

## 연구논문

# 북한 폐광산의 중력에너지 저장 시설로의 활용 가능성과 연계 재생에너지 발전 잠재량 분석

구지윤<sup>1</sup> · 강일석<sup>1</sup> · 최지원<sup>1</sup> · 임준수<sup>1</sup> · 송재준<sup>2,3</sup> · 박형동<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup>서울대학교 에너지시스템공학부, <sup>2</sup>서울대학교 에너지자원공학과, <sup>3</sup>서울대학교 에너지자원신기술연구소

## Applicability of Gravity Energy Storage Facilities and Analysis of Associated Renewable Energy Generation Potential for Abandoned Mines in North Korea

Jiyeon Ku<sup>1</sup>, Il-Seok Kang<sup>1</sup>, Ji-Won Choi<sup>1</sup>, Junsu Leem<sup>1</sup>, Jae-Joon Song<sup>2,3</sup> and Hyeong-Dong Park<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup>Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>2</sup>Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>3</sup>Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University, Seoul, Korea

**\*Corresponding Author.** Hyeong-Dong Park, [hpark@snu.ac.kr](mailto:hpark@snu.ac.kr), Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University, and Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University, Seoul, Korea

**Received**

29 January 2024

**Final version Received**

15 February 2024

**Accepted**

27 February 2024

**Abstract**

The abandoned mines in North Korea pose substantial environmental threats. When converted into gravity energy storage (GES) facilities, mining pollution can be reduced, local welfare can be improved, and the possibility of military exploitation can be lowered. This study evaluated the conversion of these mines, using the sites and surrounding materials as the weights. Integrating this system with renewable energy sources, the intermittency challenges of renewable energy were addressed, while promoting ecofriendliness and energy independence. Geographic information systems (GIS) analysis was employed to assess the solar and wind energy generation capacity in adjacent areas. The potential energy capacity of GES facilities, planned for installation across 212 North Korea mines, is estimated at 7.3 MWh, with an average annual potential of 1,098 MWh for wind power and 178 MWh for solar power. These findings underscore the potential gains by repurposing North Korea's abandoned mines for energy storage and renewable energy generation.

**Key words :** gravity energy storage, abandoned North Korean mines, renewable energy, solar energy, wind energy

**요약**

북한 폐광산은 광해의 발생 정도가 심각하며, 핵실험 등과 같은 군사적인 목적으로 활용이 가능해 한반도 평화에 위협요소로 작용 가능하다. 에너지 저장시설과 같이 북한 폐광산을 평화적 용도로 활용함으로써, 폐광산 주변 지역의 광해 방지와 주민 복지 증진, 군사적 활용 가능성의 선제적인 차단 효과를 기대할 수 있다. 본 연구는 이러한 광산을 중력에너지 저장(Gravity Energy Storage, GES) 시설로 전환하는 가능성을 평가하였다. 에너지 저장 시스템과 재생 에너지를 통합함으로써, 재생에너지의 간헐적 공급 문제를 해결하고 친환경성 및 에너지 자립성을 강화할 수 있다. 연구에서는 GES로 활용할 수 있는 광산 인근 지역에서 태양광과 풍력 재생에너지의 잠재량을 자원량과 설치 적합지 분석을 통해 파악하였다. 북한 내 212개의 광산에 GES 시설의 평균 잠재 에너지량은

연간 7.3 MWh로 추정되며, 풍력 발전의 연간 평균 잠재량은 1,098 MWh, 태양광 발전의 평균 잠재량은 178 MWh로 나타났다. 이 연구는 북한의 폐광산을 에너지 저장 및 재생에너지 발전의 용도로 재활용할 수 있는 잠재력을 강조한다.

**주요어 :** 중력에너지저장, 북한 폐광산, 재생에너지, 태양광 에너지, 풍력 에너지

## 서 론

노후 광산의 폐광에 따른 광산 주변 지역의 경기침체 및 광해 문제를 해결하는 것은 광업 분야의 주요한 당면 과제이다. 폐광산 유희 부지를 활용한 산업 및 인프라 시설 구축은 광산 주변 지역 주민의 복지를 향상함과 동시에 광산폐기물의 외부 유출을 방지할 수 있는 대안으로 제시되고 있다. 북한 특유의 경제 및 사회 구조를 고려할 때, 북한의 폐광산 유희 부지를 활용함으로써 얻을 수 있는 효용은 타 국가 대비 상대적으로 높을 것으로 예측된다. 북한 경제에서 광업은 유의미한 비중을 차지하고 있으며(2022년 기준 북

한 실질 국내총생산의 약 8.8%)(KOSIS, 2023b), 북한 내 가행중인 광산의 수는 2021년 기준 710개소로 동시기 남한의 325개소 대비 약 2.2배에 달하는 수준이다(KOSIS, 2023a). 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(Bang, 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.

**Table 1.** Energy consumption structure and alternatives used by North Korean residents (KIET, 2017)

|                  | Source          | Consumer                  | State supply | Supply status       | Alternatives when lacking                               |
|------------------|-----------------|---------------------------|--------------|---------------------|---------------------------------------------------------|
| Lightning        | Electricity     | All residents             | O            | Partial supply      | Candles, kerosene lamps, industrial oil lamps           |
|                  | Gas             | Pyongyang residents       | O            | Partial supply      | Purchased kerosene from the market                      |
|                  | Coal            | Rural residents           | O            | Almost not supplied | Wood, rice husks, sawdust                               |
| Cooking          | Wood            | Pyongyang residents       | O            | Almost not supplied | Straw, cornstalks, etc.                                 |
|                  | Kerosene        | Pyongyang residents       | O            | Partial supply      | Self-purchased from the market                          |
|                  |                 | -                         | X            | Self                | -                                                       |
|                  | Electric heater | Some residents            | X            | Self                | -                                                       |
| Heating          | Hot water       | Pyongyang residents       | O            | Almost not supplied | Kerosene heaters, pine cones, etc., self-supplied       |
|                  | Coal            | Provincial city residents | O            | Almost not supplied | Coal, wood, rice husks, sawdust, etc.                   |
|                  | Wood            | Rural residents           | O            | Almost not supplied | Partially methane gas heating, straw, cornstalks, grass |
|                  | Kerosene heater | Some residents            | X            | Self                | -                                                       |
| Appliances       | Electricity     | All residents             | O            | All residents       | Using car battery for charging                          |
| Battery Charging | Electricity     | Some residents            | X            | Self                | -                                                       |
| Electric sewing  | Electricity     | Home industry workers     | X            | Self                | -                                                       |

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. Table 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(KIET, 2017). 또한 Fig. 1에 제시된 탈북주민 대상 설문조사 결과, 대다수의 주민들이 하루 평균 1~2시간, 한달 평균 11~20일 가량의 제한된 기간에만 전력이 공급되었다는 답변을 얻었다(KOEMA, 2023). 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 건설 비용과 부지, 송·배전설비를 확보하기 어렵다는 단점이 존재한다. 반면 폐광산 부지를 활용한 에너지 저장 시설의 경우, 북한 내 산재한 폐광산을 활용하여 부지 확보에 용이하다는 장점이 있다. 또한 해당 시설은 대형 발전소에 비해 전력 생산·공급량이 적어 군사적 활용이 어려우며, 광산 주변

지역 주민에게 전력을 직접적으로 공급하여 투명한 전력망 구축이 가능하다. 이와 같이 북한의 현황과 특성을 고려할 때, 폐광산을 에너지 저장 시설로 전환하고 이를 재생에너지 발전 시스템과 연계하는 접근 방식은 전력 공급 부족 문제를 해결하는 효과적인 전략으로 판단된다. 날씨 변동성으로 발생하는 재생에너지의 발전량 편차를 에너지 저장 시스템을 통해 잉여 전력을 적절히 저장하거나 활용함으로써, 전력의 유동적 공급이 가능해진다. 대한민국(이하 남한)의 경우 폐광산 부지를 활용한 데이터센터 구축 추진(Gangwon News, 2023), 스마트 팜 구축(G1TV, 2023), 풍력 및 태양광 발전 연구(Jang *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014) 등 다양한 방향의 연구 및 실증 사업 사례들이 존재한다. 해외 역시 활발한 폐광산 부지 활용 연구가 이루어지고 있으며, 특히 중력에너지 저장 시설(Morstyn *et al.*, 2019), 양수식 에너지 저장 시설(Fan *et al.*, 2020) 및 이를 태양광·풍력, 바이오매스와 결합한 복합 에너지 저장 시설(ScienceAlert, 2024) 등 폐광산 부지를 에너지 저장 시설로 활용하기 위한 연구 및 사업 사례가 다수 보고되고 있다.

본 연구는 북한의 폐광산을 평화적으로 활용하기 위한 방안으로, 광산지를 에너지 저장 시스템으로 전환하는 가능성을 탐구한다. 이를 위해, 먼저 산악 중력에너지 저장(Mountain Gravity Energy Storage, MGES)이라는 장기 에너지 저장 시설의 활용 가능성을 광산의 지형적 특성을 바탕으로 파악한다. 이 과정에서 중력식 에너지 저장설비에 관한 사전 연구를 참고하여 북한 광산지에의 적용 가능성을 파악한다. 이후, 해당 광산지의 장기 에너지 저장소로서의 잠재력을 확인하고, 경제성이 입증된 경우 인근 지역에서의 태양광 및 풍력에너지 발전 잠재력을 분석하여, 이들을 에너지 저장 시스템과 연계할 수 있는 방안을 모색한다. 마지막 단계로, 하나의 광산지를 사례로 삼아 MGES, 태양광, 풍력에너지의 활용 잠재성을 종합적으로 평가한다.

## 광산지의 중력에너지 저장 시설로의 활용 잠재성 평가

### 산악 중력식 에너지 저장설비

중력식 에너지 저장(Gravity Energy Storage, GES)은 잉여 전력을 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 기술력이 필요하지 않고 설비 구축이 간단하여, 상대적으로 기술·자본이 부족한 북한의 실정에 적합한 에너지 저장 방식으로 예상된다. 특히, 고체 매체를 활용한 GES는 전통적인 방식인 양

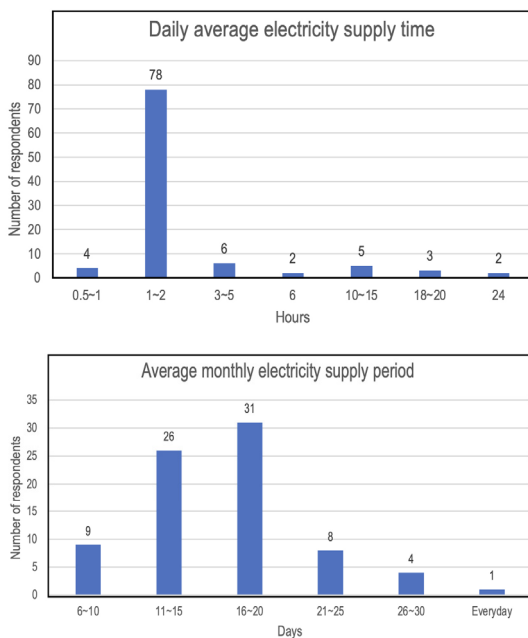


Fig. 1. Survey of electricity supply period for North Korean defectors (KOEMA, 2023).

수 발전(Pumped Hydro Energy Storage, PHES)에 비해 약 40% 저렴한 비용으로 구현될 수 있다(Tong *et al.*, 2022a). 또한, 구하기 어렵고 유지 관리가 복잡한 물을 매체로 사용하지 않는 이점이 있다. 영국의 중력에너지 저장 회사 Gravitricity에서 15 m 높이의 철탑을 사용하여 25톤 무게의 추 두 개를 활용하는 GES 시스템을 출시했다(World Economic Forum, 2024). 중력식 에너지 저장설비의 저장 용량은 에너지 저장에 사용되는 중량물의 무게와 낙하 높이에 따라 이론적으로 결정할 수 있다. 하지만, 철탑의 높이를 높이고 무게를 증가시킬 경우 구조적 불안정성이 문제가 된다. 그 후 Gravitricity에서 타워 대신 지하 광산을 활용하는 계획을 수립했다(World Economic Forum, 2024). 지하 광산을 사용하면 높은 높이 차이를 활용해 큰 저장 잠재력을 얻을 수 있지만, 지반 안전성 평가가 필수적이며, 데이터 접근성이 제한된 북한 같은 지역에서는 이를 수행하기 어렵다. 반면 산악 지형을 활용하는 접근법은 지상에서 자연적인 위치 에너지를 통해 무게와 높이 차이를 안정적으로 활용할 수 있는 대안을 제시하고, 공개된 북한의 정보를 이용해 광산의 에너지 저장 시설로서의 잠재력을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 Hunt *et al.*(2020)의 산악 중력식 에너지 저장설비 연구를 참고하였다. 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 있을 만큼 경사가 충분한 가파른 협곡 또는 산 가장자리에 두 개의 크레인을 건설하는 것으로 구성된다(Fig. 2). 이 시스템은 하부 저장 장소에서 상부 저장 장소로 물질을 운반함으로써 위치 에너지로 에너지를 저장하고, 반대로 물질을 하부 저장 장소로 낮추어 전기를 생산한다. 이 시스템은 장기간 에너지 저장에 중점을

두며 MWh 수준 이상의 정격 용량을 가져 대규모 에너지형 에너지 저장 기술이라고 할 수 있다(Tong *et al.*, 2022b).

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 없이 상부 저장소와 하부 저장소 간의 충분한 높이 차이를 확보할 수 있다. 본 연구는 북한 광산의 MGES 시스템의 적용 가능성과 주변 재생에너지 설비 설치의 잠재력을 분석했다. 이 시스템에서 높이 차이는 에너지 생산량을 산출하는 데 중요한 요소이다. 하지만, 북한 폐광산에 대한 상세한 정보가 부족하기 때문에, 북한지하자원넷의 광산 위치 데이터를 사용하여 위 경도를 파악하였다(I-RENK, 2023). 이 데이터는 폐광산과 현재 운영 중인 광산 정보가 통합된 자료로, 광산의 총수는 1,129개이다.

### MGES 잠재량 분석

MGES에서 저장되는 에너지는 식 (1)을 통해 계산할 수 있으며, 높이 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 높이차(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 80%로 설정하였다.

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

MGES 시스템은 위치 에너지를 통해 에너지가 저장되므로, 높이 차이가 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 북한의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM) 데이터를 활용해 상부 저장소와 하부 저장소 간의 높이 차이를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 북한의 DEM 데이터는 ASTERGDEM의 30 m 공간 해상도를 가진 위성 기반 데이터이다(METI and NASA, 2023). 높이 차이 계산은 Point under analysis 방법으로 비교 분석하였다. 이 접근법은 광산 위치를 중심으로 90 m 떨어진 거리에서 대각선을 포함한 총 여덟 방향으로의 높이 차이를 측정하고, 그 중 최대 높이 차이를 갖는 지점을 광산과 연결된 저장소로 선정하는 방법이다(Fig. 3). 이때 90 m의 이격거리 설정은 MGES 시스템에서 산악 지형의 가파른 경사를 활용하여 크레인 길이를 줄여 설치 비용을 절감하는 동시에, 큰 높이 차이를 통해 높은 에너지 효율을 달성하기 위함이다. 하지만 경사가 과도하게 가파를 경우 추가적인 크레인 건설에 따른 비용

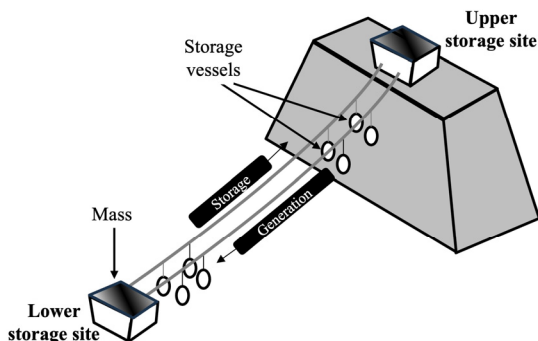


Fig. 2. Sketch of mountain gravity energy storage (MGES) system.

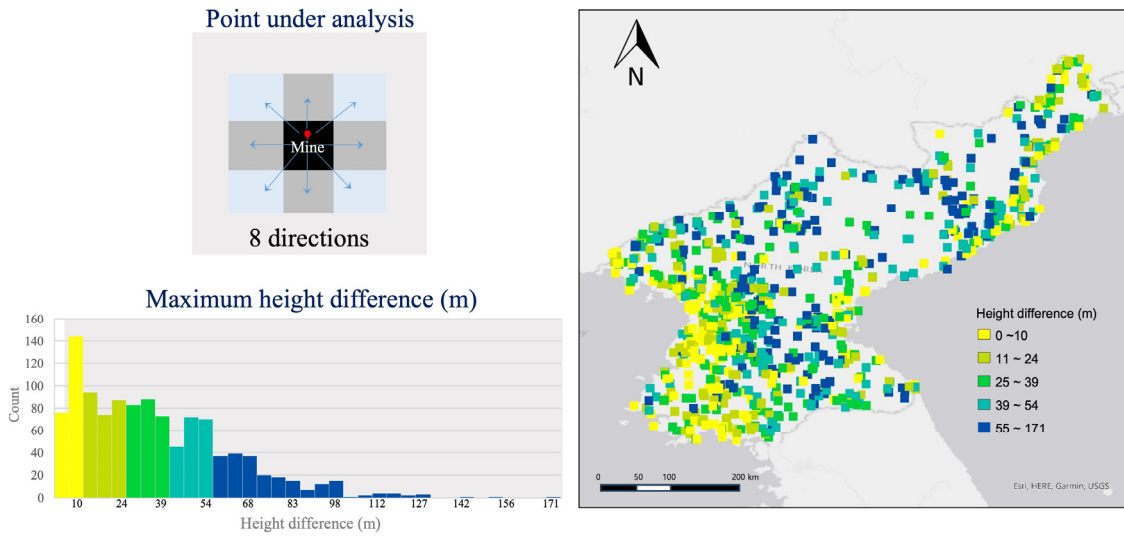


Fig. 3. Point under analysis method and distribution of height differences within 90 m area around North Korean mines.

Table 2. Long-term potential according to MGES system configuration

| Sand or gravel (tons) | Height (m) | Long-term energy storage (MWh) |
|-----------------------|------------|--------------------------------|
| 5,000                 | 55         | 0.57                           |
|                       | 95         | 0.98                           |
|                       | 135        | 1.39                           |
|                       | 175        | 1.81                           |
| 50,000                | 55         | 5.69                           |
|                       | 95         | 9.83                           |
|                       | 135        | 13.97                          |
|                       | 175        | 18.10                          |

증가가 발생할 수 있음을 고려해야 한다. 분석 결과, Fig. 3의 히스토그램과 같이 에너지 저장 시설과 광산 주변 지역 간의 높이 차이는 0 m에서 171 m 사이로 나타났으며, 이에 대한 지리적 분포는 Fig. 3의 지도에서 확인할 수 있다.

MGES 시스템의 성능은 에너지 저장 매체의 무게와 높이 차이에 비례한다. 에너지 저장 매체의 무게는 5,000 ton과 50,000 ton으로 설정하여 두 경우에 대해 계산하였다. 본 연구에서는 경제성을 고려하여 30° 이상의 경사도를 갖도록 55 m 이상의 높이차를 기준으로 삼고, 40 m 간격으로 발전 잠재력을 분석하였다(Table 2). 높이 차이가 175 m이고 무게가 50,000 ton인 경우, 장기 에너지 저장 잠재력은 최대 약 18 MWh에 달할 수 있다.

## MGES와 재생에너지 연계 가능성 분석

일반적으로 풍력·태양광 등의 신재생에너지는 시간과 계절에 따른 발전량 편차가 크게 나타난다. 따라서 발전량이 많은 시기의 잉여 전력을 적절하게 활용 또는 저장하는 방안을 마련하는 것이 신재생에너지의 효율을 극대화하기 위해 필수적으로 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 북한 광산을 중력에너지 저장 시설로 활용할 수 있는 잠재량을 파악했다. 55 m 이상의 높이차를 확보할 때 경제성이 있는 것으로 판단하여 이러한 조건을 갖는 212개 광산을 대상으로 주변 지역에서 태양광과 풍력에너지의 발전 잠재력을 분석하였다.

### MGES 인근 태양광 발전 적지 선정

태양광 발전은 유휴 폐광산 부지를 활용한 전력 발전에 적극적으로 활용되는 방식이다. 특히 태양광 발전은 시간대별 발전량 편차에 따른 잉여 전력의 발생이 많아, 해당 잉여 전력을 효율적으로 저장 가능한 에너지 저장설비와의 연계성이 뛰어나다는 특성이 있다(Oh *et al.*, 2018).

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. 중력에너지 저장 시설 인근의 태양광 발전 적지 선정 시, 경사각, 경사방향, 인접성 및 도로와의 이격 거리 등을 고려했다. 이러한 각 요소는 지리 정보 시스템(Geographic Information Systems, GIS)의 불리

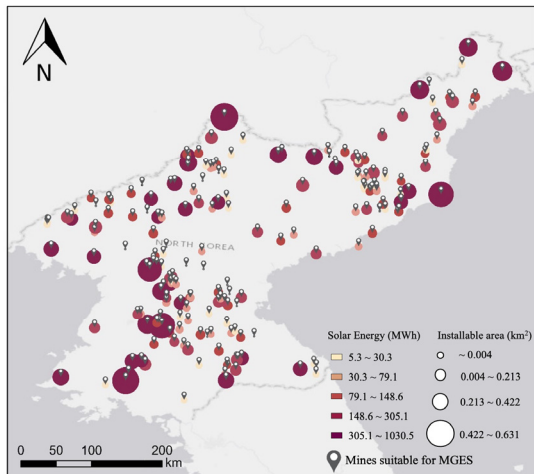
연(boolean) 연산을 사용하여 적지를 도출하는 데 활용되었다. 본 연구에서는 태양광 시스템 설치 시 사면의 안전성을 확보하기 위해 지형의 경사각이  $10^\circ$  이하인 지역을 선정하였다(KMOE, 2018). 또한, 일사량 도달을 극대화하기 위하여 북반구의 지리적 특성에 맞추어 경사 방향을 남향( $135^\circ \sim 225^\circ$ )으로 설정하여 설치 장소를 분석하였다. 주민의 불편을 최소화하기 위하여 설치 장소는 도로로부터 최소 100 m 이상 떨어진 곳으로 정하였고, 송배전 비용을 최소화하기 위해 MGES 시설로부터 반경 1 km 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, 2023), 일사량에서 태양광 발전량으로의 전환 시에는 25%의 발전 효율을 가정하였다(NREL, 2018). 분석 결과 212개 광산 인근의 태양광 발전 적지에서 연간 생산 가능한 에너지는 평균 178 MWh로 추정되었다(Table 3). 태양광 에너지 발전 잠재량과 발전 적지의 상대적 면적에 대한 지리적 분포는 Fig. 4(a)에서 확인할 수 있다.

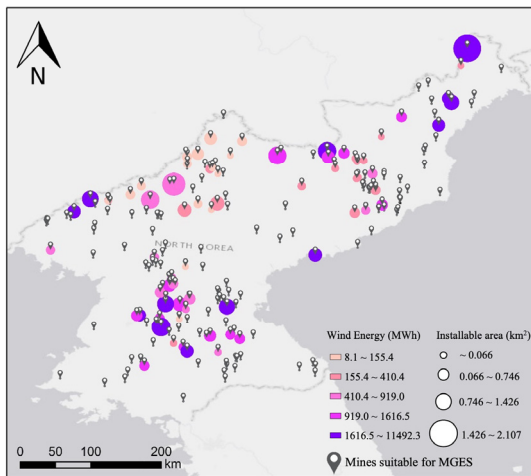
### MGES 인근 풍력 발전 적지 선정

유류 폐광산 부지를 활용한 전력 발전 방식 중, 풍력 발전은 폐광산 부지의 넓은 여유 공간과 풍부한 풍력 자원을 활용하기 용이한 방식이다. 또한, 풍력 발전은 산악 지역에 위치한 광산에서 높은 풍속을 활용하여 발전량을 얻을 수 있어 에너지 저장 시설과의 연계를 통해 전력 공급의 안정화에 기여할 수 있다. 북한 폐광산 부지 역시 풍력 발전의 도입이 가능할 것으로 예상되나, 풍력 발전 설비의 발전량 계산에 필요한 풍속, 온도 등의 기후 데이터의 획득이 제한되어 정확한 발전량을 추정할 수 없다.

본 연구에서는 중력에너지 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  $10^\circ$  이하인 지역을 우선적으로 선정하였다(KEI, 2019). 또한, 주민의 생활 불편을 최소화하고, 풍력 발전기 진입 도로 개설의 효율성을 고려하여 설치 장소는 도로로부터 최소 100 m 이상, 최대 2 km 이내의 거리에 위치하도록 정하였다(KEI, 2019). 송배전 비용의 최소화를 위해 MGES 시설로부터 반경 1 km 이내에 위치한 지역을 설치 후보지로 선정하였다. 본 연구에서는 북한 27개 지점에 대한 10년간(2013~2022년)의 연평균 풍속 데이터(KOSIS, 2023c)를 기반으로, 크리깅 보간법을 적용하여 주변 지점의 값들로부터 새로운 지점의 예측값을 도출했다. 이 방법을 통해, 212개 북한 광산 각각에 대해 공간적으로 적절한 예측 풍속 값을 얻어 사용하였다. 북한의 10년 연평균 풍속이 1.47 m/s로 나타나 저풍속에 적합한 모델의 파라미터를 고려하여 결정하였다. 이때 터빈 허브 높이 83.5 m에 맞춰 높이 보정을 진행한 값을 사용하였다. 로터의 직경은 113 m, 터빈의 출력 용량은 2.3 MW이다(UNISON, 2023). 발전량 계산은 식 (2)과 같이 계산되며, 여기서 A는 풍력 발전기의 바람에 수직인 면적( $m^2$ ),  $v$ 는 풍속( $m/s$ ),  $\rho$ 는 공기 밀도( $kg/m^3$ )이다. 풍력 터빈당 차지하는 면적은 한 방향으로 3개의 회전자 직경, 다른 방향으로 10개의 회전자 직경을 고려하여 평균 위치 값을 이용하여 계산하였다(Dunlap, 2018). 발전 효율( $\mu$ )은 식 (2)와 같이 계산되며, 여



(a) Solar



(b) Wind

**Fig. 4.** Annual renewable energy generation potential near MGES system: (a) solar energy; (b) wind energy.

기서 C는 터빈 효율,  $k_w$ 는 후류 손실,  $k_m$ 는 기계적 손실,  $k_e$ 는 터빈의 전기적 손실,  $k_{e,t}$ 는 그리드 손실,  $k_t$ 는 유지보수로 인한 손실 값이며, 이에 대한 값은 Haider *et al.*(2022)을 참고하였다.

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

$$\mu = (1 - k_m) \times (1 - k_e) \times (1 - k_{e,t}) \times (1 - k_t) \times (1 - k_w) \times C_p \quad (3)$$

$$\text{Annual } P_{output} = \mu \times P_{wind} \times \text{FLH (Full Load Hour)} \quad (4)$$

풍력 발전소 설치에 적합한 지역 분석 결과, 중력에너지 저장 시설로 활용 가능한 광산 인근에서 풍력 발전소 설치가 적합한 광산은 총 82개로 확인되었다. 이 82개 광산 인근에서 설치 가능한 평균 면적은  $0.5 \text{ km}^2$ 이며, 연간 풍력 발전 잠재력은 평균 1098 MWh로 추정된다(Table 3). 그러나 이는 북한의 실제 토지 이용 현황, 환경적 영향, 그리고 설치 제한 지역 등을 고려하지 않고 산정한 것이므로 실제 설치 가능한 면적에 대한 과대 추정의 가능성이 있다. 풍력에너지 발전 잠재량과 발전 적지의 상대적 면적에 대한 지리적 분포는 Fig. 4(b)에서 확인할 수 있다.

### MGES와 재생에너지 연계

본 연구는 풍력 및 태양광 발전의 잠재력과 함께 MGES를 통한 장기 에너지 저장의 가능성을 조사하였다. 에너지 저장 시스템의 경제성을 확보하기 위해, 높이 차이가 55 m 이상인 북한 광산을 대상으로 MGES의 잠재량을 분석하였다. 또한, 선택된 광산들 인근 1 km 범위 내에서 GIS 분석을 수행하여 태양광 및 풍력 발전 설비의 설치 가능 면적과 장기 에너지 생산량을 파악하였다. 연구 결과, 212개의 광산

에 설치될 중력에너지 저장 시설의 장기적 잠재 에너지량은 50,000 ton의 무게추를 기준으로 평균 7.3 MWh로 추정되었다(Table 3). 연간 태양광 발전 잠재량은 평균 178 MWh, 풍력 발전 잠재량은 평균 1098 MWh로 나타났다.

MGES 인근 지역에서 재생에너지 설치에 적합한 부지를 도출하고 발전 잠재량을 파악한 결과를 상세히 탐색하기 위한 목적으로 전체 광산 중 하나인 북한 자강도 자강군에 위치한 동남광산을 사례로 선정하여 살펴보았다(Fig. 5).

Fig. 5는 동남광산 인근 90 m 거리 내에서 최대 높이차를 보이는 지점이 오른쪽 대각선 위 방향의 픽셀에 위치함을 보여준다. 이 조건에서 50,000 ton의 무게추를 사용하는 MGES 시스템은 연간 5.7 MWh의 에너지 저장이 가능하다고 추정된다(Table 4). GIS 분석을 통해 발견된 재생에너지 설치 적합지 중, 태양광 발전 적합 부지는 총 4곳으로, 이들은 7.4에서 18.7 MWh 사이의 에너지를 생산할 수 있는 잠재력을 가지는 것으로 평가되었다(Table 4). 또한, 풍력 발전은 최대 212 MWh의 생산 잠재력을 지닌 것으로 나타났다(Table 4). 풍력터빈 간 최적의 설치 간격은 로터 직경의 8-12배(풍향과 수직 방향) 및 2-4배(풍향과 평행 방향)로 설정하는 것으로 알려져 있다(Dunlap, 2018). 본 연구는 UNISON 113 풍력 터빈(직경 113 m)을 기준으로 한 방향에서 3개, 다른 방향에서 10개의 회전자 직경을 고려한 평균 위치를 사용하여, 터빈 하나당  $0.38 \text{ km}^2$ 을 차지한다고 가정하였다. 본 연구에서는 Table 4와 같이 풍력 발전 설치 가능 면적이  $0.3 \text{ km}^2$ 로 계산되어 단 하나의 터빈을 설치하고, 10년간의 평균 풍속 데이터를 사용하여 연간 발전 잠재량을 계산하였다. MGES에 비해 태양광, 풍력 모두 발전 잠재량이 상당히 높음을 보여주나, 실제 설치 가능한 부지의 평가가 지반 안정성이나 환경적 문제를 고려하지 않아 과대 추정될 수 있다. 또한, Fig. 5에서 태양광 설치 가능 지역 중 가장 멀리 떨어진 지역의 경우, 발전 잠재력 대비 송전 비용의 증가 부담이 없는지 추후 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

**Table 3.** Long-term MGES storage potential in North Korean mines and the associated potential for solar and wind energy generation

|       | MGES         |                       | Solar        |                                    | Wind         |                                    |
|-------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|
|       | Energy (MWh) | Height difference (m) | Energy (MWh) | Installable area ( $\text{km}^2$ ) | Energy (MWh) | Installable area ( $\text{km}^2$ ) |
| Mean  | 7.3          | 75                    | 178.2        | 0.116                              | 1098.2       | 0.510                              |
| Max   | 16.8         | 171                   | 1030.6       | 0.631                              | 11492.3      | 2.107                              |
| Min   | 5.4          | 55                    | 5.3          | 0.004                              | 8.1          | 0.066                              |
| Sum   | 1555.6       | -                     | 32429.7      | 21.052                             | 84562.7      | 41.344                             |
| Count | 212          |                       | 212          |                                    | 82           |                                    |

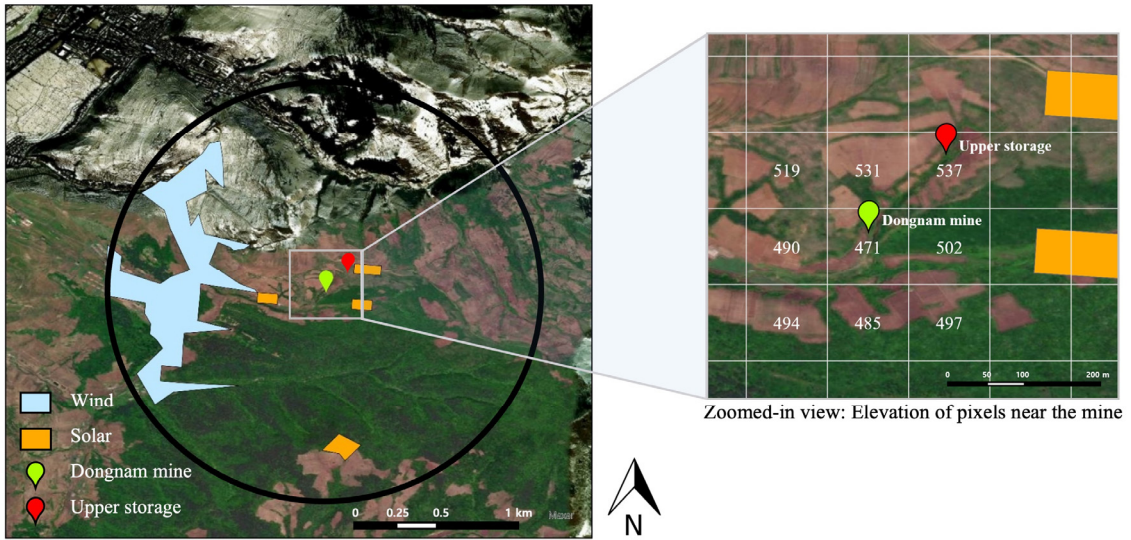


Fig. 5. Suitable sites for solar and wind power installation near Dongnam mine for MGES use.

Table 4. Long-term storage capacity of Dongnam mine MGES system and potential for solar and wind energy generation

|       | Specification                  | Long-term energy (MWh) |
|-------|--------------------------------|------------------------|
| GES   | Height: 66 m                   | 5.7                    |
|       | Mass: 50,000 ton               |                        |
| Wind  | Area: 0.3 km <sup>2</sup>      | 212                    |
|       | Wind speed: 1.4 m/s            |                        |
| Solar | Area: 0.013 km <sup>2</sup>    | 18.7                   |
|       | kWh/m <sup>2</sup> /year: 6.22 |                        |
|       | Area: 0.007 km <sup>2</sup>    | 10.7                   |
|       | kWh/m <sup>2</sup> /year: 6.26 |                        |
|       | Area: 0.005 km <sup>2</sup>    | 7.6                    |
|       | kWh/m <sup>2</sup> /year: 5.93 |                        |
|       | Area: 0.005 km <sup>2</sup>    | 7.4                    |
|       | kWh/m <sup>2</sup> /year: 5.75 |                        |

## 결론

MGES는 장기간 에너지 저장이 가능하며, 태양광과 풍력 등 재생에너지와 결합될 경우 재생에너지의 변동성을 균형 있게 조절할 수 있다. 대부분의 폐광산은 산지에 위치해 있으며 인근 지역의 큰 높이차를 보유하고 있기 때문에, 이러한 광산지를 에너지 저장 매체로 활용하는 것이 MGES 설치에 적합하다. 북한에 위치한 212개의 광산에 설치 가능한 중력에너지 저장 시설의 평균 잠재 에너지량

은 7.3 MWh(50,000 ton 무게추 기준)로 추정되며, 이는 대규모 에너지 저장 시설로서 충분한 역량을 갖춘 것으로 나타났다. MGES는 매체의 무게를 증가시키는 방법 등으로 확장이 가능하여 에너지 저장용량을 쉽게 증가시킬 수 있다는 장점이 있다.

MGES 인근 지역에서 발전 가능한 재생에너지의 양은 태양광의 경우 연간 평균 178 MWh, 풍력은 1,098 MWh로 추정된다. 에너지 저장설비를 최대한 활용한다고 가정했을 때, 발전 설비는 저장설비 용량의 100%에 해당하는 전력을 발전해야 하며, 이를 통해 MGES 주변에는 충분한 재생에너지 발전 부지가 확보됨을 확인할 수 있었다. 하지만, MGES 시스템의 저장 잠재량 대비 재생에너지의 잠재량이 현저히 크게 도출되었다. 이러한 결과는 단순한 지형 조건과 도로 이격거리만을 고려하여 산정한 것으로, 실제 재생에너지 잠재량이 과대 평가되었을 가능성을 내포하고 있다. MGES의 상대적으로 낮은 저장 잠재력을 고려할 때, 이는 단독 해결책으로서보다는 다양한 에너지 저장 방식을 결합한 종합적인 솔루션의 일환으로 고려될 수 있다. 재생에너지와 MGES와 같은 저장 기술의 통합은 재생에너지의 간헐성을 효과적으로 해결하고 안정적인 에너지 공급을 지원할 수 있는 방안을 제시한다.

MGES는 높이차가 충분히 확보되어야 경제적인 효율성을 가진다. 산의 높은 곳에서는 풍력 발전이 유리하지만, 산의 차광 효과와 산간 지역의 구름 형성으로 인해 태양광 발전에는 불리할 수 있다. 본 연구에서는 태양광 발전의 그림자에 의한 발전량 저감을 고려하여 잠재량을 계산했지만,

장기적인 연간 잠재량을 파악하였다. 그러나 ESS와의 연계를 고려할 때, 단기적인 발전량과 에너지 수요량에 맞춰 잠재량을 상세한 비교 분석이 필요하다. 북한의 데이터 제공에는 한계가 있으나 향후 위성 영상을 활용하여 보다 시간 측면에서 상세한 분석이 필요하다. 더 나아가, 실제로 잉여 전력이 MGES에 적용되기 때문에 위성 영상을 활용하여 에너지 수요량을 예측한다면 태양광 또는 풍력 발전의 예상되는 잉여 전력과 MGES의 용량을 비교할 수 있다.

Hunt *et al.*(2020)은 MGES 시스템이 광산에서 활용될 때 주변에서 쉽게 구할 수 있는 재료를 무게추로 활용함으로써 비용을 절감할 수 있으며, 기존 지형의 높이차를 이용해 추가 굴착 비용을 최소화할 수 있다고 한다. 이러한 점을 바탕으로, 북한에서 MGES를 적용할 경우, 추후 다른 ESS와 비교하여 에너지 저장 및 설치 비용의 경제성을 분석하는 연구가 필요하다.

본 연구는 북한의 폐광산을 활용한 중력에너지 저장 시스템과 재생에너지의 결합 가능성을 탐색하는 초기 단계를 제공함으로써, 재생에너지 활용을 위한 보다 포괄적인 에너지 저장 전략의 중요성을 강조한다. 이는 재생가능 에너지원의 효율적 활용과 안정적인 에너지 공급 체계 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 사 사

이 논문은 2023년도 서울대학교 통일평화연구원의 재원으로 통일기반구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물임.

## References

- Bang, G.J., 2018. *North Korea's Mineral Resources and the Path to Economic Prosperity between North and South Korea*, Samhwa Print, p.64-65.
- Dunlap, R.A., 2018. *Sustainable Energy (2nd Ed)*, Cengage Learning, p.321-325.
- ESRI, 2023.9.24., <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/area-solar-radiation.htm>
- Fan, J., Xie, H., Chen, J., Jiang, D., Li, C., Tiedeu, W.N., and Ambre, J., 2020. Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs, *Applied Energy*, 258, 114007.
- G1TV, 2023.11.27., [http://www.g1tv.co.kr/news/?newsid=238372&mid=1\\_207\\_3](http://www.g1tv.co.kr/news/?newsid=238372&mid=1_207_3)
- Gangwon News, 2023.12.18., <https://www.gwnews.org/news/articleView.html?idxno=237929>
- Haider, I., Siam, M.S.I., Nuhel, A.K., Hriday, T.A., and Shaha, D., 2022. Distributed Hybrid Power System Integrated with Smart Microgrid, *In 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, p.1333-1340.
- Hunt, J.D., Zakeri, B., Falchetta, G., Nascimento, A., Wada, Y., and Riahi, K., 2020. Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies, *Energy*, 190, p.116419.
- Information systems for Resources of North Korea (I-RENK), 2023.07.19., <https://irenk.net/?menu=71>
- Jang, M.H., Choi, Y.S., Park, H.D., and Go, W.R., 2013. Assessment of Wind Power Potential at Abandoned Mines in Kangwon Province, Korea, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, 50(4), p.470-481.
- Korea Electrical Manufacturers Association (KOEMA), 2023. 07.19., <https://nk.koema.or.kr/status/survey.html>
- Korea Environmental Institute (KEI), 2019. *Wind Power Environmental Impacts and Location Guidelines*, Sejong, South Korea, 7p.
- Korea Institute for Industrial Economics & Trade (KIET), 2017. *Current Status and Implications of Renewable Energy in North Korea*, Report, Sejong, South Korea, 113p.
- Korea Ministry of Environment (KMOE), 2018. *Environmental Assessment Guidelines for Terrestrial Solar Power Projects*, Sejong, South Korea, 7p.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2023a. 2023. 7.19., [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tbId=DT\\_1ZGA6D&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tbId=DT_1ZGA6D&conn_path=I2)
- Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2023b. 2023. 7.25., [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tbId=DT\\_1ZGA35&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tbId=DT_1ZGA35&conn_path=I2)
- Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2023c. 2023. 8.6., [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tbId=DT\\_1ZGA141&conn\\_path=I2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tbId=DT_1ZGA141&conn_path=I2)
- Morstyn, T., Chilcott, M., and McCulloch, M.D., 2019. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts, *Applied Energy*, 239, p.201-206.
- Natioanl Renewable Energy Laboratory (NREL), 2018. *SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update*, Technical Report, Colorado, US, 93p.
- Oh, M.C., Kim, S.M., Koo, Y.H., and Park, H.D., 2018. Analysis of Photovoltaic Potential and Selection of Optimal Site near Gumdeok Mine. North Korea, *New & Renewable Energy*, 14(3), p.44-53.
- ScienceAlert, 2024.1.4., <https://www.sciencealert.com/germany-is-converting-a-coal-mine-into-a-massive-renewable-energy-battery>
- Song, J.Y., Choi, Y.S., Jang, M.H., and Yoon, S.H., 2014. Development of Separation Process for Utilization of Low

Grade Ilmenite Ore, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, 51(4), p.525-536.

The Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2023.5.7., <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

Tong, W., Lu, Z., Chen, W., Han, M., Zhao, G., Wang, X., and Deng, Z., 2022a. Solid gravity energy storage: A review, *Journal of Energy Storage*, 53, p.105226.

Tong, W., Lu, Z., Sun, J., Zhao, G., Han, M., and Xu, J., 2022b. Solid gravity energy storage technology: Classification and comparison, *Energy Reports*, 8, p.926-934.

UNISON, 2023.5.8., [https://www.unison.co.kr/product/2MW\\_Platform\\_U113](https://www.unison.co.kr/product/2MW_Platform_U113)

World Economic Forum, 2024.2.14., <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/gravity-batteries-store-renewable-energy/>

**구 지 윤**

2021년 이화여자대학교 환경공학과 공학사

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정  
(E-mail; rmlbbs9808@snu.ac.kr)

**강 일 석**

2017년 서울대학교 에너지시스템공학부 공학석사

현재 서울대학교 에너지자원공학부 박사과정  
(E-mail; xenopsis@snu.ac.kr)

**최 지 원**

2019년 서울대학교 에너지자원공학과 공학사

현재 서울대학교 에너지자원공학부 박사과정  
(E-mail; cjw970514@snu.ac.kr)

**임 준 수**

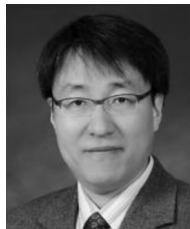
2023년 서울대학교 에너지시스템공학부 공학석사

현재 서울대학교 에너지자원공학부 박사과정  
(E-mail; sooyalim@snu.ac.kr)

**송 재 준**

2000년 서울대학교 자원공학과 PhD

현재 서울대학교 에너지자원공학과 교수  
(E-mail; songjj@snu.ac.kr)

**박 형 동**

1994년 Imperial College 지질학과(지질공학) PhD

현재 서울대학교 에너지자원공학과 교수  
(E-mail; hpark@snu.ac.kr)