



[2018-9-PV-006]

북한 검덕광산 인근 지역 태양광 잠재량 분석 및 최적 부지 선정

오명찬¹⁾ · 김성민²⁾ · 구영현¹⁾ · 박형동^{1),3)*}

Analysis of Photovoltaic Potential and Selection of Optimal Site near Gumdeok Mine, North Korea

Myeongchan Oh¹⁾ · Sung-Min Kim²⁾ · Young-Hyun Koo¹⁾ · Hyeong-Dong Park^{1),3)*}

Received 1 May 2018 Revised 9 July 2018 Accepted 6 August 2018

ABSTRACT Although North Korea has various mineral resources, mine operation is difficult due to a lack of the latest technology and equipment and the aging of infrastructure facilities. In particular, the lack of power supply has been highlighted as a major cause of difficulty in mine operation. If an independent electricity generation system is constructed using photovoltaic energy, it would be possible to supply electricity smoothly without restructuring the backward infrastructure facilities. This study examined the solar energy potential near Gumdeok mine, which is the largest zinc deposit in North Korea. Optimal site selection for a photovoltaic system and estimation of electricity generation and construction cost were also performed. The largest optimal area in the study area is the farmland in the southeast of the mine. If a solar power system is constructed in all of the optimal areas, it would be possible to construct a system with a capacity of 129 MW, which is expected to provide approximately 50% of the power required in Gumdeok mine. The results of this study can be used as a new alternative to power shortages in North Korea. The results are also expected to help make various decisions and policies related to North Korea.

Key words Solar Energy(태양 에너지), Photovoltaic(태양광), Potential(잠재량), North Korea(북한), Optimal Site Selection(최적 부지 선정), Mine(광산)

Nomenclature

A : area, m²

AE : annual electricity generation, kWh/year

DAR : dc to ac ratio, none

GCR : ground cover ratio, none

I : irradiance, Wh/m²/day

IE : inverter efficiency, %

NP : nominal power, kW

LU : land use percentage, %

OL : other losses, %

PE : panel efficiency, %

T : panel temperature, °C

TC : temperature coefficient, %/°C

1) Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

2) Division of Graduate Education for Sustainability of Foundation Energy, Seoul National University

3) Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University

*Corresponding author: hpark@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-8808

Fax: +82-2-871-8938

subscript

- EIA : U.S. energy information administration
 GCR : ground cover ratio
 GIS : geographic information system
 NDVI : normalized difference vegetation index
 NREL : national renewable energy laboratory
 SAM : system advisor model
 SVF : sky view factor
 TMY : typical meteorological year

1. 서론

대한민국은 상대적으로 부족한 광물자원의 부존량과 경제성을 이유로 일부 비금속 자원을 제외한 대부분의 자원을 수입에 의존하고 있다. 이에 따라 자원 가격의 변동에 취약하며 자원 수입에 막대한 비용을 지출하고 있는 실정이다. 반면 북한의 경우 상대적으로 풍부한 광물자원을 보유하고 있는 것으로 보고된 바 있으며 2011년 북한의 광물 수출이 총 수출의 28%를 차지할 정도로 광산업은 북한 경제에서 매우 중요한 비중을 차지하여 왔다^[1]. 북한에는 약 220여종의 산업적으로 유용한 광물 자원이 부존되어 있고 20여종의 광종이 경제성이 있는 것으로 파악되고 있으며^[2], 특히 마그네사이트의 경우 세계부존순위가 3위로 추정될 정도로 풍부한 양이 매장되어 있는 것으로 보고되었다^[3]. 북한의 주요 광물자원 부존현황은 다양한 자료를 통해 추정되고 보고되어 왔지만^[4~11], 북한이라는 국가의 특수성을 고려했을 때 자료의 정확도와 신뢰도는 떨어지는 상황이다. 그럼에도 불구하고 이러한 조사결과들을 종합하였을 때 북한의 광물자원은 대한민국의 입장에서 매력적인 투자 대상임에는 틀림이 없다.

이처럼 북한에는 다양한 광물자원이 부존되어 있지만 최신 기술과 장비의 부족, 전기, 도로, 철도, 항만 등 인프라 시설의 노후화 등으로 인해 광물 생산에 많은 어려움을 겪고 있다. 특히 90년대 초반 이후 생산량이 급격히 줄어들어 지난 20여년간 광물 생산은 감소 추세에 있으며, 2011년은 1989년에 비해 생산량이 1/3 이상 감소한 것으로 추정된다^[1].

이러한 상황에서 북한의 광물 생산량 증진을 위해서는 필수적으로 노후된 인프라 시설을 개선할 필요가 있다. 특히 부족한 전력 공급은 광산을 개발하고 운영하는 데 큰 어려움을 야기하고 있다. 미국 에너지정보국(U.S. Energy Information Administration, EIA)의 통계에 따르면 2015년의 총 전력 생산량은 대한민국이 5170억 kWh, 북한이 130억 kWh로 나타났다. 즉 북한의 전력생산량은 남한의 약 2.5%에 불과한 실정이다. 이러한 전력부족을 완화하기 위해 북한에서는 전력부하 등급을 설비 구성형태에 따라 특급, 1급, 2급, 3급 부하로 분류하여 수급관리를 하고 있다. 광산의 경우 병원, 철도, 군수공장 등과 함께 1급 부하군에 속하지만 최근 1급부하가 증가함에 따라 공급신뢰도는 반대로 떨어지고 있다^[12].

장기적으로 북한의 전력난을 해소하고 전력손실을 저감하기 위해서는 계통전압을 표준화하는 것이 바람직하다. 그러나 전력사업의 구조개편은 경제적, 기술적 어려움은 물론, 장기간의 투자와 연구를 필요로 한다^[13]. 이런 상황에서 태양광 에너지를 활용하여 광산에 필요한 전력을 공급하는 방안은 상당한 이점을 가질 수 있다. 태양광 에너지에 기반하여 독립적인 발전 시스템을 구축하게 되면 기존의 낙후된 인프라 시설 전체를 재구축하지 않고 해당 시설만 신규 건설하여 즉각적으로 사용할 수 있다. 대규모의 화력 발전소를 새로이 건설할 경우 전력을 광산으로 공급하기 위한 시설 투자가 추가로 필요하다. 반면 태양광 발전소는 광산 인근에 설치할 경우 전체적인 전력구조의 개편이 없이도 원활한 전력 공급이 가능하게 된다. 뿐만 아니라 장기적인 관점에서 친환경성이나 에너지 자립성의 측면에서 도움이 될 수 있다.

이러한 태양광 에너지의 장점으로 인해 이미 다양한 국가의 광산에서 태양광 에너지를 적용한 사례가 보고되고 있다. 미국의 Chevron Questa 광산^[14], 독일의 Meuro 광산^[15], 캐나다의 Sullivan 광산^[16] 등에서 태양광 에너지를 활용하여 광산 내 설비에 활용하였으며, 미국 환경보호국에서는 광산에서의 태양광 에너지 적용 가능성에 대한 대대적인 예비 타당성 조사가 이루어졌다^[17]. 이 때 광산에서의 태양광 에너지 적용성을 평가하는데 있어서 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)이 매우 유용하게 활용될 수 있다. Song et al.^[18]은 7개의 폐광산을 대

상으로 GIS를 활용하여 태양광 에너지의 잠재량을 평가하고 비교하였으며, Song and Choi^[19]는 광산배수의 처리시설을 가동하기 위한 태양광 발전시설의 경제성 분석 및 타당성 조사를 수행하였다. Choi and Song^[20]은 신재생에너지 지원지도를 활용해 국내 폐광산 지역 광해방지사업지의 태양광 발전 잠재성을 평가했으며, Baig et al.^[21]는 GIS를 활용하여 호주 전역에 걸쳐 분포하는 광산들에 대해서 태양광 에너지의 잠재성을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 GIS 기반의 공간분석을 활용하여 북한 최대의 아연광산으로 평가되는 검덕광산을 대상으로 태양광 에너지의 잠재량을 분석하고 광산 운영을 위한 전력공급 가능성을 평가하고자 한다.

2. 연구지역 및 자료

본 연구에서는 북한 최대 아연 매장지로 조사된 검덕 광산을 대상으로 연구를 수행하였다. 검덕 광산의 현재 정식 명칭은 검덕광업연합기업소이며 북한의 행정구역상 함경남도 단천시 본산동에 있는 연·아연 광산이다. 해발 630~1,700m에 위치하고 있으며 총 면적은 약 100km²로 조사되고 있다. 본 광산은 연, 아연 추정 매장량이 3억톤으로 국제적인 규모를 가지고 있는 강도개발광산이다^[2]. Fig. 1(a)에서 검덕광산의 전경과 위치를 확인할 수 있다.

검덕 광산의 경도는 128°49', 위도는 40°53'로, 마천령 산맥에 위치해 있으며 북쪽과 동쪽에 일부 거주지가 형성되어 있다. 연, 아연 광체는 주로 동서 방향으로 분포하고 있으며 금골역 인근에 광산 시설과 선광소가 있는 것으로 조사되었다^[23]. 전체적인 광산 개발지역은 금골역 인근의 넓은 지대에 걸쳐 분포하는 것으로 예상되므로 본 연구에서는 금골역 인근 지역을 광산 위치로 선정하여 연구를 수행하였다.

연구 지역의 기상 자료는 에너지플러스(EnergyPlus, <https://energyplus.net>)에서 제공하는 대표기상년도(Typical Meteorological Year, TMY) 자료를 사용했으며 인근에 있는 청진시의 자료를 사용하였다. 대표기상년도 자료는 10년 이상의 장기 자료를 취합하여 해당 지역을 대표하는 지역의 기상 자료를 1년 길이의 시간 단위 형태로 재가공한 자

료이다. 해당 자료는 시간에 따른 법선면 직달일사량, 수평면 전천일사량, 외기온도 등의 자료를 포함하고 있다. GIS 공간분석을 위해서 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서 제작하여 전세계의 수치지형모델(Digital Elevation Model, DEM)을 30m 해상도로 제공하는 ASTER GDEM 자료와 오픈스트리트맵(<https://www.openstreetmap.org>)의 토지 이용도, 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 랜드셋(Landsat) 8 위성의 가시광 영상을 사용하였다. 본 연구에서 활용한 일부 GIS 자료들을 Fig. 1(b)에 가시화하였다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 검덕 광산의 전력 보급을 위해 인근 위치에 태양광 발전소를 건설할 경우 필요한 기초 연구를 수행

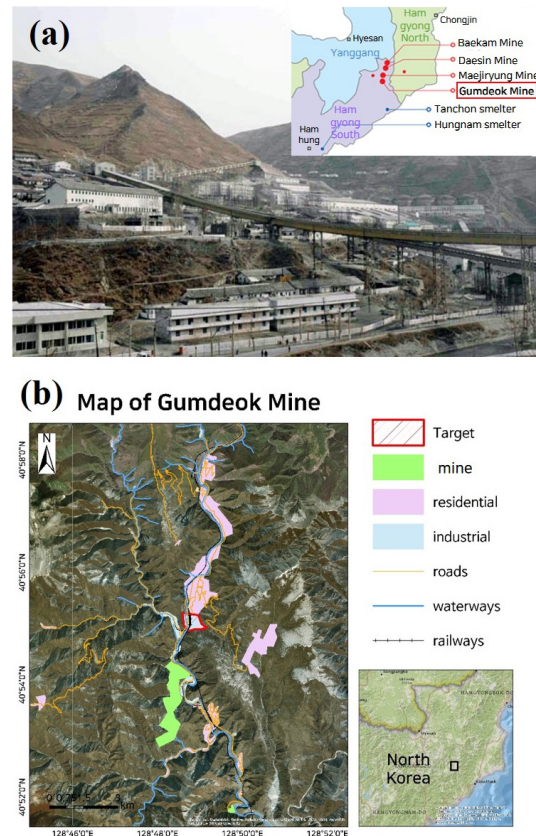


Fig. 1. Panorama and location map of Gumdeok Mine^[22], GIS dataset of the study area

하였다. 먼저 연구 대상 지역의 기상 자료와 수치지형모형을 사용하여 그림자 효과를 고려한 일사량 지도를 제작한다. 이후 여러 GIS 레이어 자료를 활용하여 발전소 인근 부지에 대한 분석을 수행하고 설치에 적합하지 않은 지역을 제거한다. 남은 구역은 그룹화하여 각 구역에 따른 태양광 잠재량과 예상 발전량을 분석하였다. 기초적인 가정을 통한 경제성 분석도 수행하였다.

3.1 태양광 잠재량 분석

태양광 잠재량 분석은 래스터 형태의 수치지형모형 자료를 사용하여 각 위치에서의 그림자 효과를 고려한 일사량 잠재량을 계산하여 수행하였다. 기본적인 계산 방법은 상용 GIS 소프트웨어인 ArcGIS의 태양 에너지(Solar Analysis) 분석도구^[24]에서 사용되는 알고리즘에 기반을 두고 있다. 이 알고리즘은 각 위치에서 천구의 가려지는 영역을 계산하여 그림자를 고려하는 방법을 적용한다.

3.1.1 Sunmap

태양지도(Sunmap)는 본 연구에서 하늘의 위치에 따른 일사량 값을 가지고 있는 자료로 정의하며 직달일사량과 산란일사량을 모두 포함한다. 지면에서 본 천구의 영역을 등면적으로 격자화한 뒤 본 연구에서 사용된 기상자료를 사용하여 각 격자 영역에서의 1년간 일사량을 계산하여 제작된다. 결과적으로 최종 Sunmap의 형태는 천구에서 태양의 위치에 따른 일사량의 누적 값을 나타내는 자료이다. 본 연구에서 사용한 일사량은 물리적 혹은 통계적 수식이 아닌 실제 측정값에 기반한 대표기상년도 자료를 사용하였다. 1년 동안 1시간 간격으로 태양의 위치와 그 때의 일사량을 각 격자 위치에서 더하여 최종 Sunmap을 구축한다.

직달일사량은 각 격자 위치의 일사량을 더하여 계산할 수 있으며 산란일사량의 경우 각 시간에 Perez 산란 모델^[25]을 사용하여 그 분포를 계산한 뒤 그 분포에 따라 해당 격자 위치에 일사량 값을 더한다. Perez 산란 모델은 아래 식 (1)을 통해 계산할 수 있으며 ζ 는 천정각, γ 는 태양과 하늘 격자 위치의 각도차이며 a, b, c, d, e는 일사 상태에 따른 상수이다. Fig. 2에서 공간분석을 통해 계산한 Sunmap의 예시를 확인할 수 있다.

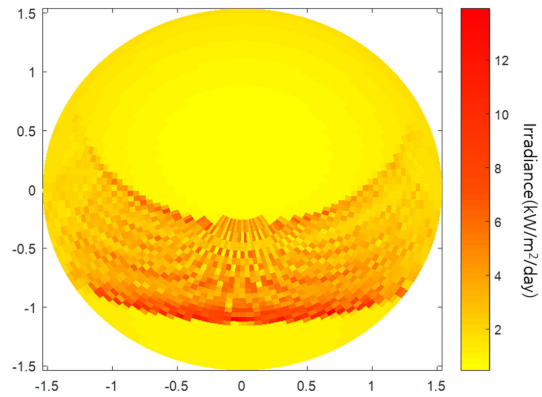


Fig. 2. Sunmap without considering panel direction in the study area

$$I_v = [1 + a \exp(b/\cos \zeta)] \times [1 + c \exp(d\gamma) + e \cos^2 \gamma] \quad (1)$$

태양의 위치에 따른 일사량을 고려해 산출된 Sunmap의 값은 기본적으로 태양의 위치에서 입사하는 일사량을 나타낸다. 따라서 일정한 각도로 설치된 태양광 패널은 해당 일사량의 값을 모두 받아들이지 못한다. 이를 고려하기 위해 본 연구에서는 고정된 태양광 패널의 법선방향 성분만을 고려한 Sunmap을 제작한다. 이 때 산란일사량은 각 태양의 위치에서 오는 직달광으로 가정하여 적용한다. 법선 방향에서 90도 이상 차이가 나는 입사광선은 태양광 패널에 도달하지 못하는 것으로 계산한다.

3.1.2 Viewmap

시야지도(Viewmap)는 Sunmap과 동일하게 지면에서 본 천구 격자에서 계산된다. 수치지형모형을 통해 각 위치에 따라 인근 지형에 의해 가려지는 영역을 계산하여 제작하게 된다. 가려지는 영역은 기준이 되는 위치를 중심으로 주변의 높이와 거리를 통해 바라보는 각도를 계산하여 확인할 수 있다. 연구지역의 한 지점에서 계산한 Viewmap의 예시를 Fig. 3에 가시화하였다.

직달일사량의 경우 명확하게 그림자가 생성되는 경우는 일사량이 차단되기 때문에 Viewmap에서 가려지는 부분을 제외하고 일사량을 계산한다. 산란일사량은 Redweik et al.^[26]의 연구에서 사용한 기존의 천공개방도(Sky View Factor, SVF)의 개념을 확장시켜 산란일사량이 하늘의 각 위치에 광원이 있어 직달일사량과 같이 입사된다고 가정하여 계산하였다. 이 방법을 통해 단순히 전체의 평균을 사용

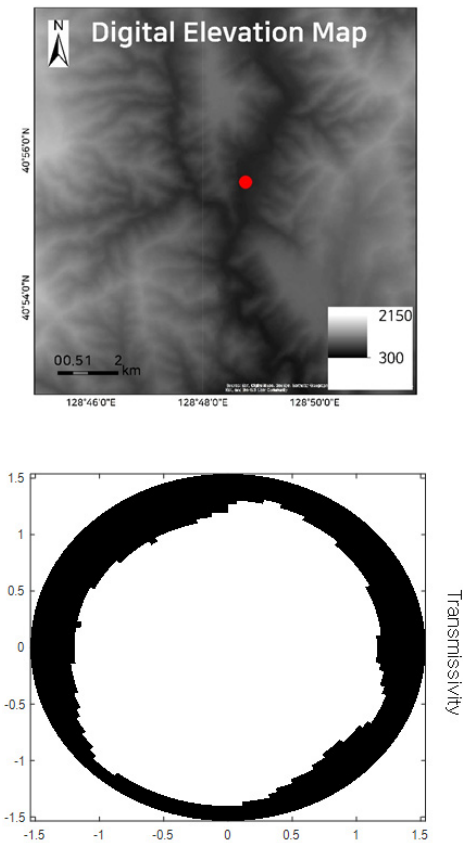


Fig. 3. Example of Viewmap in the study area

하는 SVF와 달리 위치에 따른 산란일사량과 그림자를 고려하여 계산한다.

3.1.3 일사량 지도 제작

일사량 지도는 각 위치에서 일사량 자료인 Sunmap과 주변 그림자 효과인 Viewmap을 사용하여 계산하게 된다. 본 연구에서는 연구 대상 지역에 동일한 기상자료를 적용하였기 때문에 전 지역에 걸쳐 동일한 Sunmap을 사용하였다. Viewmap은 수치지형모델의 각 위치에서 계산하였으며 이를 통해 직달일사량과 산란일사량의 그림자 효과를 고려하였다. 최종 일사량은 태양광 패널 각도에 따른 보정된 Sunmap에서 각 위치에서 계산된 Viewmap의 가림 면적을 제외한 값들의 합으로 나타난다.

반사일사량의 경우 정확한 산정이 어렵고, 눈이 쌓인 지역의 경사 30도 이상 태양광 패널 같이 특수한 경우가 아니면 상대적으로 작은 값을 가진다. 일반적인 숲이나 잔디와 같은 경우 알베도 값이 0.2 이하로 낮게 나타난다. 또한 본

연구에서와 같이 대규모 태양광 발전소의 경우 태양광 패널은 다른 태양광 패널의 바닥을 향하는 뒷면을 바라보고 있기 때문에 높은 반사일사량을 받는 경우는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 반사일사량을 계산에서 제외하였다.

3.2 최적 부지 선정

실제 광산 인근 지역에 태양광 발전소를 건설하기 위해서는 일사량 외에도 많은 요소들을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 다양한 지도 레이어에 대해 GIS 공간분석을 적용하여 최적 발전소 부지를 선정하였다. 이때 분석에 사용되는 공간자료들은 수치지형모델과 같이 격자의 형태로 구축된 래스터 자료와 점, 선, 면으로 객체를 구성하는 벡터 자료로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 GIS 공간분석 알고리즘을 사용하여 발전소 건설에 적합하지 않은 영역을 대상지역에서 제외하였다. 이후 적합한 영역들을 비교하여 최적 부지를 선정하였다. Fig. 4는 최적부지 선정은 위한 GIS 공간분석의 전체적인 순서도를 보여준다.

3.2.1 지형 분석

기본적으로 어떤 대형 부지에 시설을 건설할 경우 그 지반의 안정성이 필수적으로 고려되어야 한다. 따라서 본 연구의 태양광 발전소 최적 부지 선정에서도 지반의 안정성을 평가하고 위험성을 내포한 지역은 최적 부지에서 제외할 필요가 있다. 산지전용허가기준에서는 산지에 태양광 발전소를 건설할 경우 평균 경사도가 25도 이하일 것을 명시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 경사도가 25도를 초과한 경우 해당 지역을 비적합지로 선정하여 제외하였다.

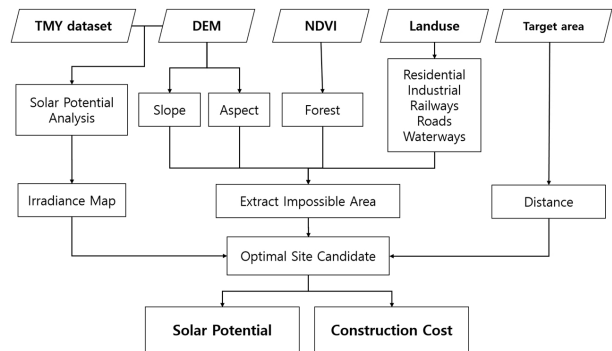


Fig. 4. Flowchart of entire methodology

태양광 에너지의 특성상 대부분의 태양광 패널은 북반구에서 남쪽을 향하게 설치된다. 이로 인해 경사면이 남향인 경우 태양광 패널들 사이의 이격거리를 짧게 할 수 있는 장점이 있으며, 북향인 경우에는 반대의 이유로 에너지 생산에 대한 손실이 발생하게 된다. 본 연구에서는 10도 이상의 경사면 중 남향이 아닌 경우에는 이러한 이격거리의 손해가 발생하고 추가적인 공사가 필요하다고 가정하였다. 따라서 경사방향을 동서남북 4개의 방향으로 분류한 뒤 남향이 아닌면서 10도 이상인 경우는 대상 부지에서 제외하였다.

3.2.2 토지 이용 분석

본 연구에서 다루는 태양광 발전소는 기존의 시설 위에 설치하거나 물 위에 설치하는 형태가 아닌 지상의 빈 부지에 건설하는 것을 가정하였다. 따라서 현재 북한의 토지 이용도와 위성영상을 사용하여 기존에 어떤 역할을 하고 있는 토지의 경우 부지 선정에서 제외하였다. 본 연구에서 사용한 오픈스트리트맵의 자료에서는 북한지역의 거주지, 산업지, 철도, 도로, 수계의 위치 등을 확인할 수 있다. 일부 지역은 위성영상에 대한 육안관찰을 통해 자료를 구축하였다. 국내의 경우 태양광 발전소를 건설할 때 거주지, 철도 등에서 일정 거리의 이격을 명시한 경우가 많다. 다만 지자체에 따라 다른 값을 제시하고 있으며 그 거리가 지나치게 길어 실효성이 떨어진다는 지적이 나타나고 있는 실정이다. 본 연구에서는 몇몇 지자체에서 완화하여 적용한 100m를 최소 이격거리로서 사용하였다. 따라서 위에 명시된 모든 지역에 대해 100m 이내 지역은 선정에서 제외하였다.

북한의 경우 법적으로 개발이 금지된 지역이나 환경보존을 위한 지역에 대한 자료를 취득하는 것에 어려움이 있다. 태양광 발전소 자체가 친환경성을 띠고 있고 본 연구에서는 추가적인 공사가 필요 없는 부지를 선정하는 것에 목표를 두고 있기 때문에 추가적인 개발 및 공사가 요구되는 울창한 숲 지역은 개발 부지에서 제외하였다. 이러한 숲 지역을 추출하기 위해서 가시광과 근적외선 영역의 위성영상을 사용하여 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 계산하고 그 값이 0.6 이상인 경우에는 숲으로서 간주하였다. NDVI는 비교적 거주지와 숲 지역이 잘 드러나는 2016년 5월말의 Landsat 영상을 사용하여 계산하였다.

3.2.3 최종 발전소 부지 선정

앞선 연구에서 주로 발전소 부지로 적합하지 않은 영역들을 추출하게 되며 결과적으로 영역 외 지역이 최종 선정 후보지가 된다. 여기에 추가적으로 일사량이 $3,500\text{Wh}/\text{m}^2/\text{day}$ 이하인 경우도 부적합지로서 제외하였다. 이렇게 남은 후보지들을 인접한 지역끼리 모아 각각의 구역으로 그룹화 하였다. 본 연구에서 다루는 태양광 발전소는 광산의 운영을 위한 대규모의 시스템이기 때문에 해당 구역 중 면적이 작은 경우는 최종 선정지에서 제외하였다. 면적 기준은 $10,000\text{m}^2$ 로 선정하여 이보다 작은 구역은 후보지에서 제외하였다.

남은 후보지에서 광산 지역으로부터 거리가 너무 먼 구역 또한 제외할 필요가 있다. 광산의 위치로 선정된 지역에서부터 1km 거리 이내의 접하는 부지는 광산 부지와 충분히 전선을 사용하여 연결할 수 있다고 가정하였다. 전체 면적 중 일부만 해당 거리 내에 있는 경우도 다른 부분은 태양광 발전소 내 태양광 패널로 연결되기 때문에 적용대상지로 허용하였다. 제외되지 않고 남은 대상 부지들에 대해서는 각각의 면적과 평균 일사량을 사용하여 그 잠재량을 평가하였다.

3.3 예상 발전량 및 경제성 분석

사용할 태양광 패널과 부지 면적을 알고 있다면 시스템에 대한 가정을 통해 해당 부지에 설치할 수 있는 태양광 시스템의 용량을 산정할 수 있다. 여기에 일사량과 추가적인 변수를 사용하면 예상되는 발전량을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 기본적인 시스템을 가정 한 후 선정된 발전 부지에 최대한 설치 가능한 태양광 발전소 규모와 예상 발전량을 산정하였다. 규모에 따른 예상 건설비용을 산정하여 기초적인 경제성 분석 또한 수행하였다.

3.3.1 발전량 계산

본 연구에서는 태양광 에너지의 예상 발전량을 산정하기 위해 미국 신재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 개발한 SAM(System Advisor Model)에서 사용되는 PVWatts 모듈의 수식과 기본 변수들, 초기값을 참고하여 계산 방법을 적용하였다^[27]. 수식은 PVWatts와 동일하나 인버터 효율 부분을 단순화하여 사용

하고 추가 변수를 고려하였다. 태양광 시스템 용량은 식 (2) 과 같이 정격 출력(NP)으로, 예상발전량은 식 (3)를 이용한 연간발전량(AE)으로 계산하였으며 이 때 NP의 단위는 kW, AE의 단위는 kWh/year이다. 사용한 변수는 일사량 (I), 토지 면적(A), 패널의 효율(PE), 인버터 효율(IE), DC to AC 비율(DAR), 패널 온도(T), 온도 계수(TC), 기타 손실율(OL), GCR(Ground Cover Ratio)이다. 시스템적 변수는 아니지만 예상량 산정에 필요한 토지 이용율(LU) 또한 변수로 고려하였다.

$$NP = A \frac{PE}{100} GCR \frac{LU}{100} \quad (2)$$

$$AE = 365 \frac{I}{1000} NP \frac{IE}{100} DAR \frac{100 - (25 - T) TC}{100} \frac{OL}{100} \quad (3)$$

일사량과 토지면적은 앞선 GIS 공간분석 결과를 사용하기 때문에 추가적인 가정 없이 적용하였다. 패널의 효율은 현재 시판되고 있는 제품들의 경우 약 15~20%를 보이고 있으며 실험실 수준의 연구에서는 20% 이상도 나타나고 있다. 본 연구에서는 현재 실제 여러 기관에 설치된 태양광 패널의 효율과 기술 수준을 고려하여 18%를 가정하여 적용하였다. 인버터 효율과 DC to AC 비율, 기타 손실율은 SAM의 초기값인 96%, 1.2, 14%를 각각 사용하였다. 패널 온도는 대표기상년도의 평균 외기온도를 가정하여 적용하였고 온도 계수는 SAM의 초기값인 -0.5%/°C를 사용하였다. GCR은 패널의 설치 각도를 위도와 비슷한 40도로 설정한 뒤 동지일 때에도 그림자가 생기지 않는 이격거리를 계산한 0.47을 사용하였다. 토지 이용률은 시스템 설비 등을 설치할 장

소를 제외한 대부분의 지역에 설치를 한다고 가정하여 80%를 적용하였다. Table 1에 각 변수와 사용된 값을 가시화하였다.

3.3.2 예상 건설비용

건설 비용은 태양광 시스템의 용량을 기준으로 산정하였다. 건설 비용은 시공업체 및 환경에 따라 다양하게 나타날 수 있으나 남한의 일반적인 시공사례에 기반하면 kW당 약 180만원의 건설비용이 필요한 것으로 조사되었다. 이 비용은 기자재 비용, 각종 공사 비용, 인허가 비용이 포함된 금액이다. 이 비용들 중 토지비용과 각종 인허가 비용의 경우 남한과 북한은 차이가 있을 수 있으며 규모가 커질 경우 면적대비 비용이 감소할 수 있다. 그러나 북한이라는 지역의 특수성과 기존 적용사례가 없다는 점을 감안하여 본 연구에서는 보수적인 접근법을 통해 조사된 비용에서 약 10% 정도 상승한 kW당 200만원을 기자재 및 설치비로 산정하였다.

기본적인 건설비용 외에 추가적으로 고려할 수 있는 비용으로 송배전 시설비용을 고려할 수 있다. 기존의 송배전 인프라 시설이 낙후되어 거의 사용할 수 없다고 가정할 경우 새롭게 건설되는 태양광 발전소와 전력 사용처를 전선을 사용하여 연결하여야 한다. 따라서 앞서 선정된 부지와 광산까지의 거리를 새롭게 송전 케이블로 연결해야 하는 거리로 정하고 해당 비용을 산정하였다. 송전선로 건설 비용의 경우 에너지경제연구원에서 산정한 6.46 억원/km를 적용하였다^[2].

4. 연구 결과

4.1 태양광 잠재량

연구 대상 지역에서 태양광 패널을 정남향 방향으로 40도 각도로 설치할 경우 Fig. 5와 같은 일사량 지도를 얻을 수 있다. 해당 지역은 인근에 검덕산을 비롯한 여러 산들이 분포하고 있으며 이로 인해 그림자가 생기는 계곡 부분에 일사량이 낮게 나타난다. 해당 지역에서 평균 일사량은 3,705Wh/m²/day로 나타났고 최저 일사량, 최고 일사량은 각각 1,584, 4,088Wh/m²/day로 나타났다. 광산 인근

Table 1. Values of variables

Variable	Value
PE	18%
IE	96%
DAR	1.2
OL	14%
T	평균 외기온도
TC	-0.5 %/°C
GCR	0.47
LU	80%

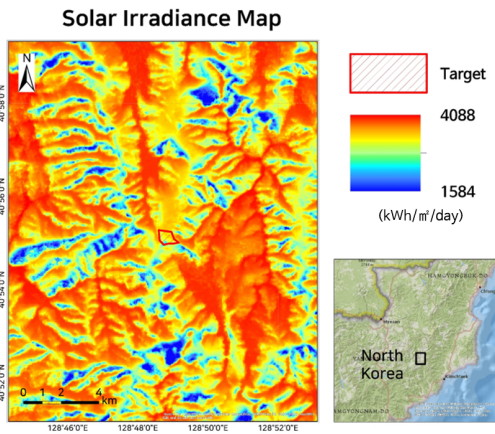


Fig. 5. Irradiance map in the study area

에서는 동쪽과 동남쪽 구역에서 일사량이 높은 낮은 지역이 나타났으며 북쪽과 서남쪽에도 이보다는 적지만 일사량이 높은 지역들이 다수 나타났다.

4.2 최적 부지 선정

지형분석과 토지이용분석 등을 적용하여 계산한 최종 대상부지는 Fig. 6과 같이 나타난다. 선정된 구역은 총 11개이며 평균 면적은 약 174,618m²이고 평균 일사량은 3,890 Wh/m²/day로 나타났다. 면적의 경우 가장 넓은 구역이 전체의 약 76%를 차지하는 것으로 나타나 실제로는 하나의 넓은 구역과 작은 구역들로 구분할 수 있다. 가장 넓은 구역은 광산의 동남쪽에 위치한 것으로 나타났으며 위성영상

확인 결과 농지로 사용되고 있는 부지인 것으로 판단되었다. 이 외의 구역들은 산의 고지나 남향 사면에 있는 공터인 것으로 예상된다.

4.3 예상 발전량 및 경제성 분석

최종 선정된 11개 구역의 면적, 평균 일사량, 광산으로부터의 거리, 시스템 용량, 예상 발전량, 건설비용을 Table 2에 가시화하였다. 가장 면적이 넓은 구역의 경우 약 100 MW 용량의 발전소를 건설할 수 있으며 이 경우 연간 약 108GWh를 생산할 수 있을 것으로 예상되었다. 해당 발전소의 경우 건설비용으로는 약 1,995억원이 예상되었다. 가장 면적이 넓은 해당 부지를 제외한 나머지 10개의 구역에 발전소를 건설할 경우 약 32MW 용량에 연간 약 33GWh를 생산할 수 있을 것으로 예상되었으며 비용은 약 682억원으로 계산되었다.

한국에너지경제연구원^[2]에 따르면 검덕 광산의 연간 광석 생산규모를 750만 톤, 소요 전력량을 34kWh/톤으로 가정할 경우, 연간 255 GWh의 전력이 필요한 것으로 조사되었다. 동일한 가정을 적용한다면, 분석결과 가장 넓은 부지에 발전소를 건설할 경우 총 필요전력의 약 42%를 생산할 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 1km 이내의 모든 부지에 발전소를 지을 경우 전체 전력의 약 55 %를 생산할 수 있을 것으로 예상된다.

Optimal Site

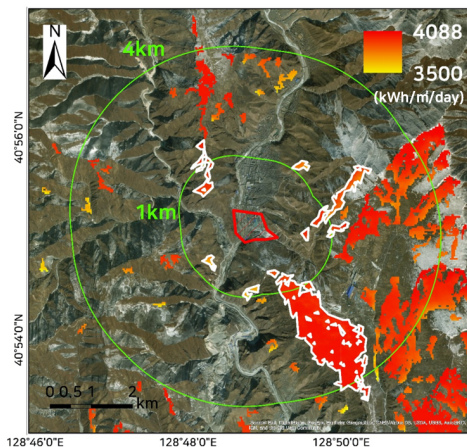


Fig. 6. Map layers used in the analysis and the result of selection of optimal site

Table 2. Statistics of top 11 areas sites

Area (m ²)	Mean Irradiance (Wh/m ² /day)	Distance (m)	NP (MW)	AE (GWh/year)	Cost (100million won)
1,456,691	4,016.71	659.45	99.55	107.70	1,995.33
157,427	3,877.54	916.63	10.76	11.24	221.10
72,590	3,953.80	565.90	4.96	5.28	102.88
44,329	3,961.66	936.19	3.03	3.23	66.64
39,033	3,932.90	911.92	2.67	2.83	59.24
38,047	3,969.06	662.79	2.60	2.78	56.29
28,819	3,793.12	1015.99	1.97	2.01	45.95
28,255	3,693.87	821.21	1.93	1.92	43.93
25,204	3,692.90	595.95	1.72	1.71	38.30
16,607	3,982.34	442.40	1.13	1.22	25.56
13,796	3,910.75	579.30	0.94	0.99	22.60

5. 결론

본 연구에서는 북한의 검덕 광산을 대상으로 인근의 태양광 에너지 잠재량을 분석하고 최종적으로 발전소에 적합한 부지 선정 및 예상 발전량과 건설비용을 산정하였다. 연구 지역에서 가장 면적이 큰 최적 부지는 광산 남동쪽에 위치한 논 부지인 것으로 나타났다. 광산에서 1km 송전 케이블로 연결 가능한 적합부지 전체에 태양광 발전소를 건설하게 된다면 약 131MW의 발전소를 건설 가능한 것으로 나타났으며 이 경우 건설 비용은 약 2,678억원이 필요할 것으로 계산되었다. 이 발전소는 검덕 광산의 연간 광석 생산량이 750만 톤일 경우 약 55%의 전력을 공급할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구 결과는 광산지역의 전력공급을 위한 태양광 발전소의 적용 가능성을 보여주고 있다. 본 연구 대상 광산의 경우 동남쪽에 큰 규모의 농지가 분포하고 있어 해당 지역을 활용할 경우 상당히 큰 규모의 태양광 시스템을 건설하여 전기를 공급할 수 있게 된다. 기존의 화력발전소 등과 비교를 위해서는 더 구체적인 자료를 통한 경제성 분석이 필요하겠지만 실현가능한 하나의 대안으로 평가될 수 있다.

본 연구 결과는 북한의 전력 부족에 대한 새로운 대안으로서 활용될 수 있으며 특히 전력공급이 원활하지 않은 오프그리드 지역에 유용하게 적용될 수 있다. 연구된 바와 같이 태양광 발전소를 통해 광산 지역에 전력을 공급하면 기존의 노후된 인프라 시설을 보완하여 독립적인 전력공급 체계를 구축할 수 있으며 최근 전 세계적으로 보급을 늘리고자 하는 친환경 에너지를 사용한다는 장점을 가진다. 향후 북한의 기존 시설에 대한 구체적인 조사 및 비교가 이루어진다면 더욱 정확한 경제성 평가와 사회적 영향력을 파악할 수 있을 것이다. 본 연구 결과는 차후에 진행될 북한과 관련된 다양한 의사 결정 및 정책 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 사회적으로 많은 정보가 단절된 북한을 대상으로 연구를 수행하였다. 따라서 자료의 취득에서 한계점이 존재하며 취득한 자료의 정확성을 확신하기 어렵다. 일부 자료는 10년 이상된 과거의 자료이고 일부 자료는 출처에 따라 그 값이 다른 경우가 있다. 건설비용 또한 남한의 자료를 사용하였고 북한의 경제 수준을 반영하지 못하였다. 그

럼에도 불구하고 본 연구는 현재 취득할 수 있는 자료들에 기반하여 최대한 객관적인 가정을 통해 분석을 적용하였다.

최종 결과값은 실제 광산의 생산 규모, 규모의 경제, 시간에 따른 경제 변화 등 다양한 요인에 따라 달라질 수 있으며 1km가 아닌 더 먼 거리를 전선으로 연결한다면 더 많은 전력도 생산할 수 있다. 태양광 발전소를 건설한다면 해당 부지의 전통적인 용도를 사용하지 못하게 된다는 점도 고려하여야 한다. 또한 실제 운영에 필요한 피크전력은 전체 필요 전력량과는 다르기 때문에 해당 피크전력을 태양광 발전소만으로 제공하기 위해서는 양수발전 시설이나 배터리 전기 저장 시스템이 추가적으로 필요하게 된다. 이러한 배터리 추가 설비는 많은 건설비용을 야기할 수 있다. 이처럼 일부 한계점이 있을지라도 향후 북한과의 관계 개선 및 광물자원 개발의 중요성을 고려했을 때 본 연구 결과는 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 서울대학교 통일기반구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물입니다.

References

- [1] Koh, S.M., Lee, G.J., Yoon, E., 2013, "Status of Mineral Resources and Mining Development in North Korea", *Econ. Environ. Geol.*, 46(4), 291-300.
- [2] Korea Energy Economics Institute, 2014, "Investment potential of North Korea's mineral resources development and processing".
- [3] U.S. Geological Survey, 2013, "Mineral commodity summaries 2013".
- [4] Byeon, J.K., 1992, "Study on Metallic Minerals Industry in North Korea", KIGAM research report KR-92-B-17-1992-R.
- [5] Byeon, J.K., 1994, "Study on ferrous metallic minerals industry in North Korea", KIGAM research report KR-94-B-17-1994-R.
- [6] Yun, S.K., 1992, "The assessment study of non-metallic

- mineral & coal resources of North Korea”, KIGAM research report KR-92-B-18-1992-R.
- [7] Yun, S.K., 1993, “Geology & mineral resources of the north eastern part of North Korea”, KIGAM research report KR-93-B-18-1993-R.
- [8] Kim, Y.D., Park, H.S. Kim, S.Y. Lee, J.H., 2005, “A study on the mine development of North Korea and the Inetr-Korean mineral resources cooperation”, *Econ. Environ. Geol.*, 38, 197-206.
- [9] Park, Y.S., 2006, “North Korea’s mineral resources development status - developing value of 2,287 trillion won for ‘win-win’”, *The Unified Korea*, 24(4), 76-77.
- [10] Kim, Y.K., 1988, “Resources and energy industry”, *The Unified Korea*, 6(9), 46-48.
- [11] Kim, S.Y., Goo, Y.W., 2013, “An analysis on the revealed symmetric comparative advantage of North Korea’s mineral resources”, *Korean Energy Economic Review*, 12(1), 45-65.
- [12] Kim, D.M., Jeon, Y.S., Park, Y.U., 2014, “Study for operation control and situation of distribution system in North Korea”, *Proc. 2014 The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 178-179.
- [13] Kim, D.M., Park, Y.U., Jeong, S.Y., 2013, “Study for optimal design of distribution system in North Korea”, *Proc. 2013 The Korean Institute of Electrical Engineers*, p. 84.
- [14] Chevron, 2014, “Renewable Energy and Energy Efficiency”, <https://www.chevron.com/annualreport/2014/business-highlights/renewableenergyefficiency>
- [15] Cichon, M., 2012, “Renewable Energy Projects of the Year Highlight the Industry’s Best Achievements”, <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2012/12/renewable-energy-projects-of-the-yearhighlight-the-industrys-best-achievements-part-1.html>
- [16] CBC News, 2014, “SunMine Solar Farm Construction Begins in Kimerley, B.C.”, <http://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/sunmine-solar-farm-construct-ion-begins-inkimberley-b-c-1.2699478>
- [17] United States Environmental Protection Agency, OSRTI Abandoned Mine Lands Team, 2012, “A Breath of Fresh Air for America’s Abandoned Mine Lands”, <https://semsub.epa.gov/work/11/176038.pdf>
- [18] Song, J., Choi, Y., Yoon, S.H., 2015, “Analysis of Photovoltaic Potential at Abandoned Mine Promotion Districts in Korea”, *Geosystem Eng.*, 18, 168-172.
- [19] Song, J., Choi, Y., 2015, “Design of Photovoltaic Systems to Aerators for Natural Purification of Acid Mine Drainage”, *Renew. Energy*, 83, 759-766.
- [20] Choi, Y.S., Song, J.Y., 2016, “Assessment of Photovoltaic Potentials at Abandoned Mine Reclamation Sites in Korea using Renewable Energy Resource Maps”, *New Renew. Energy*, 12(2), 44-52.
- [21] Baig, M. H., Surovtseva, D., Halawa, E., 2015, “The Potential of Concentrated Solar Power for Remote Mine Sites in the Northern Territory, Australia”, *J. Sol. Energy*, 1-10.
- [22] Tongil News, 2006, “Dancheon Special Zone, is it possible?”, <http://www.tongilnews.com/news/articleView.html?idxno=65369>
- [23] Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2015, “DB construction of mineral resources and analysis of mineralized areas in North Korea”, KIGAM research report JP2014-001-2015.
- [24] Fu, P., Rich, P., 1999, “Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales”, *Proceedings of the 19th annual ESRI user conference*, pp. 1-31.
- [25] Perez, R., Seals, R., Michalsky, J., 1993, “All-Weather Model for Sky Luminance Distribution-Preliminary Configuration and Validation”, *Sol. Energy*, 50(3), 235-43.
- [26] Redweik, P., Catita, C., Brito, M., 2013, “Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape”, *Sol. Energy*, 97, 332-341.
- [27] Dobos, A.P., 2014, “PVWatts Version 5 Manual”.