

울릉도 녹색섬 조성을 위한 태양광 발전 잠재량 평가

김진솔¹⁾ · 서장원²⁾ · 박형동^{1)*} · 강용혁³⁾ · 윤창열³⁾

Assessment of Photovoltaic Potential for Constructing Ulleung-do as a Sustainable Energy Island

Jinsol Kim, Jangwon Suh, Hyeongdong Park*, Yongheack Kang and Changyeol Yun

(Received 21 April 2014; Final version Received 23 July 2014; Accepted 20 August 2014)

Abstract : This paper assessed photovoltaic potential in Ulleung-Do. Toward this aim, geographic information systems (GIS) was used to extract the feasible areas and to analyze optimal site of photovoltaic systems considering geographical, topographical and environmental characteristics of Ulleung-Do. Restricted areas by legal, ecological and environmental conditions were determined. Then, suitability analysis was conducted to identify areas satisfying the criteria of altitude, slope and daylight duration. The photovoltaic potential was evaluated using data on solar irradiance of Ulleung-Do and RETScreen software. Solar irradiance of Ulleung-Do was estimated by substituting relative sunshine duration data to the interaction formula of relative sunshine duration and irradiance of Gangneung and Pohang which is close to Ulleung-Do and border the seaside. Using the estimated solar irradiance, photovoltaic potential in Ulleung-Do is calculated as 43.6 GWh/yr, approximately.

Key words : Photovoltaics potential, Ulleung-Do, Geographic information systems, RETScreen

요약 : 본 연구에서는 울릉도를 대상으로 태양광 발전 잠재량 평가를 수행하였다. 이를 위해 울릉도의 지리적, 지형적, 환경적 특성을 종합적으로 반영하여 태양광 발전 입지 선정 조건을 수립하고, 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 이용하여 태양광 발전 시스템의 적지를 추출하였다. 법적, 생태·환경적 규제로 인하여 개발이 불가능한 지역을 배제하였고, 표고, 지형경사 및 음영 조건에 의한 일조시간 기준을 만족하는 태양광 발전 시설의 적지를 추출하였다. 추출된 적지에 대하여 울릉도의 일사량 자료와 RETScreen 소프트웨어를 이용하여 태양광 발전 잠재량을 산정하였다. 울릉도의 일사량 자료의 경우, 계측 자료가 부족하여 울릉도와 가깝고 해안에 접한 강릉과 포항 지역의 일조율과 일사량의 관계식을 도출한 뒤, 울릉도의 일조율 자료를 대입하여 추정하였다. 분석 결과, 울릉도의 태양광 발전 잠재량은 약 43.6 GWh/yr로 산정되었다.

주요어 : 태양광 발전 잠재량, 울릉도, 지리정보시스템, RETScreen

서론

2009년 지식경제부는 울릉도와 독도를 저탄소 녹색섬 조성의 종합 실천모델로 육성하는 녹색섬 조성 사업을 발표하였다. 2014년 경상북도와 울릉군은 울릉도를 에너지 자립섬으로 만들기 위한 울릉도 자립형 마이크로그리드 시범사업을 추진하는 등 최근 들어 울릉도 녹색섬 조

성에 대한 관심이 증대되고 있다. 울릉도는 육지와 독립적인 전력계통을 가지고 있는 도서지역으로서 대부분의 전력수급은 환경오염이 발생하는 내연발전(화력발전설비)을 통해 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 지리적, 환경적 특성들로 인하여 울릉도는 에너지 자립형 녹색섬 조성 사업에 가장 적합한 도서지역으로 평가되고 있다(MKE, 2009). 울릉도의 에너지와 환경 문제의 해결 및 지속 가능한 발전을 위해서는 신재생에너지의 도입이 필요하며, 울릉도를 에너지 자립형 녹색섬으로 개발하기 위해서는 먼저 적용 가능한 재생에너지원을 검토할 필요가 있다.

울릉도에 적합한 신재생에너지원을 결정하기 위해 자연 조건, 경제성, 유지관리 측면 등의 항목에 대하여 에너지

- 1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부
- 2) 서울대학교 에너지자원기술연구소
- 3) 한국에너지기술연구원 신재생에너지지원센터

*Corresponding Author(박형동)

E-mail; hpark@snu.ac.kr

Address; Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

전문가 그리고 울릉도를 다녀왔거나 생활 경험이 있는 내국인 500명을 대상으로 수행된 신재생에너지에 대한 선호도 조사에 따르면(MKE, 2012), 신재생에너지원 중에서 울릉도 자연조건상 적절한 에너지로는 풍력에너지와 태양광에너지가 각각 1, 2위를 차지하였다. 경제성 측면에서는 태양광에너지, 태양열에너지 순으로 선호도가 나타났으며, 유지관리에 적절한 에너지로는 태양열에너지와 태양광에너지가 높은 선호도를 보였다. 울릉도에 도입할 신재생에너지원에 대한 조사 결과를 종합해볼 때 태양광, 풍력 등이 높은 선호도를 보인 것으로 확인되었다.

에너지경제연구원은 울릉도 지역의 신재생에너지 잠재량을 개략적으로 조사하였으며, 목질계 바이오매스의 잠재량이 가장 풍부하다고 보고하였다(Ulleung-Gun, 2009). 전력연구원, 대구경북연구원 및 국토연구원은 다양한 신재생에너지 기술의 적용가능성을 살펴보고 실천전략 및 정책을 제안하였으나 에너지 기술의 개념적인 적용만을 다루는데 그쳤다는 한계가 있다(MKE, 2009; DGI, 2010; Gyeongsangbuk-Do, 2011). 한국에너지기술연구원은 신재생에너지 기술 전반에 걸쳐서 잠재량을 평가하고, 에너지 공급계획 시나리오를 제시하였다(MKE, 2012). 그러나 기존 연구들은 에너지 공급을 위한 기초 타당성 평가 단계의 연구로서 신재생에너지의 개략적인 평가에 초점을 두고 있거나, 신재생에너지원별 가용지 및 적지 분석 절차에 있어 현지 특성이 고려되지 못했다는 한계가 있다. 또는, 소규모의 전력 사용을 위한 건물 옥상이나 유도등을 대상으로 한 태양광 잠재량이 산정되었다.

최근 태양광 발전 잠재량 평가를 위해 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)과 신재생에너지 평가 프로그램을 기반으로 한 연구가 다수 보고되었다. GIS 기반의 분석은 태양광에너지의 공간적 변동성을 반영한다는 장점을 가지고 있다(Choi *et al.*, 2011a).

Choi 등(2011a)은 ArcGIS 소프트웨어와 TRNSYS 소프트웨어를 결합하여 도심지 태양광 발전 잠재량의 시공간적 변동성을 고려할 수 있는 분석 도구를 개발하였다. Hofierka와 Kanuk(2009)는 GRASS GIS 소프트웨어(<http://grass.osgeo.org>)와 태양광 발전 잠재량 평가 프로그램 PVGIS(<http://photovoltaic-software.com/pvgis.php>)를 이용하여 슬로바키아 도심지 건물의 옥상 면적에 대한 태양광 발전 잠재량을 평가하였다. 국내에서는 Song과 Choi(2012)가 GIS와 SAM 소프트웨어(<http://sam.nrel.gov>)를 이용하여 대학 캠퍼스 옥상 태양광 발전 시스템의 도입 가능성을 검토하였다. Choi 등(2013)은 전라남도 폐광산 부지에 태양광 발전 시스템을 도입할 경우 기대할 수 있는 전력 생산량과 경제적 효과를 분석한 바 있다. 그러나 울릉도를 대상으로 Solar-farm 형태의 태양광 발전을 위한 잠재량 평가는 아직 이루어지지 않았다.

본 연구는 울릉도의 지속적인 에너지 공급계획 수립을 위한 기초연구로서, GIS를 기반으로 울릉도의 지리적, 지형적, 환경적 특성을 반영한 태양광 발전 시스템의 가용지 및 지형적 적지를 추출하고, RETScreen 소프트웨어를 이용하여 태양광 발전 시스템 설치 시 기대되는 태양광 발전 잠재량을 평가하고자 한다. 이를 통해, 울릉도의 가용부지에 대한 태양광 발전 시스템 도입의 타당성을 검토할 것이다.

연구지역

울릉도는 경상북도 울릉군에 속한 섬으로 지리적으로는 위도 37° 29'N, 경도 130° 54'E 에 위치하고 있다(Fig. 1(a)). 울릉도의 전체 면적은 약 72.89 km²으로, 동서간의

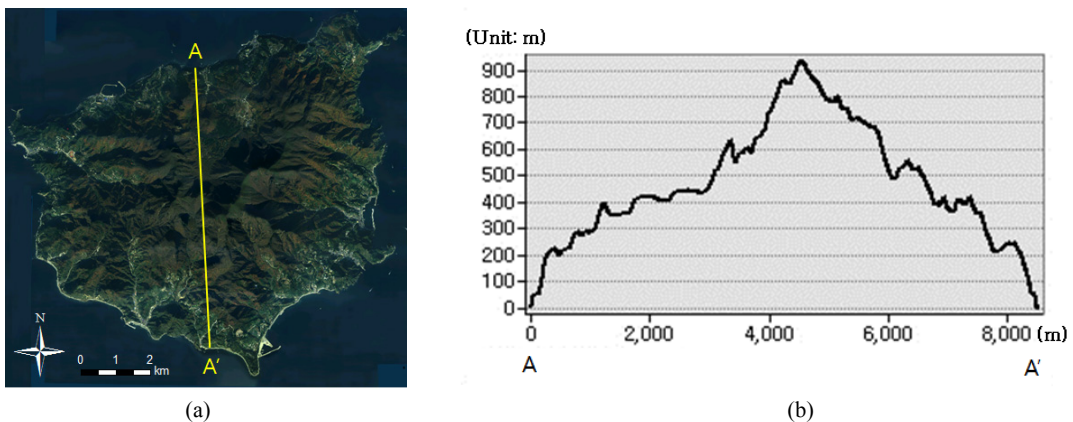


Fig. 1. Ulleung-Do. (a) satellite image, (b) cross-sectional profile of A-A' section.

거리는 약 10 km, 남북간의 거리는 약 9.5 km에 이른다. 울릉도는 화산활동에 의해 형성된 중상화산의 정상부에 해당하며, 지질은 비교적 강도가 약한 집괴암, 응회암 등의 화산암과 강도는 높으나 수직절리가 잘 발달하는 조면암으로 구성되어 있다. 섬 중앙부에는 성인봉이 높게 솟아있고, 북부에는 칼데라 화구가 함몰되어 형성된 나리분지가 있다. Fig. 1(b)에 나타나듯이 울릉도에는 급경사지가 다수 분포하고 있으며, V자 계곡들이 발달한 지형적 특성으로 인하여 많은 지역에 그림자가 생성된다. 해안가를 중심으로 형성되어 있는 일주도로 주변에는 조면암질의 급경사지가 많이 분포하며, 이로 인해 낙석이 빈번하게 발생한다(Choi *et al.*, 2011b; Seo *et al.*, 2012).

연구방법 및 자료

울릉도의 태양광 발전 시스템 도입에 의한 태양광 발전 잠재량을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 분석 모델을 설계하였다. 먼저 울릉도의 토지이용규제, 환경적 규제에 의해 태양광 발전시설을 위한 개발 가능 지역을 추출한다. 가용지에 대하여 고도와 경사 그리고 음영 조건 등의 지형적 입지 특성을 고려하여 적지를 선정한다. 추출된 태양광 발전 시스템의 적지에 대해 일사량 자료와 설치될 태양광 발전 시스템의 특성 인자(성능, 규격 등) 조건을 RETScreen 소프트웨어에 입력하여 태양광 발전 시스템의 설치로부터 기대되는 연간 발전량을 계산한다.

개발 가용지 추출 방법

본 연구에서는 토지이용규제와 환경적 규제에 인하여 태양광 발전시설의 설치가 불가능한 지역을 배제함으로써 태양광 발전시설의 설치가 가능한 가용지를 추출하였다. 울릉도의 토지현황 및 지정된 용도에 의해 개발이 제

한되는 지역과 생태적 가치가 높은 지역은 발전시설의 부지로 부적합하다고 판단하여 배제하였다.

우리나라는 토지이용규제 기본법에 의해 토지의 용도를 구분·지정하고 있으며, 이에 따라 개발행위가 제한된다. 따라서 울릉군 도시계획 지형도면에 구분된 용도지역을 이용하여 발전시설의 개발이 제한되는 도시지역과 자연환경보전지역을 배제하였다. 또한, 현재 건물이나 시설물이 위치한 토지와 하천 등에는 대규모 발전시설의 설치가 불가능하다. 따라서 국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도에 포함된 도로와 하천, 토지피복지도의 도시지역을 각각 추출하여 가용지로부터 배제하였다.

울릉도는 국내의 대표적인 관광지로 많은 생태·자연 관광 자원을 보유하고 있다. 환경부에서는 이와 같이 생태·자연적 가치가 높은 지역의 효과적인 유지관리를 위해 생태·자연도를 제작하여 생태적, 자연적, 경관적 가치 등에 따라 지역을 3개의 등급으로 분류하고 있다. 대규모 발전시설의 경우 자연환경보전법에 의해 생태·자연도의 1·2등급 지역을 보전해야 하는 환경영향평가대상 사업에 속한다(Korea Law Information Systems, 2014b) 따라서 본 연구에서는 생태·자연도의 1·2등급 지역을 배제하여 자연환경뿐만 아니라 자연관광 자원을 보전하였으며, 별도관리지역을 배제함으로써 역사적, 문화적, 경관적, 환경적 가치가 있는 보전지역을 제외하였다.

토지이용규제 및 환경적 규제에 인하여 태양광 발전시설의 설치가 불가능한 모든 지역을 중첩하였다. 중첩분석 결과 추출된 지역들을 배제함으로써 태양광 발전시설 개발 가용지를 추출하였다.

지형적 기준의 적지 추출 방법

개발 가용지 분석을 통해 추출된 태양광 발전시설 개발 가능 지역에 대해 지형적 조건을 고려한 적지분석을

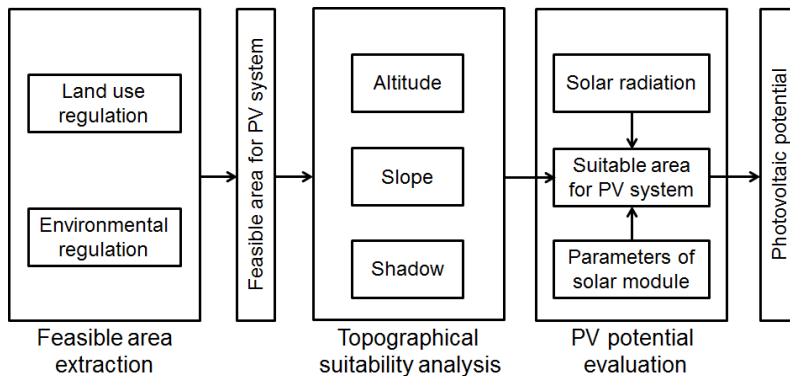


Fig. 2. Flow chart for the assessment of PV potential in Ulleung-Do.

수행하였다. 표고, 지형경사 그리고 지형에 의한 음영효과를 고려한 일조시간 기준 등을 지형적 조건으로 선정하였으며, 울릉도 전 지역의 기후가 일정하다고 가정하여 기후 조건은 제외하였다. 각 항목별 조건에 대한 적지 선정 기준을 수립하고 불린(Boolean) 모델을 적용함으로써 태양광 발전시설 입지의 지형적 조건을 만족하는 모든 지역을 추출하였다. 이를 위해, ArcGIS 10.1 소프트웨어를 이용하여 국토지리정보원의 1:5000 수치지형도로부터 5 m × 5 m 해상도의 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 생성하였다.

태양광 발전시설의 입지에 있어 표고 조건은 설치비용, 자연환경, 산지형의 경관과 관련성이 있다. 태양광 발전 시스템의 운반 및 설치비용을 저감하고 울릉도의 자연환경 및 경관을 보존하기 위한 측면에서는 고도가 낮은 지역이 입지 조건에서 유리하다. 울릉도는 대부분이 산지로 이루어져 있고, 상당한 규모를 갖는 섬이기 때문에 산지관리법이 적용되어야 한다. 산지의 경관을 보존하기 위해서 해당 산지 표고의 50% 미만의 표고를 갖는 지역에 설치해야 한다는 산지관리법의 산지전용 허가 기준에 따라 울릉도 중앙의 최고봉인 성인봉 표고(984 m)의 50%에 해당하는 492 m를 표고 최대 기준으로 선정하였다(Korea Law Information Systems, 2014a)

지형경사 조건은 개발 과정에서의 용이성, 개발에 의한 환경 훼손, 개발 후 사면의 안정성에 영향을 미칠 수 있으며, 지형경사각이 작을수록 발전시설의 입지로서 적합하다고 볼 수 있다. KEI(2009)에서는 고정식 태양광 모듈의 경우 경사도 10°이내의 지역에 설치하는 것을 권장하고 있지만 이에 대한 객관적인 근거나 규정은 존재하지 않는 실정이다. 본 연구에서는 지형기복의 변화가 심하고 급경사지가 많이 분포하고 있는 울릉도 지역의 지형적 특성과 객관적인 규정에 근거하여 지형경사 조건을 수립하고자 하였다. 따라서 울릉도 계획 조례 제 20 조(Enhanced Local Laws and Regulations Information Systems, 2014)에 의해 법적으로 개발이 허가되는 18°를 경사각 조건으로 설정하였다.

일조시간은 발전량에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 동일한 기후 조건에서 충분한 발전량을 확보하기 위해서는 지형에 의한 음영효과를 고려했을 때 충분한 일조시간을 확보해야 한다. MKE와 KEMCO(2013)는 신재생에너지보급사업의 적정성과 효율성을 확대하기 위하여 신재생에너지원별 시공기준을 제시하고 있다. 태양광 발전 시스템 도입의 효율성을 확보하기 위하여 태양광 설비의 일조시간은 1일 5시간 이상을 권고하고 있다. 본 연구에서는 매일 1일을 기준으로 동지의 낮 시간에 해당하는 오전 9시부터 오후 3시까지의 일조시간을

계산하였으며, 일조시간이 1일 중 5시간 이상인 지역을 적지 대상으로 선정하였다.

추출된 개발가능지에 대하여 표고, 지형경사 그리고 음영효과에 의한 일조시간 조건을 만족하는 태양광 발전 시설의 입지를 중첩하여 태양광 발전시설의 적지를 추출하였다.

태양광 발전 잠재량 산정 방법

개발 가능지 및 지형적 조건을 고려하여 추출된 태양광 발전 시스템 적지의 면적으로부터 설치 가능한 태양광 모듈의 개수를 계산한 뒤, RETScreen 소프트웨어를 이용하여 태양광 발전 잠재량을 계산하였다. RETScreen은 일사량과 태양광 발전설비의 규격, 용량, 효율 등의 변수 입력을 통해 해당 지역에서 기대되는 발전량을 계산한다(Choi *et al.*, 2013). 이때, 연간 발전량은 태양광 모듈에 전달되는 태양광에너지를 의미하는 월평균 경사각일사량, 태양광 모듈의 개수와 효율(에너지 손실 정도) 등의 자료로부터 계산된다.

태양광 발전시설의 도입으로부터 기대할 수 있는 발전량을 산정하기 위해서는 태양광 패널에 도달하는 일사량을 1년 이상 예측한 자료가 필요하다. 그러나 울릉도의 경우, 1년 이상 측정된 일조율(일조시간과 가조시간의 비) 자료는 존재하는 반면, 일사량 자료는 매우 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 타 지역에서 측정된 일조율과 일사량 자료의 상관관계로부터 회귀식을 도출하고 울릉도의 일조율 자료를 통해 일사량을 추정하였다. 이를 위해 일조시간으로부터 일사량을 추정하는데 있어 가장 널리 사용되고 있는 Angstrom-Prescott 식(Almorox and Hontoria, 2004; Yorukoglu and Celik, 2006)을 이용하였다.

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

H 와 H_0 는 각각 월평균 수평면 전일사량과 대기권 밖 수평면 일사량을 의미하며, S 와 S_0 는 각각 월평균 일조시간과 가조시간을 의미한다. a 와 b 는 상관성 분석을 통해 경험적으로 산출되는 회귀식의 상수이다. 즉, 일조율과 일사량의 관계식과 해당 지역의 일조율만 안다면 일사량을 추정할 수 있다.

회귀식을 구성하기 위해서 한국에너지기술연구원이 국내에 위치한 16개의 일사량 측정 지점(강릉, 광주, 대구, 대전, 목포, 부산, 서산, 서울, 영주, 원주, 전주, 제주, 진주, 청주, 춘천, 포항)에 대하여 30년(1982-2011년)간 예측한 일조율과 일사량 자료의 상관성을 다각도로 분석

하였다. 그 결과, 16개 지점 중에 상대적으로 울릉도와 가깝고 해안에 접한 강릉과 포항 지역의 회귀식이 다른 경우에 비해 결정계수가 높게 나타난 것으로 분석되어 이 관계식을 울릉도에 적용하였다. 울릉도의 일조율 자료는 기상청에서 제공하는 월평균 일조율 자료를 이용하였다. 최종적으로 강릉 및 포항 지역의 일조율-일사량에 대한 회귀식과 울릉도의 월평균 일조율 자료를 이용하여 2011년 울릉도의 일사량을 추정하였다.

연구결과 및 해석

개발 가능지 추출 결과

울릉도에서 토지현황과 용도에 의해 법적으로 개발이 제한되는 지역은 Fig. 3과 같이 나타난다. 그림에서 어둡게 표시된 부분이 토지이용규제로 인하여 발전시설의 설치 불가능한 지역이라고 볼 수 있다. 수치지형도의 하천과 도로, 토지피복지도의 도시지역, 울릉군 도시계획의 도시지역과 자연환경보전지역이 개발 불가능 지역으로서 배제되었으며, 배제된 면적은 32,616,225 m²로 울릉도의 전체 면적의 약 44.5%를 차지한다. Fig. 4에서

어둡게 나타난 영역은 생태·자연도의 1·2등급 지역과 별도관리지역으로서 생태적 가치가 높은 지역을 나타낸다. 울릉도의 생태적 가치를 고려하여 개발 가능지로부터 배제된 영역의 면적은 51,138,575 m²로 울릉도의 전체 면적의 약 69.8%에 해당한다.

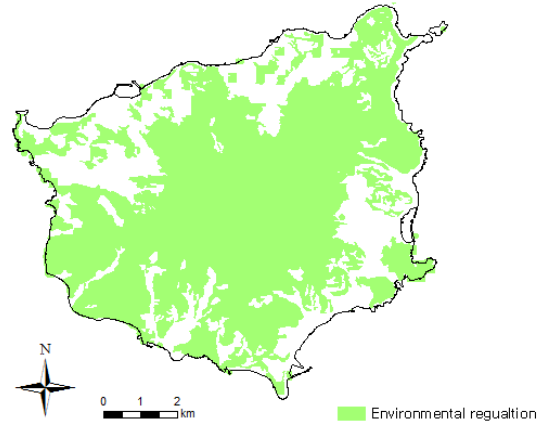


Fig. 4. Infeasible areas for PV installation by environmental regulation.

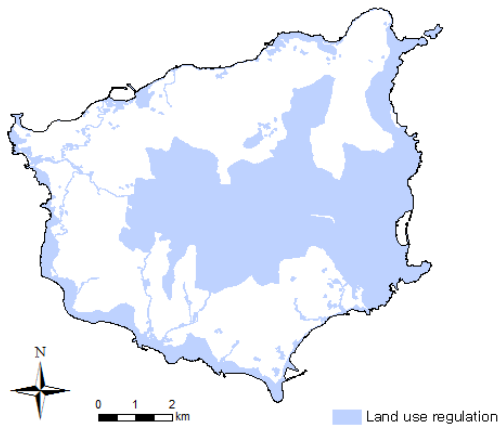


Fig. 3. Infeasible areas for PV installation by land use regulation.

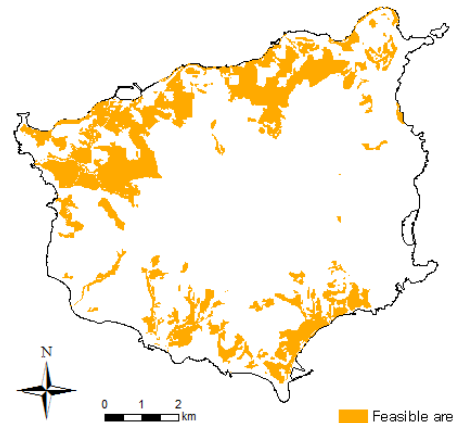


Fig. 5. Feasible areas for PV installation by overlaying two exclusion criteria maps.

Table 1. Infeasible areas for PV installation derived by exclusion analysis

Exclusion criteria	Feasible area		Infeasible area	
	Area (m ²)	Ratio (%)	Area (m ²)	Ratio (%)
Land use restriction	40,631,100	55.5	32,616,225	44.5
Ecological restriction	22,108,750	30.2	51,138,575	69.8
Total (overlaid)	14,804,580	20.2	58,442,475	79.8

2가지 조건에 의한 결과 레이어를 중첩 분석하여 태양광 발전 시스템의 설치가 가능한 지역을 도출하였다(Fig. 5). 그 결과, 발전시설의 설치가 불가능한 것으로 판별된 지역의 면적은 58,442,475 m²로 나타난 반면 발전시설의 건설이 가능한 지역의 면적은 14,804,850 m²로 울릉도 전체 면적(73,247,325 m²)의 약 20.2%에 해당하는 지역만이 발전시설의 설치가 가능한 것으로 분석되었다(Table 1).

지형적 기준의 적지 추출 결과

Fig. 6(a)는 울릉도의 수치지형도로부터 추출한 DEM을 보여준다. 울릉도의 최대 표고는 984 m로, 이는 중앙

부에 위치한 성인봉의 높이에 해당하며, 평균 표고는 334 m이다. 표고 조건에 의해 최대 표고(984 m)의 50% 표고에 해당하는 492 m 이하의 영역을 추출하였다(Fig. 6(b)). 표고 조건에 해당하는 면적은 23,454,675 m²로 울릉도 전체 면적의 약 32%이며, 가용부지 중에 표고 조건을 만족하는 적지 면적은 9,367,500 m²로 울릉도 전체 면적의 약 12.8%에 이른다.

지형경사 조건을 만족하는 영역을 산출하기 위해 울릉도의 DEM으로부터 ArcGIS 소프트웨어의 경사분석 도구를 적용하여 울릉도의 지형경사 지도를 작성하였다(Fig. 7(a)). 울릉도의 최대 경사는 78°, 평균 경사는 32.4°로 나타났으며, 그림에서도 볼 수 있듯이 급경사지가

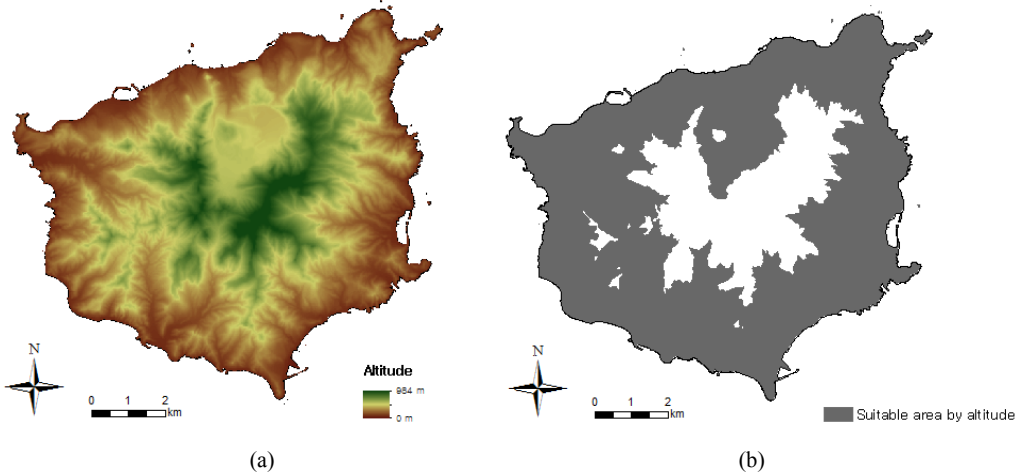


Fig. 6. Suitability analysis of altitude criteria. (a) DEM. (b) Suitable area within altitude 492 m.

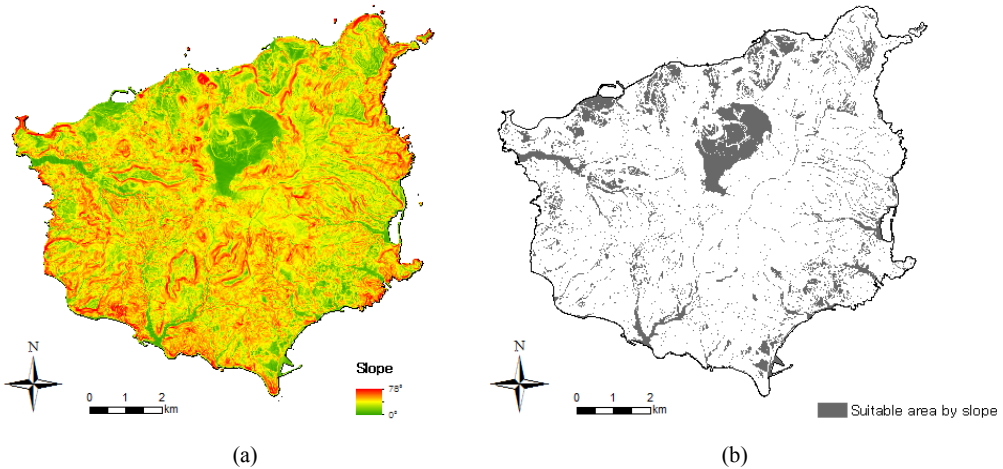


Fig. 7. Suitability analysis of Slope criteria. (a) Slope map. (b) Suitable area within slope 18°.

많이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 울릉도에서 지형경사 조건(18°이하)을 만족하는 영역의 면적은 3,291,750 m²로 울릉도 전체 면적의 4.5%에 불과하며, 태양광 발전시설의 적지에 해당하는 영역의 면적은 1,116,375 m²로 울릉도 전체 면적의 약 1.5%를 차지한다(Fig. 7(b)).

울릉도의 지표면에 도달하는 일조량과 일조시간을 산출하기 위하여 울릉도의 지형 및 위치자료 그리고 ArcGIS 소프트웨어의 일사량 분석 도구를 이용하였다. Fig. 8(a)는 DEM 자료로부터 동지의 낮 시간에 해당하는 오전 9시부터 오후 3시까지의 일조시간을 분석한 결과를 보여준다. 매일 1일의 일조시간 분석 결과로부터 일조시간이 5시간 이상인 영역은 Fig. 8(b)에 도시하였으며, 12개월에 대한 일조시간 분석 결과를 중첩하였다. 일조시간 조건을 만족하는 영역의 면적은 10,151,925 m²로 울릉도 전체 면적의 13.9%에 해당하며, 울릉도의 가용부지 내에서 일조시간 조건을 만족하는 영역의 면적은 3,467,000 m²로 울릉도 전체 면적의 약 4.7%에 해당한다.

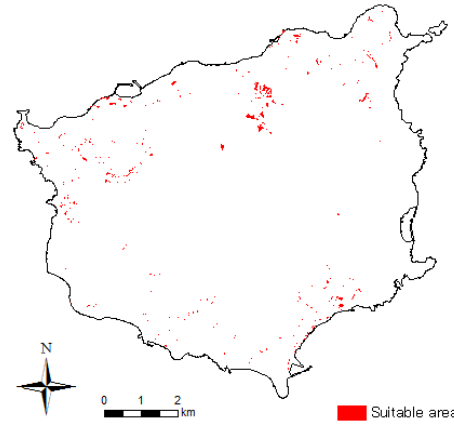


Fig. 9. Suitable areas for PV power plant in Ulleung-Do.

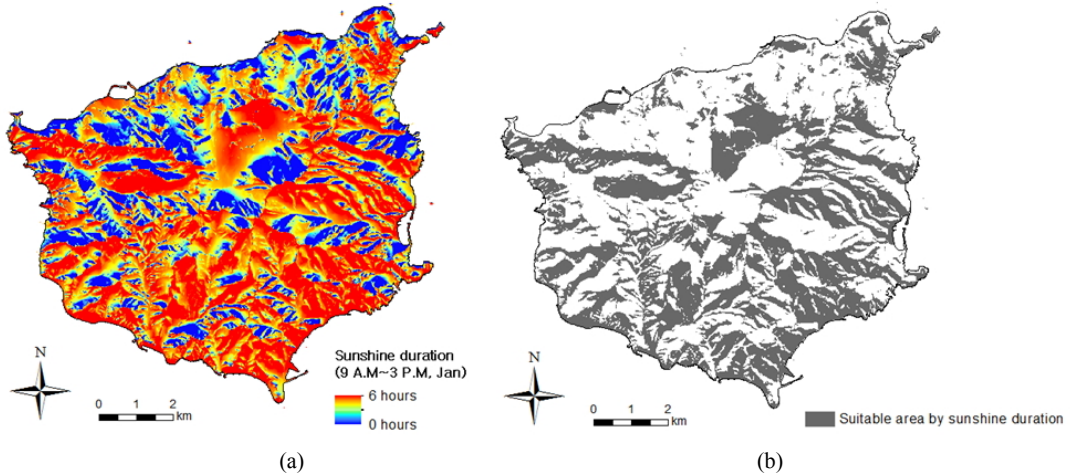


Fig. 8. Suitability analysis of sunshine duration criteria. (a) Sunshine duration map in January. (b) Suitable area over sunshine duration 5 hours between 9 A.M and 3 P.M.

Table 2. Suitable areas for PV power plant derived by suitability analysis

Suitability criteria	From total area		From feasible area	
	Area (m ²)	Ratio (%) to total area	Area (m ²)	Ratio (%) to total area
Altitude (≤ 492 m)	23,454,675	32.0	9,367,500	12.8
Slope (≤ 18°)	3,291,750	4.5	1,116,375	1.5
Daylight duration (≥ 5 hours)	10,151,925	13.9	3,467,000	4.7
Total (overlaid)	1,893,075	2.6	564,575	0.77

개발 가능지 내에서 각 조건들의 중첩 분석을 통해 추출된 태양광 발전시설의 적지는 Fig. 9와 같다. 총 564,575 m²의 부지가 태양광 발전에 적합한 것으로 분석되었으며, 이는 울릉도 전체 면적의 약 0.77%에 해당한다 (Table 2).

태양광 발전 잠재량 산정 결과

30년에 걸쳐 계측된 강릉과 포항의 일조율 및 일사량 자료의 상관성 분석을 통해 도출한 월별 일조율과 일사량의 관계식을 Table 3에 제시하였다. 본 연구에서 산출한 월별 일조율-일사량 관계식에 기상청에서 제공하는 2011년 울릉도의 일조율 자료 대입하여 울릉도의 일사량을 추정하고 이를 실측된 일사량과 비교분석하였다. 그러나 한국에너지기술연구원에서 취득한 2011년 5월 18일부터 10월 24일까지의 울릉도 일사량 실측 자료 중

에서 월 30일이 모두 측정된 달은 6~9월뿐이기 때문에 추정된 일사량의 검증은 6~9월 자료에 대해서만 수행하였다. 12월 상관관계식의 결정계수가 다소 낮게 나타났는데 이는 일사량 측정에 있어 겨울의 기후조건(눈, 비 등)이 미치는 영향으로 인하여 일사량 측정값이 부정확하여 나타난 것으로 사료된다. 그러나 대부분의 월별 상관성 결정계수 값이 신뢰할만한 수준을 보였고, 추정된 일사량의 오차율은 평균 7%로 작게 나타났다. 따라서 추정된 1년간의 일사량 데이터를 태양광 발전 잠재량 산정에 이용하였다.

본 연구에서는 Table 4와 같이 태양광 발전 설비의 인자들을 설정하여 울릉도에 태양광 발전 설비를 설치하게 될 경우에 기대되는 연간 발전량을 산정하였다. 태양광 발전 설비의 설치 각도는 설치 지역의 위도와 같게 설정하였으며 설비의 방향은 남향으로 가정하였다. 태양광

Table 3. Estimation and validation of solar irradiance value obtained from the results of regression analysis for each month

Month	Equation	R^2	Estimated irradiance (kWh/m ² /day)	Measured irradiance (kWh/m ² /day)	Measuring error (%)
January	$H/H_0 = 0.0987 + 0.6876 S/S_0$	0.6229	1.478	-	-
February	$H/H_0 = 0.1560 + 0.5978 S/S_0$	0.6494	2.407	-	-
March	$H/H_0 = 0.1629 + 0.5850 S/S_0$	0.6434	3.719	-	-
April	$H/H_0 = 0.2399 + 0.4392 S/S_0$	0.4745	4.603	-	-
May	$H/H_0 = 0.2392 + 0.4402 S/S_0$	0.4889	4.366	-	-
June	$H/H_0 = 0.1935 + 0.5372 S/S_0$	0.7588	5.126	4.569	10.874
July	$H/H_0 = 0.1899 + 0.5272 S/S_0$	0.7989	3.874	3.770	2.702
August	$H/H_0 = 0.1877 + 0.5463 S/S_0$	0.7816	3.901	3.710	4.906
September	$H/H_0 = 0.1532 + 0.6384 S/S_0$	0.7933	3.291	2.977	9.533
October	$H/H_0 = 0.1863 + 0.5698 S/S_0$	0.7277	2.785	-	-
November	$H/H_0 = 0.1632 + 0.5841 S/S_0$	0.6936	1.729	-	-
December	$H/H_0 = 0.3007 + 0.3516 S/S_0$	0.2844	1.624	-	-

Table 4. Parameters of solar module used in this study

Parameters	Assumed Value or Type
Slope	37.5°
Azimuth	0°
Type	mono-Si, Fixed
Capacity	250 W
Efficiency	15%

발전 설비는 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 단결정 실리콘 태양전지로 가정하였으며, 태양광 발전 시스템의 변환효율의 경우에도 현재의 기술 상황(MKE and KEMCO, 2012)에 따라 15%로 설정하여 태양광에너지의 기술적 잠재량을 산출하였다. 태양광 모듈 1개를 설치할 때 필요한 면적은 인접한 모듈에 의한 음영효과를 고려하여 4 m²로 가정하였다. 이로부터 울릉도에서 태양광 발전시설 적지에 설치 가능한 태양광 모듈의 개수는 141,144개로 계산되었으며, 기대되는 태양광 발전 잠재량은 약 43.6 GWh/yr로 계산되었다.

고 찰

태양광 발전 잠재량 평가를 위해서는 연구지역의 환경과 특성에 따른 조건들을 충분히 고려할 필요가 있다. 울릉도 일주도로 주변의 사면은 수직절리가 발달하고 풍화에 취약한 지질학적 특징과 강풍과 후후가 잦은 기후 특성

으로 인해 낙석이 빈번히 발생한다(Choi *et al.*, 2011b; Seo *et al.*, 2012). 낙석과 같은 사면붕괴가 발생될 경우 태양광 발전설비에도 직간접적인 피해가 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서는 지질공학적 안정성을 가용지 및 적지 선정 요소의 하나로 고려하고자 하였다. 붕괴위험 지역을 선정하기 위해 울릉도의 일주도로 주변 사면 중 낙석이 이미 발생됐거나 붕괴 위험성이 높을 것으로 예측되는 16개의 지점에 대하여 사면안정성 조사와 파괴분석을 수행하였다.

Fig. 10은 울릉도 해안도로 주요 낙석 위험 지역의 현장조사에서 Smart compass-clinometer(Lee *et al.*, 2013)를 이용하여 절리성 암반의 파괴분석을 수행한 결과를 보여준다. 입체투영법에 따라 작성된 입체투영도의 점들은 암반의 불연속면을 나타내며, 점선으로 이루어진 사각형 안의 점들은 사면파괴가 발생할 수 있는 경우를 나타낸다. Table 5에 제시된 결과와 같이 사면조사를 수행한 16개의 지점 중에서 6개의 지점에서 평면파괴, 9개의

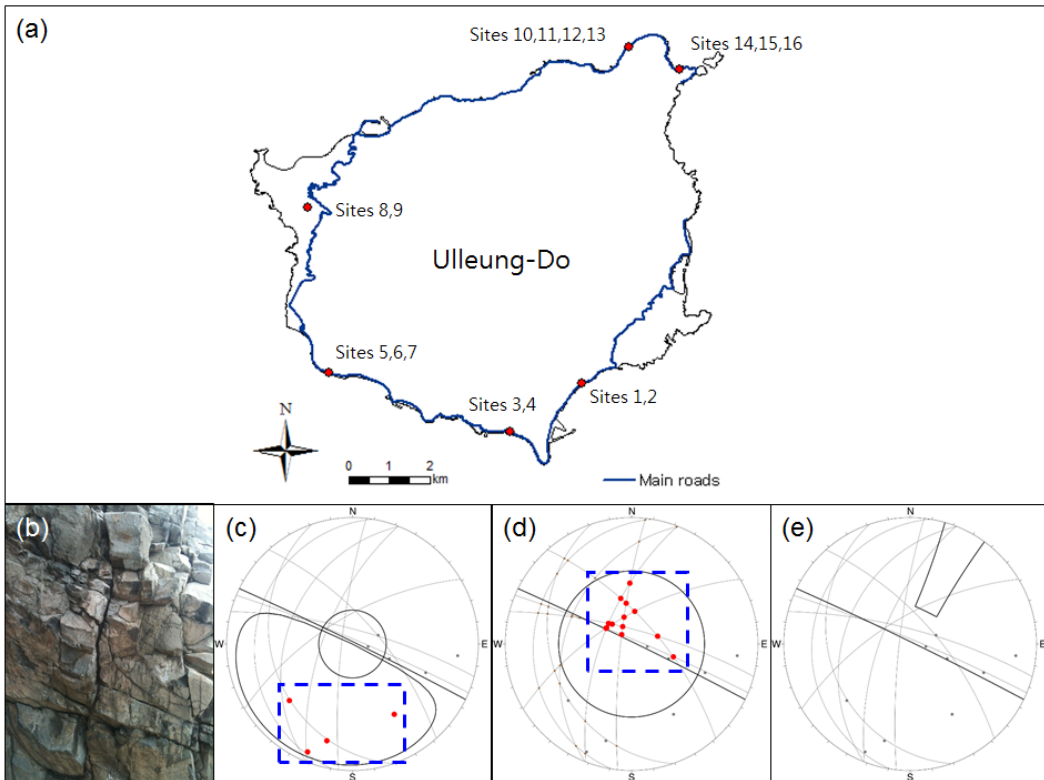


Fig. 10. (a) Infeasible areas for PV installation by rockfall hazard zone with the location of 16 rock slope sites, (b) Photo of the discontinuous rock slope at site no. 5, (c) Stereographic projection showing the plane failure analysis at site no. 5, (d) Stereographic projection showing the wedge failure analysis at site no. 5, (e) Stereographic projection showing the toppling failure analysis at site no. 5.

지점에서 썩기파괴가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 총 10개의 지점을 붕괴위험지역으로 선정하였으며, 낙석 및 사면붕괴로 인한 피해영향범위는 실제 피해 지역들에 대한 현장조사를 통해 반경 10 m로 설정하였다. 지질공학적 안정성을 고려하여 적지에서 제외되는 면적은 2500 m²로 이는 울릉도 전체 면적의 약 0.0034%에 해당한다.

10개 지점에서 사면파괴가 발생할 것으로 예측되었지만 낙석으로 인한 피해영향범위(적지에서 제외되는 면적)가 광역적인 규모의 적지분석 결과에 미치는 영향은 매우 적게 나타났다. 따라서 가용지 및 적지 선정 기준에서는 지질공학적 안정성 항목을 제외하였다. 그러나 잠재량 평가 연구 단계가 아닌 실제 태양광 발전시설의 설계 단계에서는 부지의 재해 위험 가능성을 함께 고려할 필요가 있다.

결 론

본 연구에서는 GIS를 기반으로 울릉도의 지리적, 지형적, 환경적 특성 등을 종합적으로 반영하여 태양광 발전 시스템의 설치가 적합한 지역을 추출하였으며, 일사량 자료와 RETScreen 소프트웨어를 이용하여 가용 부지에 대한 태양광 발전 잠재량을 평가하였다. 울릉도의 태양광

발전 잠재량은 약 43.6 GWh/yr로 2011년 기준 울릉도 전력 사용량인 47.5 GWh/yr의 약 92%에 해당한다. 선정된 잠재량 값은 기술적 잠재량에 해당하므로 울릉도 녹색섬 조성을 위한 실증 사업을 위해서는 실제 발전 시설의 설계와 발전량 산정에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다. 또한 실제 태양광 발전시설의 설계 및 도입을 위해서는 발전시설의 적지가 다양한 규모로 분산된 것을 고려하여 태양광 발전 시스템 적지의 최소 면적 기준, 위치 등을 고려하여 태양광 발전의 형태에 맞는 입지를 선정할 필요가 있다.

태양광 발전 잠재량은 가용지 추출 및 적지 선정의 항목별 기준이나 방법에 달라질 수 있다. 따라서 보다 객관적인 적지 선정을 위해서는 각각의 적지 선정 조건이 태양광 발전 시스템 설치에 미치는 영향에 대한 심도 있는 연구 결과를 바탕으로 한 조건별 적지 선정 기준을 수립해야 한다. 태양광 발전 잠재량 평가에 있어 하나의 입력 인자로 사용되는 일사량 자료의 정확성은 매우 중요하다. 본 연구에서는 울릉도 지역 일사량 자료의 부족으로 인하여 강릉과 포항의 일조율과 일사량의 관계식으로부터 상관모형을 도출한 뒤, 울릉도의 일조율 자료를 대입하여 일사량을 추정하고 실측값과의 오차를 비교분석하였다. 그러나 보다 정확한 태양광 발전 잠재량 평가를 위해서는 장기간(1년 이상)에 걸쳐 측정된 일사량 자료가

Table 5. Results of the stability analysis for discontinuous rock slopes in Ulleung island

Site no.	Geographical coordinate		Rock slope failure type	
	Latitude	Longitude	Plane failure	Wedge failure
1	37.4710	130.8850		
2	37.4712	130.8850	○	○
3	37.4603	130.8650		
4	37.4603	130.8650	○	○
5	37.4736	130.8140	○	○
6	37.4737	130.8140		○
7	37.4736	130.8140	○	
8	37.5103	130.8080		
9	37.5136	130.7970		○
10	37.5465	130.8980	○	○
11	37.5460	130.8970		○
12	37.5464	130.8980		
13	37.5459	130.8970	○	○
14	37.5411	130.9120		
15	37.5415	130.9130		
16	37.5413	130.9120		○

필수적이다. 그렇기 때문에 울릉도 녹색섬 조성 및 유지 관리를 위한 장기적인 차원에서 울릉도 지역의 일사량을 다년간 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 가용부지에 대한 태양광 발전 잠재량 평가를 수행하였으나 태양광 발전 시스템은 건물의 지붕이나 도로의 가로등 및 유도등의 형식으로도 설치 가능하다. 따라서 향후 연구에서는 가용 부지만 아니라 건물의 지붕, 가로등 및 유도등 등 태양광 발전 시스템의 설치가 가능한 모든 적용 대상을 바탕으로 종합적인 태양광 발전 잠재량 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 울릉도 녹색섬 조성을 위해서는 태양광 발전 기술 뿐 아니라 재생에너지 기술 전반에 걸친 종합적인 잠재량 평가가 필요하다.

본 연구에서는 울릉도의 현장 특성을 고려한 태양광 발전 시스템의 잠재량 평가를 통해 태양광 발전 시스템 도입의 가능성을 확인하였다. 제시된 잠재량 평가 결과는 울릉도의 실제 에너지 공급 계획 수립 단계에서 설계인자의 하나로서 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 BK21 플러스 사업에 의하여 일부 지원되었으며(No.21A20130012821), 본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업의 지원을 받았습니다(B4-2425).

References

- Almorox, J. and Hontoria, C., 2004, "Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain," *Energy Conversion & Management*, Vol. 45, pp. 1529-1535.
- Choi, Y., Choi, Y., Suh, J., Park, H., Jang, M. and Go, W., 2013, "Assessment of photovoltaic potential at Buguk, Sungsan and Younggwang abandoned mines in Jeollanam-do, Korea," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 50, No. 6, pp. 827-837.
- Choi, Y., Rayl, J., Tammineedi, C. and Brownson, J.R.S., 2011a, "PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed photovoltaic potential in urban areas," *Solar Energy*, Vol. 85, No. 11, pp. 2924-2939.
- Choi, Y., Jang, H., You, Y. and Seo, Y., 2011b, "Catchment measures and simulation of rock fall behavior on the northeastern coast of the Ulleung-Do," *Bulletin of the Natural Sciences*, Vol. 25, pp. 45-49.
- DGI, 2010, Ulleung and Dokdo Island: Korea's Sustainable Energy Island Project, Daegu Gyeongbuk Development Institute, Daegu, Korea, p. 52.
- Hofierka, J. and Kanuk, J., 2009, "Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools," *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 2206-2214.
- Enhanced Local Laws and Regulations Information Systems, 2014.02.15., www.elis.go.kr
- Gyeongsangbuk-Do, 2011, The Study on Basic Plan for Constructing Ulleung Sustainable Energy Island, Gyeongsangbuk, Seoul, Korea, p. 257.
- KEI, 2009, *Environmental Assessment and Environment-friendly Development of Renewable Energy I- Photovoltaic and Wind Energy*, Korea Environment Institute, Seoul, Korea, pp. 131-186.
- Korea Law Information Systems, 2014a.02.15., www.law.go.kr/ 행정규칙별표서식/(산지전용허가기준등의세부검토기준에관한규정,별표)
- Korea Law Information Systems, 2014b.06.05., www.law.go.kr/ 법령/자연환경보전법시행령.
- Lee, S., Suh, J. and Park, H., 2013, "Smart compass-clinometer: A smartphone application for easy and rapid geological site investigation," *Computer & Geosciences*, Vol. 61, pp. 32-42.
- MKE, 2009, A preliminary Study on a demonstration of Green City, Ministry of Knowledge Economy, Seoul, Korea, p. 393.
- MKE, 2012, The Study on Comprehensive Plan for Constructing Ulleung Sustainable Energy Island, Ministry of Knowledge Economy, Seoul, Korea, p. 475.
- MKE and KEMCO, 2012, New & Renewable Energy, Ministry of Knowledge Economy, Korea Energy Management Corporation, Seoul, Korea, p. 486.
- MKE and KEMCO, 2013, Regulation and Guidance on Support for Renewable Energy Facilities, Ministry of Knowledge Economy, Korea Energy Management Corporation, Seoul, Korea, p. 288.
- Seo, Y., Jang, H. and Kim, K., 2012, "Assessment of rockfall hazard in the northeast region of Ullung-Do," *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 22, No. 3, pp. 353-363.
- Song, J. and Choi, Y., 2012, "Assessment of rooftop photovoltaic potential in the Pukyong National University for establishing a green campus," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 49, No. 3, pp. 369-378.
- Ulleung-Gun, 2009, Feasibility Study for Ulleung-gun's Renewable Energy, Ulleung, Korea.
- Yorukoglu, M. and Celik, A.N., 2006, "A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration," *Energy Conversion & Management*, Vol. 47, pp. 2441-2450.



김진솔

2013년 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과, 공학사

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부, 석사과정
(E-mail; jj1508@snu.ac.kr)

박형동

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
(本學會誌 第51卷 第1号 參照)



윤창열

2003년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부, 공학사
2005년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부, 공학석사

현재 에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 선임연구원
(E-mail; yuncy@kier.re.kr)

서장원

현재 서울대학교 에너지자원신기술연구소 연수연구원
(本學會誌 第50卷 第6号 參照)



강용혁

1981년 인하대학교 공과대학 기계공학과, 공학사
1984년 인하대학교 대학원 기계공학과, 공학석사
1995년 인하대학교 대학원 기계공학과, 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터, 센터장
(E-mail; yhkang@kier.re.kr)