 55 m 이상인 광산만을 선정하여 MGES의 잠재량을 분석하였다. 선택된 광산 인근 1 km 이내 영역에 대해 GIS 분석을 진행하였고, 이를 통해 태양광 및 풍력 발전 설비의 설치 가능 면적과 장기 에너지 생산량을 파악하였다. 연간 평균 풍력 발전 잠재량은 68 MWh, 태양광 발전 잠재량은 평균 27 MWh이며, 1,129개 광산에 설치될 중력에너지 저장 시설의

평균 잠재 에너지량은 3.6 MWh(무게추 50,000 ton 기준)로 추정되었다. 이는 재생에너지 설비의 설치 가능 면적 산정 시 단순한 지형 조건과 도로 이격거리만을 고려한 결과로, 재생에너지 잠재량이 과대 산정되었을 가능성을 시사한다.

6.4 결론 및 제언

MGES는 장기간 에너지 저장이 가능하며, 태양광과 풍력 등 재생에너지와 결합될 경우 재생에너지의 변동성을 균형 있게 조절할 수 있을 것으로 예상된다. 대부분의 폐광산이 산지에 위치하고 인근 지역과의 높은 높이 차를 가지고 있기 때문에, 광산지의 재료를 에너지 저장 재료로 활용하는 것이 가능하며, 이는 MGES 설치에 적합하다고 판단된다. MGES는 풍력과 태양 에너지의 전력 공급에서 계절적 변화에 대한 균형을 맞추는 역할을 하는 저장 솔루션으로 활용될 수 있다. 적합한 산악 지역에서는 풍속이 높아 풍력 발전에 유리하지만, 산의 차광 효과와 산간 지역의 구름 형성으로 태양광 발전에는 불리한 조건이 될 수 있다.

참고문헌

- (1) 국토지리정보원, 2020, 대한민국 국가지도집 II
- (2) 김명균, 2015, 거창화강암의 역학적 특성에 관한 연구, 터널과 지하공간, 25(1), 24-36.
- (3) 문승일, 2018, 남과 북을 하나로 잇는 새로운 전력망, 전기산업 통일연구협의회 제7, 8차 회의 기조연설
- (4) 방경진, 2018, 북한 광물자원과 남북 경제 공동번영의 길, 삼화프린트
- (5) 빙현지, 이석기, 2017, 북한 재생에너지 현황과 시사점, 산업연구원
- (6) 서용석, 윤현석, 김동규, 권오일, 2016, 국내에 분포하는 암반의 물리, 역학적 특성 분석, 대한지질공학회지, 26(4), 593-600.
- (7) 선우춘, 류동우, 김형목, 김기석, 2011, 국내 화강암의 지반공학적 특성 및 암반분류법과의 상관성에 관한 연구, 터널과 지하공간, 21(3), 205-215.
- (8) 송진영, 최요순, 장미향, 윤석호, 2014, 강원도 연곡, 물노, 부영 폐광산 지역에서의 풍력발전과 태양광발전의 잠재성 비교, 한국자원공학회지, 51(4), 525-536.
- (9) 오명찬, 김성민, 구영현, 박형동, 2018, 북한 검덕광산 인근 지역 태양광 잠재량 분석 및 최적 부지 선정, 신재생에너지, 14(3), 44-53.
- (10) 이원진, 선종선, 정형섭, 박순천, 이덕기, 오관영, 2018, 고해상도 위성영상을 활용한 북한 6차 핵실험 이후 지표변화 관측, 대한원격탐사학회지, 34(6) 1479-1488.
- (11) 장미향, 최요순, 박형동, 고와라, 2013, 강원도 폐광산 지역의 풍력발전 잠재성 평가, 한국자원공학회지, 50(4), 470-481.
- (12) 정우진, 2014, 북한 광물자원 개발·가공 분야의 투자 잠재력 연구, 에너지경제연구원
- (13) 한국지질자원연구원, 2016, 잃어버린 시간을 찾아서: 광산, 지질 자원 사람, 154.
- (14) 국가통계포털, 2023, '북한통계 - 경제활동별 실질 국내총생산', (2023-10-19 접속)
- (15) 국가통계포털, 2023, '북한통계 - 주요 광종 광산 수', (2023-10-19 접속)
- (16) 박성준, 2020-12, 폐광지 미래 먹거리 '스마트 팜', G1방송, http://www.g1tv.co.kr/news/?newsid=238372&mid=1_207_3, (2023-11-27 접속)
- (17) 북한 전기산업 정보포탈시스템, '북한 전기산업 현황 - 탈북주민 설문조사', 2023-10-06 접속
- (18) 북한지하자원넷, '북한 지하자원 및 광산 - 북한광산 분포', (2023-10-25 접속)
- (19) 황미정, 2023-07, 태백상의, 폐갱도를 활용한 '지하 정부 데이터센터' 구축 건의서 제출, 강원신문, <https://www.gwnews.org/news/articleView.html?idxno=237929>, (2023-12-18 접속)
- (20) Guo. L., Uang, C., Elgamal, A., Prowell, I., Zhang, S., 2011, Pushover Analysis of a 53 m High Wind Turbine Tower, Advanced Science

- Letters, 4, 1-7.
- (21) Fan., Jinyan., Heping, X., Jie. C., Deyi, J., Cunbao, Li., Tiedeu, W. N., Ambre, J., 2020, Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs, *Applied Energy*, 258, 114007.
 - (22) Morstyn, T., Chilcott, M., McCulloch, M. D., 2019, Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts, *Applied Energy*, 239, 201-206.
 - (23) Rocscience, 2023, RS2 User Guide
 - (24) USGS, 1994-2019, Mineral Yearbook vol.3: The Mineral Industry of North Korea
 - (25) Zhang, Y. B., Zhai, M. G., Wu, F. Y., Zhang, X. H., Li, Q. L., Peng, P., Zhao, L., Zhou, L. G., 2021, 북한지역 고생대-중생대 화성암 및 퇴적암에 대한 종합검토, *지질학회지*, 57(4), 523-544.
 - (26) Nield, D., 2017-03, Germany is converting a coal mine into a massive renewable energy battery, *ScienceAlert*, <https://www.sciencealert.com/germany-is-converting-a-coal-mine-into-a-massive-renewable-energy-battery>, (2024-01-04 접속)
 - (27) Hunt, J. D., Zakeri, B., Falchetta, G., Nascimento, A., Wada, Y., & Riahi, K. (2020). Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short-and long-term storage technologies. *Energy*, 190, 116419.
 - (28) The Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 3 (GDEM 003), <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (2023-05-07 접속)
 - (29) 환경부, (2018), 육상태양광발전사업 환경성 평가 협의지침, http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey&searchValue&menuId=10259&orgCd&condition.deleteYn=N&seq=7160 (2023-05-08 접속)
 - (30) Gilman. P, Dobos. A, DiOrío. N, Freeman. J, Janzou. S, Ryberg. D, (2020), SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update, National Renewable Energy Laboratory, pp.13-19.
 - (31) 이상범, (2019), 풍력발전 환경영향과 입지 가이드라인, 한국환경정책평가연구원 (Korea Environmental Institute, KEI)
 - (32) UNISON, U113 Platform, https://www.unison.co.kr/product/2MW_Platform_U113 (2023-05-08 접속)
 - (33) Haider, I., Siam, M. S. I., Nuhel, A. K., Hriday, T. A., & Shaha, D. (2022). Distributed Hybrid Power System Integrated with Smart Microgrid. In 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS) (pp. 1333-1340). IEEE.