

산지 태양광 발전시설의 지형 공간 데이터베이스 구축 및 사면 특성 분석

Analysis of Slope Characteristics of Solar Power Plants in Gangwon Province based on Geospatial Database

김 지 호¹ Kim, Ji-Ho
송 기 일² Song, Ki-Il
윤 찬 영³ Yune, Chan-Young

Abstract

In Korea, many solar power generation facilities are being installed in mountainous regions, which cover 70% of the country's area. This study aimed to analyze the slope characteristics of solar power generation facilities installed in such regions, considering the potential for mountain hazards. A database was created for 663 mountainous solar power generation facilities in Gangwon province, including data on area, slope angle, slope direction, altitude, and soil depth. GIS techniques were used to analyze the slope characteristics of these facilities. The area of solar power generation facilities installed in the Gangwon Mountains ranges from 606 to 320,718 m². We found that a notable number of these facilities have slopes exceeding the permit standards for mountain solar power installations and steep slope criteria. In addition, most facilities are located south, making them vulnerable to landslides. The correlation between soil depth and slope or topographical altitude was found to be quite low.

요 지

국토의 70%가 산지인 우리나라는 많은 태양광 발전 시설이 산지에 설치되고 있다. 본 연구에서는 산지 재해와 관련하여 산지에 설치된 태양광 발전시설의 사면 특성을 분석하기 위해 663개소의 강원 산지 태양광 발전시설에 대하여 면적, 경사각, 경사향, 고도, 토심 등의 데이터베이스를 구축하였으며, GIS 기법을 활용하여 산지 태양광 발전시설의 사면 특성을 분석하였다. 분석 결과, 강원 산지에 설치된 태양광 발전시설의 면적은 606~320,718m²의 범위를 가지며, 산지 태양광 설치 허가 기준과 급경사지 판정 기준 이상의 경사를 가진 태양광 발전시설이 상당수 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 태양광 발전시설은 대부분 산사태에 취약한 남향을 나타내고 있으며, 토심과 사면 경사 또는 지형고도와는 상관관계가 매우 낮은 것으로 나타났다.

Keywords : Gangwon province, GIS, Mountain hazard, Slope characteristics, Solar power generation facility

1 비회원, 강원원주대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Gangneung-Wonju National Univ.)

2 정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Inha Univ.)

3 정회원, 강원원주대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Gangneung-Wonju National Univ., Tel: +82-33-640-2423, yune@gwnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2025년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

세계 각국에서는 지속적인 산업 발달과 온실가스 배출로 가속화된 기후변화 대응을 위하여 신재생 에너지 기술 개발과 도입이 이루어지고 있다. 대한민국에서도 화석연료를 대체할 에너지 공급원으로 친환경 재생 에너지 기술 도입이 급증하였으며, 태양광 발전을 통한 전력 공급 방식이 민간사업을 중심으로 발전하고 있다. 이에 따라 산지가 국토의 70%에 달하는 대한민국은 대규모의 태양광 발전 시설이 산지에 설치되고 있다. 산업통상자원부(Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE, 2020)의 자료에 의하면, 국내 산지에 설치된 태양광 발전 시설은 2020년을 기준으로 총 12,527개소로 나타나고 있다. 그러나 산지에 태양광 발전시설을 설치하는 과정에서 동반되는 벌목과 산지의 성·질토는 산지 사면의 안정성에 영향을 미치게 되며, 이로 인하여 Fig. 1과 같이 산지 태양광 시설의 붕괴 및 하부 민가 시설물 피해 발생 사례도 보고되고 있다.

산지 재해와 연계되는 사면 안정성에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. Chae et al.(2007)은 산사태 모형실험장치를 이용하여 강우강도 및 사면경사의 변화에 따른 다양한 실험조건에서 변위를 측정하였으며, 간극수압의 변화양상과 사면붕괴 발생특성을 분석하였다. Oh et al.(2008)은 침투해석을 수행하고, 불포화토 정수들을 인공신경망기법으로 추정하여 실제 풍화토 사면 붕괴의 재현 및 분석을 수행하였다. Lee and Yoon(2015)은 흙-함수특성곡선 시험을 수행하여 실토질 시료에 한 달 동안의 선행강우 적용 후 지속적인 집중호우가 내릴 때 불포화토 내 모관흡수력 분포 및 응력, 강도와 같은 역학적 특성 변화 등을 분석하고, 수치해석을 통해 사면 안정성에 미치는 영향을 평가하였다. Cho(2018)는 기반암이



Fig. 1. Slope failure in solar power plant region (Cheorwon-gun, Gangwon province, 2020)

얇게 존재하는 불포화토의 강우 침투로 인한 사면파괴 예측을 위해 지반의 수리학적 특성과 강도특성을 랜덤변수로 고려하는 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 확률론적 해석 절차를 제안하였다. Kim et al.(2022)은 실제 산사태 발생지역의 세부적인 지형 및 경사면을 적용한 3차원 비탈면 안정해석을 수행하였고, 불포화층에서 강우로 인한 침투 현상을 해석하여 간극수압의 변동을 고려한 산사태 안정성 분석을 수행하였다. Eu(2023)는 다변량 회귀분석을 통해 기후변화에 따른 향후 산사태 피해 면적의 변화를 분석하였으며, 강우인자의 주성분 분석을 통해 산사태 피해 면적 추정 모형을 도출하였다. 강원지역은 산림이 90%에 달하는 지형적 특징으로 국지성 집중호우와 장마, 태풍에 의한 산지 재해에 취약하다. 2019년부터 최근 5년간 강원도에서는 삼척시 194건, 강릉시 116건, 고성군 53건, 양양군 51건, 철원군 45건, 홍천군 29건, 횡성군과 양구군, 평창군이 27건, 영월군 25건, 원주시 22건, 인제군 21건, 춘천시 14건, 화천군 11건, 정선군 9건, 태백시 6건으로 총 684건의 산사태가 발생하였으며, 이로 인한 피해 물량은 266.754 ha인 것으로 나타나고 있다(Korea Forest Service, KFS, 2023). Song et al.(2005)은 삼척의 산사태 발생지역을 조사하여, 강우강도와 누적강우량이 산사태 발생개소 및 붕괴면적에 미치는 영향을 분석하고, 산사태 발생규모 예측 방법을 제안하였다. Yang et al.(2007)은 강원도 남부지역을 대상으로 산사태 유발인자에 대한 DB(Database)를 구축하고 강우조건을 변화시키면서 산사태 취약지의 분포 변화를 모의 실험을 수행하였다. Pack et al.(2008)은 GIS(Geographic Information System)와 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법을 활용하여 산사태 취약성과 산사태 발생 가능성을 제작하고 산사태 피해에 취약한 지역을 추출하였으며, 인접 구조물의 위험성이 증가하고 있음을 확인하였다. Chun et al.(2009)은 GIS를 활용하여 식생, 모암 및 지형특성이 산사태에 미치는 영향을 파악하기 위해 평창지역의 산사태 발생지역을 대상으로 발생원인 및 재해현황을 분석하였다. Kim et al.(2011)은 GIS를 활용하여 인제군에서 대규모 산사태가 발생한 지역의 지형·임상·토양 분석을 수행하였으며, 토석류의 발생원인과 발생부의 특성을 분석하였다. Lee and Sung(2018)은 춘천 산사태 발생지역에서의 강우지속시간과 시간최대강우량을 산사태 발생여부, 발생지점과의 상관분석을 수행하였다.

그러나, 수행된 대부분의 연구는 자연사면의 지형과 강우 침투를 고려한 사례들이며, 태양광 발전시설과 같은

인공시설이 사면 안정성에 미치는 영향을 고려한 국내연구는 매우 부족한 실정이다. 산지 재해와 관련하여 산지의 지반개량은 오랜 시간 동안 자연적으로 유지된 사면의 안정성에 영향을 미치고, 사면의 기울기를 인공적으로 변형시키는 과정에서 급경사지를 생성할 수 있다. 특히 태양광 발전시설의 경우, 면적 집약적인 특징을 가진 인공시설로 이를 산지에 설치하는 시공과정에서 다른 시설보다 대규모 벌목과 지반개량이 동반될 수 있다. 또한, 산지에 설치된 태양광 발전시설이 설치된 위치를 조사해보았을 때 적지 않은 개소가 민가 인근에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 태양광 시설 인근에서 사면 붕괴가 발생하는 경우, 유실된 토양과 함께 손상된 태양광 패널이 토석류와 이동하면서 도로 및 민가 피해가 증가할 수 있으며 인명피해도 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 강원지역 산지의 태양광 발전시설이 설치된 사면의 특성을 분석하고자 지형정보 데이터와 토성정보 데이터로 구성된 DB를 구축하였다. GIS 기법을 활용하여 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model)을 통해 수집한 데이터를 기반으로 강원도 전역의 광역 분석이 가능하였으며, 지역별 산지 태양광 발전시설의 사면 특성을 분석하였다.

2. 데이터베이스 구축

강원도 산지 태양광 발전시설 설치 지역의 사면 및 지반특성 데이터베이스를 구축하기 위하여 산업통상자원부의 태양광 발전 시설 허가현황을 조사한 결과, 강원지역에는 1,043개소의 태양광 발전시설이 시공되어 있음을 확인할 수 있었다(MOTIE, 2020). 또한, 위성영상 및 항공사진 등의 자료와 교차검증을 통하여 태양광 발전시설의 정확한 위치와 범위를 확인하였다. 확인된 위치에 대한 상세 공간분석을 위하여 GIS 기법으로 2022년 기준 수치지형도(1:5000)를 확보하여 분석작업을 수행하였다. 이때, 허가현황 자료에서 산지가 아닌 평지나 논, 밭에 설치된 시설은 제외하고 산지와 근접하거나 산지를 개량하고 설치된 태양광 발전시설에 대하여 데이터를 정리하였다. 그리고 산업통상자원부의 허가현황에서는 사업자 소유로 부지가 구분되어 있어 실제로는 하나의 부지인 시설의 경우에도 다수의 부지로 분리된 경우가 많았다. 본 연구에서는 이를 하나의 개소로 취급하여 폴리곤(Polygon) 형태의 벡터 데이터로 수집하였다. 그 결과, 강원지역 산지 태양광 시설은 총 663개소로 나타났으며, 이를 각각 폴리곤으로 구분하여 데이터베이스로 구축하

였다. Fig. 2는 구축한 데이터를 기반으로 제작한 강원지역 산지 태양광 발전시설 분포도를 나타낸다. Fig. 3은 강원지역 산지 태양광 발전시설의 분포 현황을 지역별 도시한 그래프이다. 원주시가 98개소(14.8%)로 가장 많은 산지 태양광 발전시설이 설치되었고, 강릉시 78개소(11.8%), 평창군 76개소(11.5%), 삼척시 66개소(10.0%), 인제군 57개소(8.6%) 순으로 많은 것으로 나타났다.

수집한 태양광 시설의 폴리곤을 수치지형도(DEM, 5m × 5m)와 중첩하여 태양광 시설 각각의 면적, 경사각(최고, 평균), 경사방향, 고도를 수집하였다. Fig. 4는 태양광 발전시설이 산지에 설치된 곳의 위성지도와 DEM에서 사면경사도를 추출한 예시 모습이다. 그리고 추후 산지 재해와 관련한 분석을 수행하기 위해서 임상도와 토양도를 수집하였고, 산림청 산지정보시스템을 활용하여 토

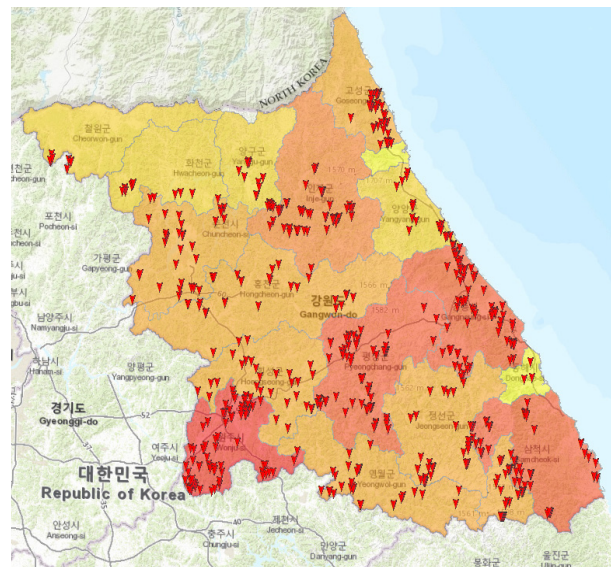


Fig. 2. Installation distribution of solar power facilities in Gangwon province

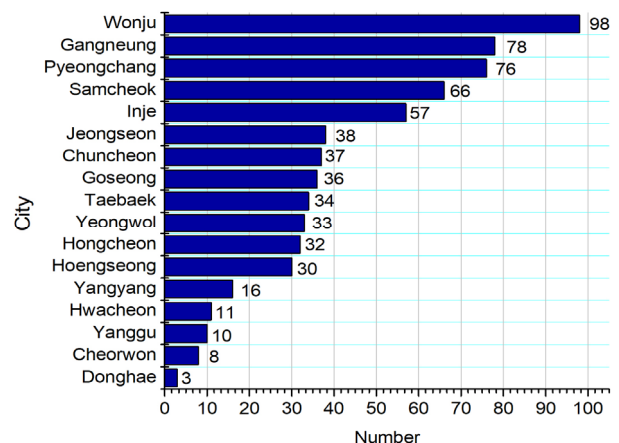
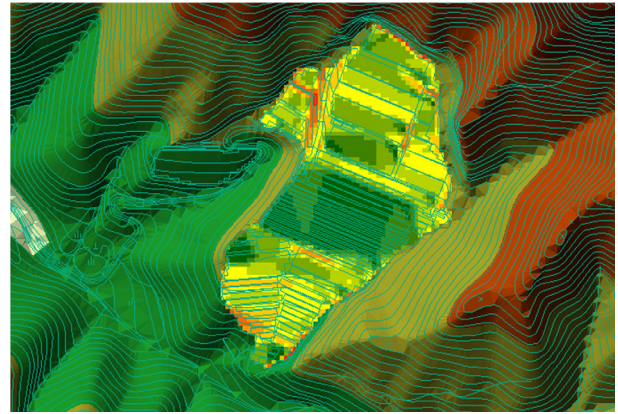


Fig. 3. Distribution of solar power facilities by city in Gangwon province



(a) Satellite image



(b) Topographic map

Fig. 4. Representative image of solar power plant region

심, 점착력, 내부마찰각, 투수계수, 비중, 건조단위중량 등의 토성 데이터를 수집하였다. 단, 철원군, 화천군, 양구군, 인제군, 고성군의 접경지역과 같이 군사보안 상의

Table 1. Configuration of the database

Classification	Field	Obtained by
Terrain analysis	Area	DEM (5cm×5cm)
	Average inclination Maximum inclination Inclination direction Elevation	
Soil Properties analysis	Soil Depth Cohesion Internal Friction Angle Water Content coefficient of permeability Specific gravity Unit Weight Coefficient of Curvature Coefficient of Uniformity Liquid Limit Plastic Limit	Landslide Information System, KFS

이유로 데이터 수집이 불가능한 지역이 있어 토성 데이터의 경우에는 전체 663개소 태양광 시설 중에서 532개소에 대하여 데이터베이스를 구축하였다. 이를 통해 지형요소와 토성요소로 구성된 강원 산지 태양광 발전시설의 지형 공간 데이터베이스를 구축하였으며, 데이터의 구성은 Table 1과 같다. 데이터베이스는 앞으로도 지속적인 조사를 통하여 관리해나갈 계획이며 향후 산지 태양광 발전시설의 재해 영향성 분석과 유지관리 대상 선정 등에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 산지 태양광 발전시설의 사면 특성

3.1 면적과 고도

태양광 발전시설은 태양광을 받는 패널의 개수와 면적이 전력량과 직결되는 특징을 가진다. Fig. 5는 구축한

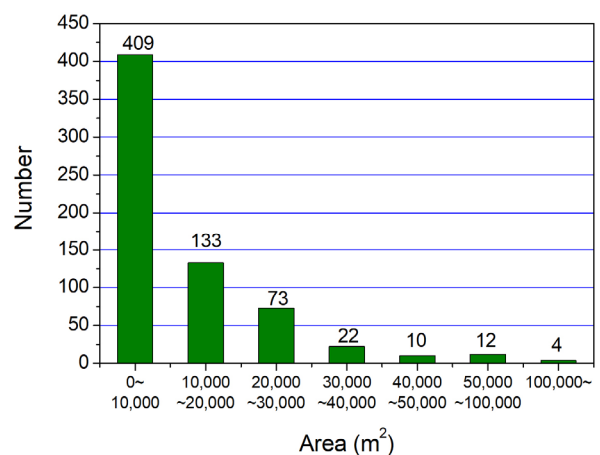
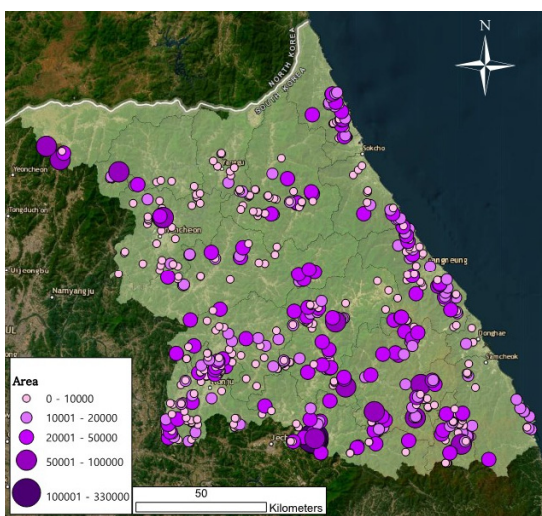


Fig. 5. Area of solar power plant in Gangwon province

DB를 이용하여 산지 태양광 발전시설의 위치를 면적에 따라 나타난 분포도와 히스토그램이다. 데이터를 살펴본 결과, 태양광 발전시설의 면적은 606~320,718m²의 범위를 가지는 것으로 나타났으며, 10,000m² 이하의 면적에서 409개소(61.7%), 10,000~20,000m²에서 133개소(20.1%), 20,000~30,000m²에서 73개소(11.0%), 30,000~40,000m²에서 22개소(3.3%)로 면적이 커질수록 빈도가 급격히 줄어들지만 50,000m² 이상의 크기를 가지는 개소도 16개소(2.4%)로 적지 않은 것으로 나타났다. 특히, 영월군에는 320,718m², 131,054m², 106,109m²의 대규모 면적을 가진 태양광 발전시설들이 산지에 설치되어 있으며, 홍천군에도 144,304m²의 면적을 가진 태양광 발전시설이 존재하고 있음을 확인하였다. 이를 통해서 넓은 면적을 가진 태양광 발전시설이 평지에서와 같은 방식으로 산지에 설치되고 있으며, 이를 시공하는 과정에서 대규모 절·성토가 이루어질 수 있음을 파악할 수 있다. 우리나라에서 발생하는 산사태의 유형은 대부분 전이형 토석류를 동반하며 그 흐름의 형태는 폭보다는 길이가 길고, 하부 유역으로 갈수록 폭이 넓어지는 ‘A’자 형상과 같다(Cho and Chang, 2006). 또한, 산사태 및 토석류의 피해 규모는 유역 면적에 비례하는 관계를 가지며, 산사태 발생 유역이 클수록 하류부의 피해 면적도 증가한다(Marchi and D’Agostino, 2004; Kang and Kim, 2014). 실제 태양광 발전시설의 면적과 산사태 피해 규모의 상관성에 대해서는 아직 연구된 바가 없으나, 태양광 발전시설의 면적이 증가하면 시설의 경계부에 더 큰 면적의 급경사지가 형성되고 그에 따라 피해 규모에도 영향을 줄 수 있으므로 주의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

산지 재해 분석에서 일반적으로 고도가 높아질수록 경사가 급해지므로 고도와 경사는 산지 재해에서 매우 중요하게 다뤄진다. Dai et al.(2001)에 의하면, 홍콩의 경우 지형고도와 사면경사가 산사태 빈도와 상관관계를 가지며 이들은 산사태 분석에서 매우 중요한 것으로 보고되고 있다. 특히 산사태 발생부에서 고도차에 따른 위치 에너지는 산사태가 토석류로 전이되어 흐름 에너지로 발전하는 중요한 요소 중 하나이다. 하지만, 고도는 산지 형성 환경에 따라 동일한 경사 및 지형적 특성을 가지더라도 절대고도의 수치가 다르며, 따라서 상대적 고도에 따라 분석지역 각각의 고도를 환산하여 분석해야 다른 지역과 비교·분석이 가능하다. 이전 연구결과에 의하면 우리나라의 경우 대부분의 토석류 발생이 산복에서 발생하였으며(Park et al., 2015), 지형은 고도의 영향을 받므로 고도분석을 수행한 결과, 7부 이상의 고도에서 발생 비율이 높은 것으로 분석되었다(Kim et al., 2007). 강원도 인제군의 경우 토석류 평균 발생고도는 690 m이며 고도차에 의해 큰 피해가 발생하였고(Kim et al., 2011), 강릉지역 산사태 발생지역의 경우 40~120m에 해당하는 곳에서 발생하였으나, 지점을 능선부에 대한 상대고도로 파악하면 능선의 7~9부 지점에 해당하는 곳에서 대부분 발생하였다(Cho and Chang, 2006). 춘천지역의 산사태 발생부 역시 약 7부 이상의 고도에서의 발생 비율이 높은 것으로 분석하였다(Park et al., 2015). 이처럼 산사태 발생부는 고도의 영향을 받고 있으며, 산지에 설치된 인공시설의 재해 안정성을 고려할 때에도 지형 및 고도의 영향을 무시할 수 없다. Fig. 6은 산지 태양광 발전시설의 평균 고도 분포를 분석하여 나타난 히스토그램이다.

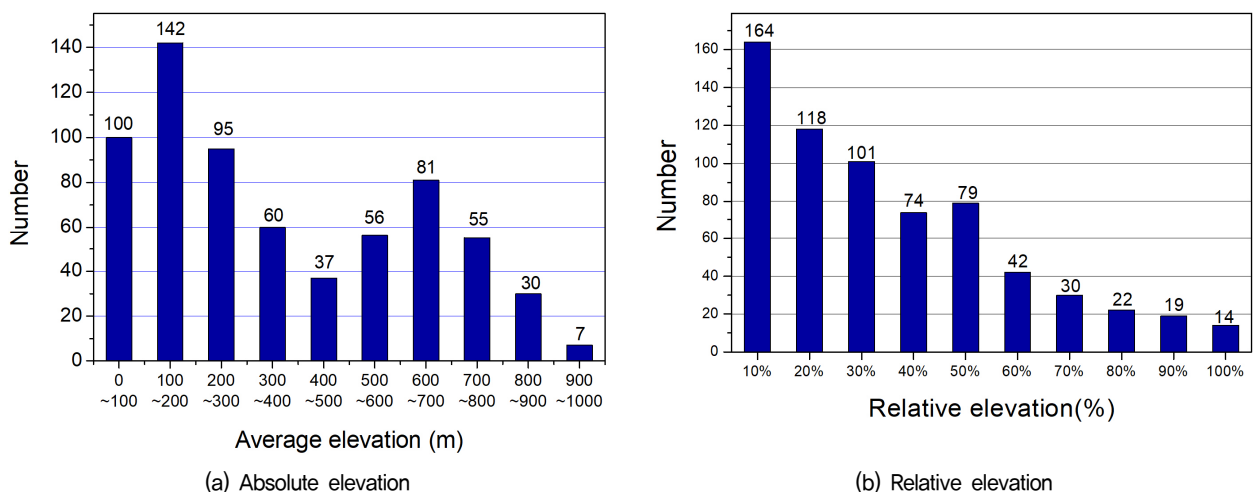


Fig. 6. Average elevation of solar power plant in Gangwon province

절대고도와 상대고도로 구분하여 분석하였으며, 산지 태양광 발전시설의 절대고도의 분포는 7.54~967.1m로 나타났다. 그중 100~200m에서 142개소(21.4%)로 가장 많은 빈도를 차지하였으며, 0~100m에서 100개소(15.1%), 200~300m에서 95개소(14.3%), 300~400m에서 60개소(9.0%)로 고도가 높아지면서 빈도가 줄어들다가 600~700m에서 81개소(12.2%)로 다시 높아지는 분포를 나타내었다. 또한, 900~1000m의 높은 고도에서도 정선과 영월, 강릉에서 7개소(1.0%)의 태양광 발전시설이 설치되어 있음을 확인하였다. 높은 고도에서 발생한 토석류일수록 흐름에너지나 유역에 따른 하류부 피해 면적이 커지는 경향을 보인다. 이에 따라 높은 고도에 설치된 인공 시설물은 특히 사면 안정성과 하류부에 위치한 주거지의 재해 피해에 유의할 필요가 있을 것으로 판단된다. 산지 지형은 산록, 산복, 산정으로 구분할 수 있다. 하부가 경작지 및 계곡에 접한 지역으로 구릉지 및 산지의 30% 능선 이하의 지역을 산록, 30~70% 능선 지역을 산복, 능선이 70%, 즉 7부 능선 이상의 지역을 산정이라고 한다. 앞서 언급한 것과 같이 서로 다른 지역의 고도를 비교·분석하기 위해서는 연구지역의 절대고도를 상대고도로 치환할 필요가 있다. 태양광 발전시설이 설치된 산지 지역의 상대고도의 분포를 살펴보면, 10% 능선에서 164개소(24.7%), 10~20% 능선에서 116개소(17.5%), 20~30% 능선에서 101개소(15.2%)로 산록에서 가장 많은 빈도를 가지며, 산정에 가까워질수록 빈도가 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 70% 이상의 능선부에서도 85개소(12.8%)의 태양광 시설이 위치하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 사면 경사

사면의 경사는 사면 안정성 및 산지 재해와 관련하여 가장 영향력이 큰 지형요소이며, 산지에 설치되는 태양광 발전시설은 산지 사면의 경사를 성·절토하여 완만한 기울기의 평지를 조성하고 설치된다. 이와 관련하여 산지 일시사용 허가에 대한 법령(산지관리법 시행령 제18조의 2)에 따르면 2018년 12월에 산지 태양광 발전시설의 안정성 확보를 위해 산지 태양광 발전시설의 허가기준인 평균경사 기준을 25° 이하에서 15° 이하로 강화 개정하였다. Fig. 7은 전체 데이터의 평균경사에 따른 분포도와 히스토그램을 나타낸다. 분포를 살펴보면 강원지역 산지 태양광 발전시설의 평균경사는 0~26.01°의 범위를 가지며, 10~15°에서 212개소(32.0%)로 가장 많은 빈도를 나타내고, 5~10°에서 199개소(30.0%), 15~20°에서 130개소(19.6%) 순으로 나타나고 있다. 평균경사가 높아질수록 빈도는 줄어들고 있음에도 불구하고, 산지 태양광 발전시설 허가기준인 평균경사 15° 이상인 시설이 총 663개소 중에서 165개소(24.9%)를 차지하여 여전히 많은 숫자가 허가기준 이상인 경사지에 시공되어 있으며 산지 재해의 위험성이 높다는 것을 확인할 수 있다. 이는 2018년 법령이 개정되기 이전의 평균경사 25° 이하의 허가기준에 따라 설치한 태양광 발전시설이거나 민간사업으로 진행된 설계 및 시공과정에서 법령을 준수하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

토사유실 및 사면붕괴, 산사태 등은 급경사지에서 시작되는 경향이 있다. 기존 연구에서 강원지역의 토석류 발생부는 38°에서 가장 빈도가 높았으며, 평균값은 34.3°로 나타났다(Jun et al., 2013). 특히, 경사가 완만한 경사

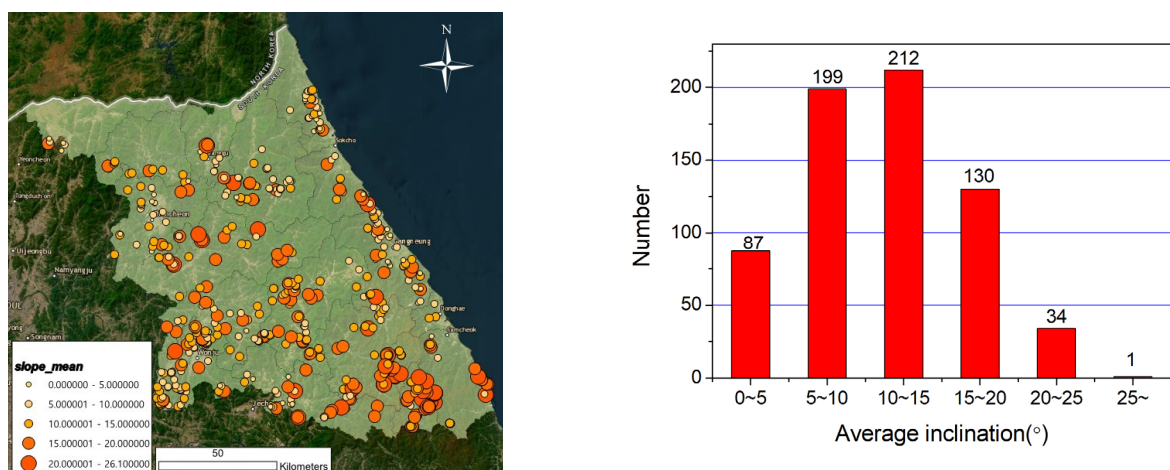


Fig. 7. Average inclination of solar power plant in Gangwon province

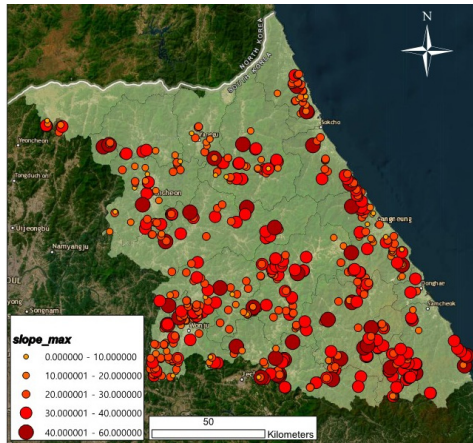
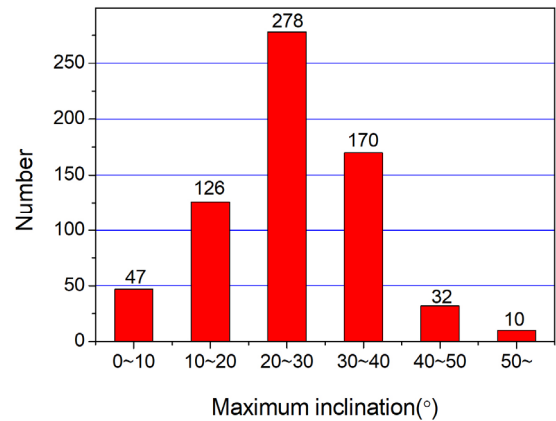


Fig. 8. Maximum inclination of solar power plant in Gangwon province



에서 급한 경사(30°)로 변화하는 지점에서 산사태 발생 빈도가 높은 것으로 보고되고 있다(Yoo and Park, 2001). 행정안전부는 급경사지 재해예방에 관한 법률에 따라 급경사지에 대한 재해위험도 평가와 지속적인 유지관리를 시행하고 있다. 이때, 급경사지란 “택지·도로·철도 및 공원시설 등에 부속된 자연 비탈면, 인공 비탈면(옹벽 및 축대 등을 포함한다.) 또는, 이와 접한 산지로서 1) 지면으로부터 높이가 5m 이상이고, 경사도가 34°(1:1.483) 이상이며, 길이(연장)가 20m 이상인 인공비탈면, 2) 지면으로부터 높이가 50m 이상이고, 경사도가 34° 이상인 자연 비탈면”으로 정의한다. 국지성 집중호우 및 태풍으로 산지 태양광 발전시설 기반에서는 얇은 사면 파괴가 발생할 수 있으며, 주로 영역 내에서 경사가 가장 급한 곳의 토사유실로 인한 사면 파괴가 발생한다(Kim et al., 2023). 따라서 태양광 발전시설의 사면 안정성을 분석할 때 평균경사 뿐만 아니라 최고경사도 함께 고려할 필요가 있다. Fig. 8은 태양광 시설이 설치된 구역 내에서 측정된 최고경사 분포도와 히스토그램을 나타낸다. 강원지역 산지 태양광 발전시설의 최고경사 분포를 살펴보면 20~30°에서 278개소(42.0%)로 가장 많은 빈도를 가지며, 30~40°에서 170개소(25.6%), 10~20°에서 126개소(19.0%) 순으로 높은 빈도를 차지하는 것으로 나타났다. 행정안전부에서 제시하고 있는 급경사지 판정 기준이 34°인 것을 고려하면, 경사 34° 이상인 시설이 총 663개소 중에서 119개소(17.9%)를 차지하고 있어 추후 급경사지로 관리되어야 할 필요성이 있는 시설이 상당히 많은 것으로 나타난다. Fig. 9는 평균경사 15° 이상, 최고경사 34° 이상인 태양광 발전시설의 빈도를 지역별로 나타낸 그래프이다. 종합적으로 강원 산지 태양광 발전시설의 경사도를 분석

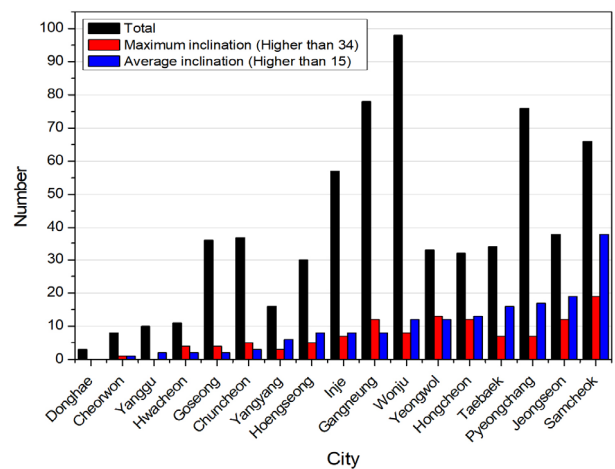


Fig. 9. Solar power plant of inclination in Gangwon province

해 본 결과, 총 산지 태양광 발전시설의 개수는 원주시에서 98개소로 가장 많지만, 태양광 발전시설의 평균경사와 최고경사가 가장 높게 분포하고 있는 지역은 삼척시로 나타났다. 앞서 5년간 산사태 발생 건을 조사해보았을 때에도 삼척시가 194건으로 강원도 내에서 가장 많은 산사태가 발생한 것으로 나타나, 삼척시가 산사태 재해에 가장 취약한 지역 중 하나이며 향후 태양광 시설의 사면 재해에도 취약할 것으로 예상된다. 따라서 산지에 설치된 태양광발전시설과 같은 인공시설물에 대하여 완만하게 경사를 조정하거나 적절한 보강공법을 통해 사면 안정성을 사전 확보하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 산지 태양광 발전시설의 면적과 최고경사의 상관성을 나타내는 그래프이다. 산지에 설치된 태양광 발전시설은 면적이 커지면 최고경사가 높아지는 경향을 보인다. 이는 넓은 면적을 개량하기 위해 동반된 성·절토로 인하여 시설부지의 경계부에서 급경사지가 형성되고

있는 것으로 판단된다. 30°가 넘어가는 급경사지는 강우로 인한 사면붕괴를 유발할 수 있고 면적이 넓어질수록 산사태와 토석류에 의한 피해 규모는 커진다. 이에 따라

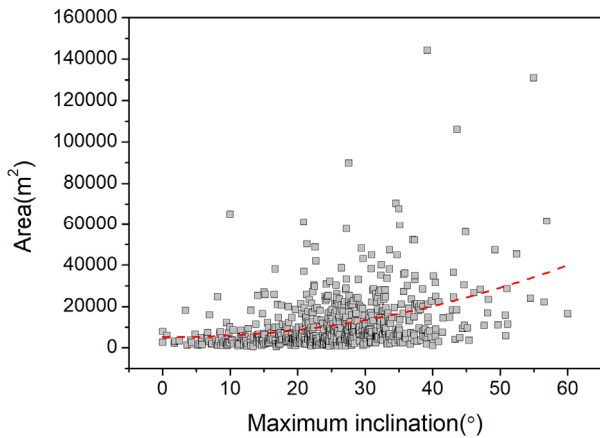


Fig. 10. Relationship between maximum inclination and area

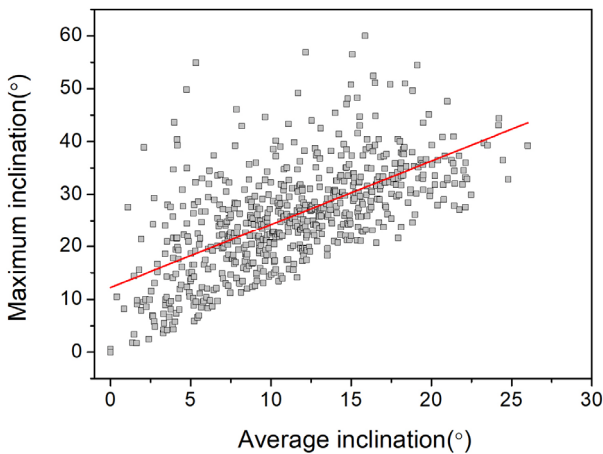


Fig. 11. Relationship between maximum inclination and average inclination

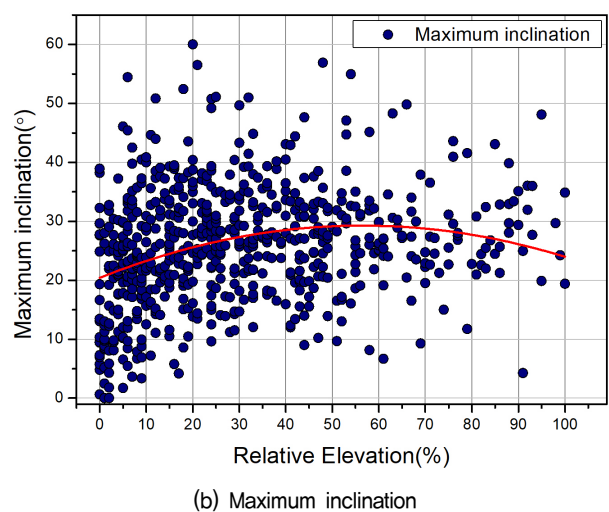
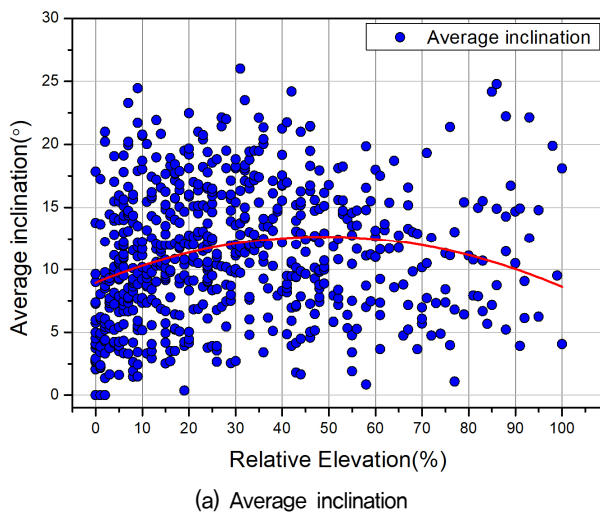


Fig. 12. Relationship between Inclination and Relative elevation

대규모 면적의 인공시설을 산지 사면에 시공하는 것은 산지 재해에 영향을 미치며, 적절한 보강대책과 유지관리 필요하다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 평균경사와 최고경사의 상관성을 나타내는 그래프이며 상관계수(R2)는 0.4를 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 큰 평균경사를 가지는 시설은 시설 내에 형성된 최고경사 또한 큰 것을 확인할 수 있다. 정리하면, 면적이 넓어질수록 그리고 평균경사가 클수록 최고경사도 커지므로, 사면 재해의 위험성도 증가하게 된다.

3.3 고도와 경사 특성

앞서 언급된 바와 같이 고도와 경사는 산지 재해 발생에 있어서 매우 중요한 인자이다. 특히 기존 국내 연구에서 산사태 발생부가 대부분 7부 능선 이상에서 발생하고 있는 것으로 보고되고 있으며, 산지 지형 역시 지역마다 산세가 험한 정도는 다양하게 나타나지만, 일반적으로 산정에 가까워질수록 경사도가 높아지는 경향을 보인다. 이에 따라 태양광 발전시설이 설치된 산지 상대 고도에 따른 시설의 경사도를 분석해보았다. Fig. 12는 상대고도에 따른 태양광 발전시설의 평균경사 및 최고경사의 분포를 나타낸다. 평균경사의 경우 5부 능선(상대높이 50%)에 설치된 시설까지는 경사도가 증가하다가 6부 능선에 설치된 시설부터는 경사가 줄어드는 것으로 나타났다. 최대경사 역시 평균경사와 유사한 경향성을 나타내고 있다. 실제 현장 조건을 분석해 본 결과, 30~70% 능선부에 해당하는 산복에 위치한 태양광 발전시설은 성·절토를 통해 완만한 부지를 형성하기보다는 산지의 자연사면 경

사를 따라 시공하는 경우가 많은 것으로 나타나며 이에 따라 15° 이상의 평균경사를 가지는 시설도 많은 것으로 나타난다. 이에 비해 70% 이상인 능선부에 해당하는 산정에 위치한 태양광 발전시설들은 산세가 완만한 구릉지 정상에 위치하는 경우가 많았으며, 자연적으로 형성된 완만한 부지에 태양광 발전시설을 시공한 것으로 조사되었다. Fig. 13은 강원도 삼척시에 위치하고 있는 50% 능선부인 산복과 90% 이상의 산정에 위치한 대표적 시설 사진을 지형특성과 함께 보여주고 있다. 그러나 산정에 위치한 시설의 경우에는 태양광 발전시설 자체의 평균경사 및 최대경사는 낮지만 태양광 시설과 산복의 자연사면 경계에서 급경사가 형성될 수 있다. 또한, 태양광 시설을 시공하면서 벌목과 벌채 등이 이루어진 지반에서 토석류와 같은 산지 재해가 발생했을 경우, 토석류가 이동하는 길이와 면적이 산정에서부터 시작되어 산지 하부

까지 이어지기 때문에 피해 규모가 커질 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 사면 방향

Fig. 14는 강원 산지 태양광 발전시설의 분포를 사면 방향을 기준으로 나타낸 히스토그램이며, 평균경사 및 최대경사에 대하여 각각 도시하였다. 일조량과 일사량의 확보가 중요한 태양광 발전시설의 사면 방향은 남향이 165개소(24.9%), 남서향이 141개소(21.3%), 남동향이 140개소(21.1%)로 많은 빈도를 보였으며, 동향이 90개소(13.6%), 서향이 69개소(10.4%)의 빈도를 차지하였다. 기존 연구에 따르면 같은 지역에서도 사면의 방향에 따라 일사량, 임상의 종류가 달라지고 사면 특성에 영향을 미친다(Lee et al., 2012). 대체로 서, 남서, 남, 남동 지역이



(a) 50% ridge



(b) 90% ridge

Fig. 13. Representative image of solar power plant region in Samcheok (Google earth)

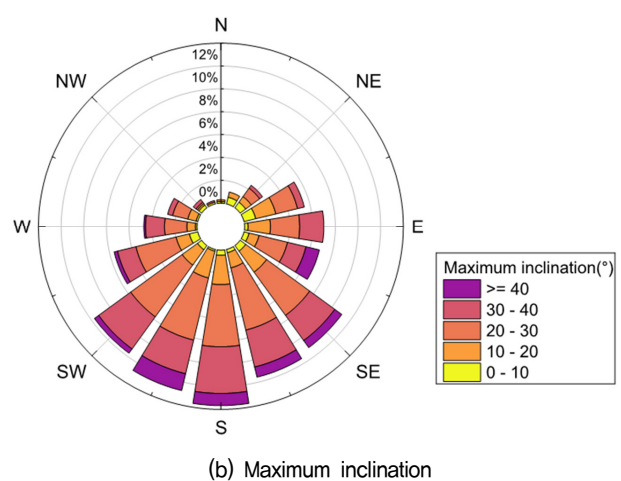
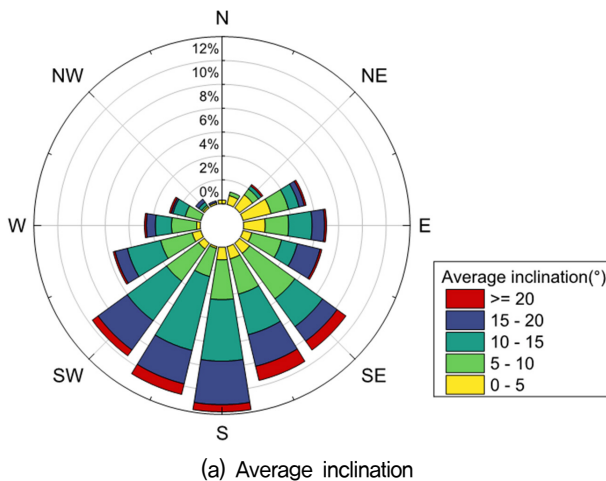


Fig. 14. Slope direction of solar power plant region

산사태 발생에 취약하며(Lee et al., 2012) 이는 태양광 발전시설이 에너지 효율을 고려하여 시공되는 사면의 방향과 동일하다. 따라서 종합적인 경사 특성을 고려했을 때 다른 인공시설물보다 태양광 발전시설이 산지에 설치되는 경우에 산지 재해에 취약한 방향을 갖게 되며 추후 산사태 등의 재해 위험성도 높을 것으로 예상된다. 다만 이에 대해서는 추후 더 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 토심과 지형특성

사면안정을 분석하기 위한 해석은 강도특성과 더불어 강우침투 및 지반의 불포화 특성과 같은 다양한 지반공학적 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 많은 불확실성을 가지고 있다. 이에 따라 산지 재해 분석에는 사면의 지형적 특성과 함께 흙의 점착력, 내부마찰각, 투수계수 등 강우와 관련된 지반특성이 주요 매개변수로 다루진다. 또한, 산사태는 강우, 지진과 같은 외부요인에 의한 토양침식 및 토양유실을 시작으로 그 형상과 규모가 발달된다. 이에 따라 토심의 유무와 깊이는 산지 재해와 토석류 추정을 위한 분석에서 중요한 매개변수이다. 토심을 추정하는 정확한 방법은 현장에서 직접 지층을 조사하고 기암암까지의 심도를 확인하는 방법이다. 그러나 인력굴착이나 오거를 활용하는 방법은 장비 및 인력에 따른 측정 깊이가 제한적이라는 한계가 있다. 또한, 산지 재해와 관련하여 광범위한 지역의 토심을 측정하는 것은 큰 비용과 많은 시간이 소모되므로 지반의 광역 분석을 수행하는 연구에서는 주로 간편식을 상용하여 토심을 산정한다(Min et al., 2005). 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)은 선형회귀모형(Linear model)을 활용하여 사면경사에 따른 토심 추정식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$D_{soil} = 2.5 - 1.5 \frac{\tan \theta}{\tan 60^\circ} \quad (\text{if } \theta < 70^\circ) \quad (1)$$

여기서, θ 는 사면경사(°)이고 D_{soil} 은 토심(m)이며 토심의 범위는 0~2.5m이다. 그리고 사면경사가 70° 이상인 경우에는 토양층이 존재하지 않는다고 가정한다. USGS의 제안식을 활용하여 산정한 사면 경사도에 따른 토심의 범위는 Table 2와 같다.

일반적으로 고도가 높은 산지일수록 강우, 바람의 영

Table 2. Soil depth according to slope (USGS)

Slope angle (°)	Depth of soil cover (m)
0 ~ 30	2.0
30 ~ 40	1.5
40 ~ 60	1.0
> 60	0.5

향으로 토양의 퇴적보다는 풍화·침식작용이 토양층의 깊이가 얕을 것으로 판단한다. 반대로 낮은 고도의 경우 퇴적작용으로 인한 두꺼운 토양층이 생성될 것이라고 가정할 수 있다. 이를 기반으로 Saulnier et al.(1997)은 고도와 경사를 통해 토심을 추정하는 Z-model과 S-model을 식 (2), (3)과 같이 제안하였다.

$$Z-model : d_{soil} = d_{max} - \left(\frac{d_{max} - d_{min}}{z_{max} - z_{min}} \right) (z_i - z_{min}) \quad (2)$$

d_{max}, d_{min} : 연구지역의 최대 및 최소 토심

z_{max}, z_{min} : 연구지역의 최대 및 최소 지형고도

z_i : 분석지점의 고도

$$S-model : d_{soil} = d_{max} \left[1 - \frac{\tan \theta_i - \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} - \tan \theta_{min}} \times \left(1 - \frac{d_{min}}{d_{max}} \right) \right] \quad (3)$$

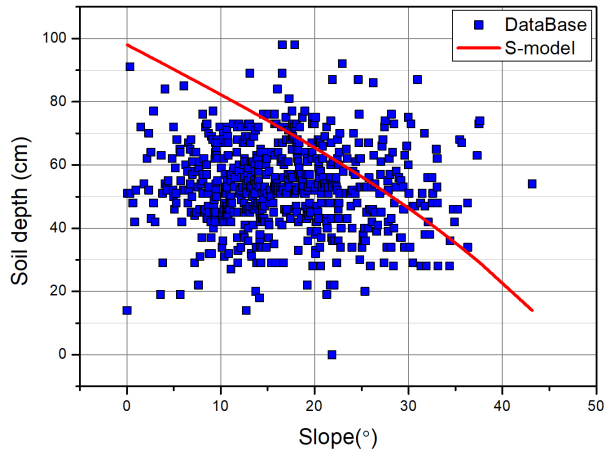
d_{max}, d_{min} : 연구지역의 최대 및 최소 토심

$\theta_{max}, \theta_{min}$: 연구지역의 최대 및 최소 사면경사

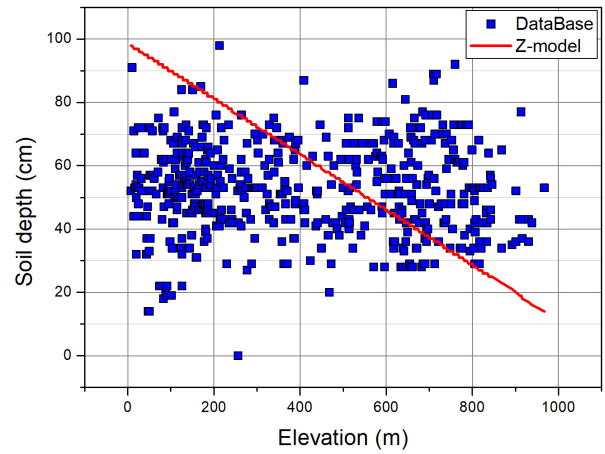
θ_i : 분석지점의 사면경사

Z-model과 S-model은 USGS에서 제안한 모델과 다르게 연구지역의 토심, 경사, 고도의 최고값, 최소값을 고려하여 상대적으로 합리적인 범위 내의 토심 추정이 가능하다. 그러나 이를 활용하기 위해서는 연구지역의 실측값이 요구되는 점을 유의해야 한다.

본 연구에서는 강원도 지역의 지형 특성을 고려하고자 Z-model과 S-model을 활용하여 산지 태양광 발전시설이 설치된 지역의 토심을 추정하였다. 또한, 모델식으로 산정된 토심과 구축한 DB를 기반으로 수집한 분석지역의 토심 데이터를 비교 분석해보았다. Fig. 15는 비교 분석한 그래프를 나타내며 Z-model과 S-model에 적용한 강원도 지역의 토심, 경사, 고도의 최고 및 최저값은 Table 3과 같다. 이 때 적용한 사면경사와 토심은 모델식이 자연사면을 대상으로 제안됨에 따라 태양광 발전시설 부근



(a) Distribution of soil depth by S-model



(b) Distribution of soil depth by S-model

Fig. 15. Comparison of soil depth prediction models and database

Table 3. Data applied to equation

$d_{\max}, d_{\min}$	0.98m, 0.14m
$\theta_{\max}, \theta_{\min}$	43.18°, 0.02°
$z_{\max}, z_{\min}$	967.07m, 7.54m

의 자연사면인 경사면에서 추출하였으며, 이전 연구에서 토심과 높은 상관성을 보인 사면 길이가 85m 이상인 사면으로 구성하였다(Bong et al., 2023).

분석 결과, 태양광 발전시설이 설치된 산지 부근의 평균경사와 토심 간의 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났다. 추가적으로 태양광 발전시설의 평균고도와 토심 간의 상관관계를 분석하였으며, 평균 경사와의 분석과 같이 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 현재 구축한 DB의 토심이 사면의 평균경사, 평균고도와 관계없이 데이터의 90% 이상이 40~70cm의 좁은 범위 내에 분포하기 때문으로 판단된다. 제안된 모델은 사면경사와 고도가 높을수록 토심이 낮아지는 경향을 기반으로 하여 실제 토심의 변동성을 고려하지 못하고 일관적으로 추정한다는 한계를 가지고 있으며, 최근 국내 산지에서 토심특성을 연구한 결과(Bong et al., 2023)에서도 기존 모델식으로 산정한 토심과 경사의 상관성이 낮은 것으로 나타난 바 있어, 산지 태양광 시설 주변 지반의 토심을 추정하기 위하여 기존 이론식을 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 특히 제안된 모델식은 자연사면에 대한 토심 추정식이므로, 태양광시설 부지조성을 위하여 부지 경계부에서 성·절토가 이루어질 때는 실제 현장에서 정확한 토심 측정이 필요할 것으로 판단된다. 측정한 토심이 깊을 경우, 강우로 인한 시설 기초 부근의

토양유실이 발생할 수 있고, 사면 붕괴의 원인이 될 수 있다. 또한, 태양광 발전시설을 설치할 때에는 완만한 경사를 조성하기 위해 성·절토가 동반되므로, 그에 따라 태양광 발전시설의 경계부에 생성되는 경사면에 적절한 비탈면 보강공법이 적용될 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 GIS 기법을 활용하여 수치지도 및 위성지도를 통해 총 663개소의 강원도 산지 태양광 발전시설의 분포 현황과 지형 공간 데이터베이스를 구축하였다. 구축한 사면요소 및 토성요소 데이터를 기반으로 산지 태양광 발전시설과 그 지역의 사면에 대한 지형학적 특성을 분석하였다. 산지 태양광 발전시설의 면적과 설치된 지역의 고도, 경사각, 경사향, 토심 등의 데이터에 대한 통계적 분석을 수행하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 강원도 지역별 산지 태양광 발전시설의 설치현황을 조사한 결과, 원주시가 98개소(14.8%)로 가장 많은 산지 태양광 발전시설이 설치되었고, 강릉시 78개소(11.8%), 평창군 76개소(11.5%), 삼척시 66개소(10.0%), 인제군 57개소(8.6%) 순으로 많은 것으로 나타났다.
- (2) 구축한 데이터를 기반으로 강원 산지 태양광 발전시설은 606~320,718m²의 면적 범위를 가지며, 409개소(61.7%)가 10,000m² 이하의 면적을 가지지만 50,000m² 이상의 크기를 가지는 개소도 16개소(2.4%)로 적지 않은 것으로 나타났다. 특히, 영월군과 홍천군에는

320,718m², 131,054m², 106,109m², 144,304m²의 대규모 면적을 가진 태양광 발전시설들이 산지를 개량하여 설치되어 있음을 확인하였다.

- (3) 산지에 설치된 태양광 발전시설의 절대고도는 100~200m에서 142개소(21.4%)로 가장 많은 빈도를 차지하였으며, 0~100m에서 100개소(15.1%), 200~300m에서 95개소(14.3%), 300~400m에서 60개소(9.0%)로 고도가 높아지면서 빈도가 줄어들다가 600~700m에서 81개소(12.2%)로 다시 높아지는 분포를 나타내었다. 이를 상대고도로 치환하여 분석한 결과, 10% 능선에서 164개소(24.7%), 10~20% 능선에서 116개소(17.5%), 20~30% 능선에서 101개소(15.2%)로 30% 능선부 이하인 산록에서 가장 많은 빈도를 가지는 것으로 나타났다. 산정에 가까워질수록 빈도가 줄어들지만 70% 이상의 능선부에서도 85개소(12.8%)의 태양광 발전시설이 위치하는 것을 확인하였다.
- (4) 산지에 태양광 발전시설을 설치하기 위해서는 허가 기준인 평균경사 15° 이하의 완만한 기울기를 조성해야 한다. 강원지역 산지 태양광 발전시설의 평균경사는 10~15°에서 212개소(32.0%)로 가장 많은 빈도를 나타내지만, 15° 이상인 시설이 65개소(24.9%)를 차지하여 많은 시설이 허가기준 이상인 경사지에 시공되어 있으며, 산지 재해를 예방하기 위해 불안정한 상태임을 확인하였다.
- (5) 강원지역 산지 태양광 발전시설의 최고경사 분포를 살펴보면 20~30°에서 278개소(42.0%)로 가장 많은 빈도를 가지며, 30~40°에서 170개소(25.6%), 10~20°에서 126개소(19.0%)의 빈도를 차지하는 것으로 나타났다. 행안부 급경사지 판정 기준인 최고경사 34°를 고려하였을 때, 119개소(17.9%)가 34° 이상의 최고경사를 가지며 추후 해당 시설이 급경사지로 관리되어야 할 필요성을 확인하였다. 또한, 큰 평균경사를 가지는 시설은 시설 내에 형성된 최고경사 또한 크며, 사면 재해의 위험성도 증가한다는 것을 확인하였다.
- (6) 상대고도에 따른 태양광 발전시설의 경사도를 분석한 결과, 5부 능선 이하에서는 시설의 경사가 높으며, 7부 능선 이상인 산정에 설치된 경우에 경사가 낮아지는 경향을 보인다. 이는 산복에 위치한 태양광 시설이 산지의 자연사면 경사도를 따라 시공되며, 산정에 위치한 시설은 주로 구릉지와 산정의 완만한 부지에 시공하기 때문임을 확인하였다.

- (7) 태양광 발전시설의 사면 방향은 남향이 165개소(24.9%), 남서향이 141개소(21.3%), 남동향이 140개소(21.1%)로 전체적으로 남향이 많은 빈도를 보였다. 이는 기존 연구에서 산사태 발생에 취약한 사면 방향과 동일하며, 종합적인 경사 특성을 고려했을 때 태양광 발전시설이 산지에 설치되는 경우에 산지 재해에 취약한 방향을 갖게 될 것으로 판단된다.
- (8) 토심은 사면 경사 또는 지형고도와는 상관관계가 없는 것으로 나타났으며, 토심을 추정하기 위한 기존 모델도 활용성이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 산지 태양광 시설 지반의 토심을 추정하기 위해서는 자연 사면을 대상으로 하는 기존 이론식이 아닌 지반의 성·질토를 고려한 직접적인 토심 측정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부재원(과학기술정보통신부 여대학원생 공학 연구팀제 지원사업)으로 과학기술정보통신부와 한국여성과학기술인 육성재단의 지원을 받았으며, 행정안전부 “산지(경사지) 태양광 발전시설의 전주기 스마트 안전관리 기술 개발(20018265)”의 지원을 받아 작성되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Bong, T.H., Im, S.J., Seo, J.I., Kim, D.Y., and Heo, J. (2023), “Soil Depth Estimation and Prediction Model Correction for Mountain Slopes Using a Seismic Survey”, *Journal of Korean Forestry Society*, Vol.112, No.3, pp.340-351 (In Korean).
2. Chae, B. G., Lee, S. H., Song, Y. S., Cho, Y. C., and Seo, Y. S. (2007), “Characterization on the Relationships among Rainfall Intensity, Slope Angle and Pore Water Pressure by a Flume Test : in Case of Gneissic Weathered Soil”, *Journal of the Korean Society of Engineering Geology*, Vol.17, No.1, pp.57-64 (In Korean).
3. Cho, S. E. (2018), “Probabilistic Stability Analysis of Unsaturated Soil Slope under Rainfall Infiltration”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.5, pp.37-51 (In Korean).
4. Cho, Y. C. and Chang, T. W. (2006), “The Geometric Characteristics of Landslides and Joint Characteristics in Gangneung Area”, *Journal of Engineering Geology*, Vol.16, No.4, pp.437-453 (In Korean).
5. Chun, K. W., Song, D. K., Lee, J. H., Kim, M. S., and 江崎次夫, T. E. (2009), “A Study on Characteristics of Rainfall, Vegetation and Country Rock in Gangwon Province Pyeongchang Landslide Area, 2006”, *Conference Co-Hosted by KISTEC & KGES*, A, Ilsan, Korea (In Korean).
6. Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J., and Xu, Z. W. (2001), “Assessment

- of Landslide Susceptibility on the Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong”, *Journal of Environmental Geology*, Vol.40, No.2, pp.381-391.
7. Eu, S. (2023), “Predicting Landslide Damaged Area According to Climate Change Scenarios”, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.25, No.4, pp.376-386 (In Korean).
 8. Jun, K. J., Kim, G. H., and Yune, C. Y. (2013), “Analysis of Debris Flow Type in Gangwon Province by Database Construction”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.1, pp.171-179 (In Korean).
 9. Kang, H. S. and Kim, Y. T. (2014), “Physical Vulnerability Function of Buildings Impacted by Debris Flow”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.14, No.5, pp.133-143 (In Korean).
 10. Kim, B. J., Kim, J. H., Park, Y. C., and Yune, C. Y. (2023), “Analysis of Slope Characteristics Around the Location of Solar Power Plants in Gangwon Province, South Korea”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.24, No.11, pp.33-40 (In Korean).
 11. Kim, G. H., Yune, C. Y., Lee, H. G., and Hwang, J. S. (2011), “Debris Flow Analysis of Landslide Area in Inje Using GIS”, *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, Vol.29, No.1, pp.47-53 (In Korean).
 12. Kim, K. S., Song, Y. S., Chae, B. G., Cho, Y. C., and Lee, C. O. (2007), “Geometric Characteristics of Landslides on Natural Terrain according to the Geological Condition”, *Journal of Korean Society of Engineering Geology*, Vol.17, No.1, pp.75-87 (In Korean).
 13. Kim, S. J., Oh, S. B., Yoo, Y. G., and Shin, H. S. (2022), “Three-dimensional Stability Analysis of Landslides in Unsaturated Soils: A Case Study”, *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol.42, No.3, pp.359-369 (In Korean).
 14. Korea Fores Service, KFS (2023), <https://www.data.go.kr/index.do>
 15. Lee, S. W., Kim G. H., and Yune, C. Y. (2012), “Development of Landslide-Risk Prediction Model through Database Construction”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.4, pp.23-39 (In Korean).
 16. Lee, W. Y. and Sung, H. H. (2018), “Analysis of Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence in Chuncheon, Gangwon Province, Korea”, *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol.53, No.5, pp. 669-689 (In Korean).
 17. Lee, Y. S. and Yoon, S. H. (2015), “Influence of Antecedent Rainfall in Stability Analysis of Unsaturated Soil Slope”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.35, No.5, pp.1073-1082 (In Korean).
 18. Marchi, L. and D’Agostino, V. (2004), “Estimation of Debris Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.29, No.2, pp.207-220.
 19. Min, C. S., Jang, B. K., and Cha, G. S. (2005), “Comparison between Models for Thickness of Soils”, *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, Vol.2005, pp.399-403.
 20. Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE, (2020), https://www.data.go.kr/data/15107742/standard.do#layer_data_infomation
 21. Oh, S. B., Mun, J. H., Kim, T. K., and Kim Y. K. (2008), “A Case Study of Rainfall-Induced Slope Failures on the Effect of Unsaturated Soil Characteristics”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.28, No.3, pp.167-178 (In Korean).
 22. Park, J. K., Yang, I. T., Kim, T. H., and Park, H. G. (2008), “Extraction of Landslide Risk Area using GIS”, *Journal of the Korean Society of Surveying and Surveying*, Vol.26, No.1, pp.27-39 (In Korean).
 23. Park, S. A., Yu, G. H., and Yoo, N. J. (2015), “Analysis of Debris Flow Characteristics Considering Forest Environmental Factors -Focusing on the Case of Mt. Daeryong in 2013”, *Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl*, Vol.35, pp.73-80 (In Korean).
 24. Saulnier, G.M., Beven, K., and Obled, C. (1997), “Including Spatially Variable Effective Soil Depths in TOPMODEL”, *Journal of Hydrology*, Vol.202, No.1, pp.158-172.
 25. Song, Y. S., Jang, Y. H., and Kim, J. S. (2005), “Landslide Characteristics induced by Heavy Rainfall”, *Korean Society of Engineering Geology*, Vol.15, No.4, pp.435-445 (In Korean).
 26. Yang, I. T., Chun, K. S., Park, J. K., and Lee, S. Y. (2007), “An Estimation to Landslide Vulnerable Area of Rainfall Condition using GIS”, *Journal of Korean Geospatial Information Society*, Vol.15, No.1, pp.39-46 (In Korean).
 27. Yoo, N. J. and Park, B. S. (2001), “A Case Study of Landslides due to Heavy Rainfall”, *Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl*, Vol.21, pp.303-315 (In Korean).

Received : August 12th, 2024

Revised : August 23rd, 2024

Accepted : August 26th, 2024