

재해정보를 고려한 태양광발전시설의 취약성 평가에 관한 연구

A Study on the Vulnerability Assessment of Solar Power Generation Facilities Considering Disaster Information

표희진*

Heejin Pyo*

Abstract

This study aims to develop an evaluation method for solar power facilities considering disaster impacts and to analyse the vulnerabilities of existing facilities. Haenam-gun in Jeollanam-do, where the reassessment of existing facilities is urgent, was selected as the study area. To evaluate the vulnerability from a more objective perspective, principal component analysis and entropy methods were utilised. Seven vulnerability assessment indicators were selected: maximum hourly rainfall, maximum wind speed, number of typhoon occurrence days, number of rainfall days lasting more than five days, maximum daily rainfall, impermeable area ratio, and population density. Among these, maximum hourly rainfall, maximum wind speed, maximum daily rainfall, and number of rainfall days lasting more than five days were found to have the highest weights. The overlay of the derived weights showed that the southeastern regions of Haenam-eup and Bukil-myeon were classified as Grade 1 and 2, whereas the northern regions of Hwawon-myeon, Sani-myeon, and Munnae-myeon were classified as Grade 4 and 5, indicating differences in vulnerability. Of the 2,133 facilities evaluated, 91.1% were classified as Grade 3 or higher, indicating a generally favourable condition. However, there were more Grade 1 facilities than Grade 2, highlighting the need for countermeasures. This study is significant in that it evaluates solar power facilities considering urban disaster resilience and is expected to be used as a basic resource for the installation of new facilities or the management and operation of existing ones.

Keywords: Storm and Flood Damage, Natural Disasters, Solar Power Generation Facilities, Vulnerability Assessment

1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

우리나라를 포함한 세계 주요국의 탄소중립 선언으로 탄소 감축 필요성에 대한 공감대가 확대되고 있다. 우리나라도 이에 동참하기 위해 기후 위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법, 2050 탄소중립 추진전략, 2050 장기저탄소 발전전략(Long-

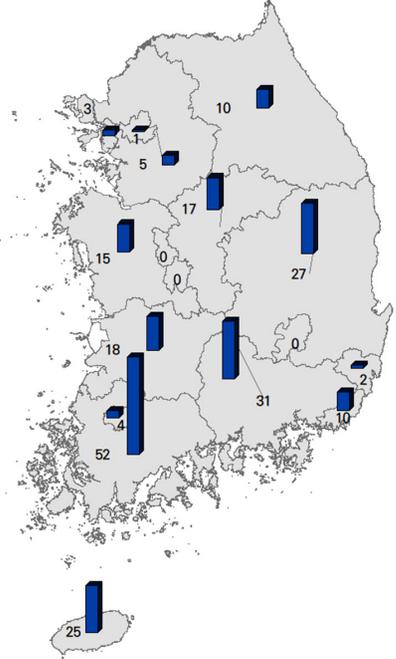
term low greenhouse gas Emission Development Strategies, LEDS) 등 탄소중립 이행을 위한 법·제도적 기반과 구체적인 이행전략을 마련하고 있다. 이 이행전략에는 국내 온실가스 배출량에서 86%를 차지하는 에너지 부분의 저감을 위한 신재생에너지 확대를 비중 있게 포함시키고 있다. 최근에 수립된 법정 계획인 '제1차 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획(2023~2042년)'에서도 감축정책으로 석탄발전 감

*국토연구원 전문연구원/서울시립대학교 도시공학과 박사과정(py0224@krihs.re.kr)

Table 1. Damage to Solar Power Generation Facilities by the State Over the Past Five Years

Classification	Year	Number of Damages	Classification	Year	Number of Damages
Seoul	2019	1		2018	1
Busan	2019	3	Jeollabuk-do	2020	12
	2020	7		2022	5
Daegu	2022	2		2018	1
Incheon	2019	1	Jeollanam-do	2019	7
	2020	2		2020	3
Gwangju	2020	2		2021	10
	2022	2		2022	31
Ulsan	2022	2		2018	1
Gyeonggi-do	2019	1	Gyeongsang buk-do	2019	4
	2020	4		2020	9
Gangwon-do	2018	1		2022	13
	2020	4		2019	3
	2022	5		2020	15
Chungcheong buk-do	2018	3	Gyeongsang nam-do	2021	1
	2020	14		2022	12
Chungcheong nam-do	2019	3	Jeju-do	2018	1
	2020	7		2019	5
	2021	2		2020	16
	2022	3		2022	3
Subtotal		69	Subtotal		153
Total					222

Source: Authoring Based on Lee (2022) (in Korean)



축, 재생에너지 확대 등 에너지 전환 부문에 가장 큰 비중을 두며 중요성을 강조하고 있다. 이러한 추세에 맞추어 국내에서는 탄소중립 목표치 달성을 위해 재생에너지 보급에 속도를 높이고 있다. 그중 태양광발전시설은 타 에너지원에 비해 부지의 제약이 덜하다는 장점이 있어 국내 재생에너지 중에서 가장 빠르게 성장하고 있으며, 2018년 35,508개였던 태양광발전시설은 2021년 두 배에 가까운 68,635개로 증가했다.

그러나 급증한 태양광발전시설의 수만큼 부작용도 증가했다. 한국에너지공단이 집계한 자료에 따르면 최근 5년간(2018년~2022년 9월) 태양광발전시

설의 피해 사례는 총 222건으로, 2018년에는 단 8건이었던 피해 건수가 2019년에는 28건, 2020년에는 95건으로 크게 증가했다(이동우, 2022). 지역별로 살펴보면 전남이 52건으로 가장 많은 피해가 발생했고, 경남, 경북, 제주가 그 뒤를 따르며 시설이 집중 설치되는 비수도권에서 피해가 크게 나타났다(Table 1). 이러한 피해의 원인은 다양하게 존재하지만 주요 원인으로 지적되는 것은 태풍과 집중호우이다. 한국에너지공단이 공개한 5년간 피해 사례의 원인은 모두 집중호우와 태풍이며, 시기도 여름철인 7월부터 9월에 집중되어 있다. 5년 동안의 태양광설비 사고 유형을 분석한 이진철 외(2019)의 연구도 사고

의 주요 원인으로 집중호우에 의한 토사유출, 태양광 설비파손과 태풍 등 강풍으로 인한 태양광 설비 파손을 지적했다. 구체적으로 산지태양광발전시설의 경우 배수로 설치, 성토 등이 완료되지 않은 상태에서 폭우로 인한 토사유출로 시설의 손상이 발생하며, 건물과 일반부지에 설치된 태양광발전시설의 경우 기초 및 지지대가 최대풍속을 견디지 못해 시설의 손상이 발생했다고 분석했다.

이와 같은 상황에서 정부는 자연재해로 인한 위험을 최소화하기 위해 입지요건 검토 과정에서 재해영향평가 등의 협의를 이행하고 있다. 이 제도는 강우량, 유출량, 토사유출량, 토양침식, 사면의 경사도 등의 지표를 활용하여 홍수, 산사태, 침식 등 재해 유형별 위험요인과 영향을 분석하고 저감대책 마련을 목적으로 한다. 재해영향평가는 홍수량 산정모형을 기반으로 개발 전후 단계의 위험영향을 분석하고 있다. 하지만 수자원 전문가의 주관적인 판단에 따라 모형이 결정되기 때문에 결과가 일관되지 않고(금호준 외, 2021; 이정민 외, 2010), 5천 제곱미터 이상의 시설만을 평가 대상으로 한정하고 있어 소규모 태양광발전 시설의 경우에는 평가대상에서 제외되는 한계가 있다.

이에 본 연구는 모든 태양광발전시설을 대상으로 일관된 취약성 평가가 필요하다는 인식하에 피해 주요 원인인 풍수해를 중심으로 태양광발전시설의 취약성 평가 방법을 개발하고 기존 시설의 취약성을 평가하는데 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 전라남도 해남군이며 최소 통계단위인 집계구를 분석단위로 한다. 시간적 범위는 가장 최신화된 공간자료 기준인 2022년으로 설정하였다.

전라남도 해남군은 지가가 저렴하고 전국 평균보다 10% 이상 높은 일사량을 자랑하며, 해안에서 불

어오는 바람이 가열되기 쉬운 태양광 발전 장치의 가열을 막아 발전효율을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다(장승범, 2006). 이러한 이유로 태양광발전시설이 꾸준히 설치되어 왔으며, 2022년 기준 총 2,133개의 시설로 전라남도에서 가장 많은 시설을 보유하고 있다. 그러나 해남군이 위치한 전라남도는 5년간 태풍 및 집중호우로 인한 태양광발전시설 피해가 가장 많이 발생한 지역이다. 더욱이 최근 해남군에서 환경영향평가와 개발행위허가 등의 절차를 준수하지 않고 설치된 591개 위법 태양광발전시설이 적발됨에 따라 시설 안전성에 대한 재검토가 요구되는 상황이다. 이러한 점을 종합했을 때, 본 연구의 대상지로 해남군이 적절하다고 판단된다.

태양광발전시설의 취약성 평가 절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 문헌조사를 통해 직·간접적으로 영향을 미칠 것으로 예상되는 평가 인자를 수집하고, 수집된 평가 인자 중 해남군과 상관성이 높은 인자들을 선정하기 위해 주성분 분석을 수행한다. 다음으로, 평가 결과의 객관성을 확보하기 위해 데이터 기반의 정량적 분석기법인 엔트로피 기법을 활용하여 선정된 평가 인자의 가중치를 도출한다. 마지막으로 이를 대상지에 적용하여 기존 시설의 취약성을 평가하고, 결과를 종합하여 시사점을 도출한다.

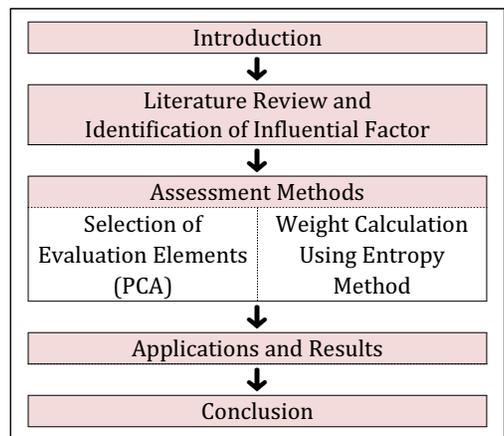


Fig. 1. Flow of Research

1.3 선행연구 검토

태양광발전시설과 관련된 국내 연구를 살펴보면 환경성, 효율성을 극대화하기 위한 입지 선정 연구가 주를 이루고 있다(Table 2). 구체적으로 이지영·강인준(2010)은 환경성을 고려한 입지 기준과 제약 요인을 선정하고, 부산광역시를 대상으로 구별 입지 등급을 분석하였다. 이 연구는 태양광발전시설 설치 시 입지 선정 기준의 필요성을 제기하고 입지에 대한 논의를 활발히 하는데 기여하였다. 이후 환경뿐만 아니라 사회적 영향, 효율성 등 다양한 요인을 고려한 연구들이 다수 수행되었다. 박정일 외(2012)는 환경성과 효율성을 고려한 적정 입지 요소와 함께 제약요소를 제시하였고, 박유민·김영호(2012)는 환경과 사회적 영향을 최소화하기 위한 입지요소를 제시하고 전라남도에 위치한 기존 시설의 타당성을 검토하였다. 이기림·이원희(2015)는 기상, 지리,

경제, 문화, 환경 등 다양한 요인을 종합적으로 고려하여 입지 선정의 정확성을 높이기 위한 연구를 수행하였다.

앞서 언급한 연구들을 포함한 다수의 선행 연구들은 지형, 기후, 경제적 요인 등 태양광발전시설의 효율성 향상을 위한 요인만을 고려하고 있어 재해로부터 시설의 취약성을 반영한 연구는 부재한 상황이다. 이러한 상황에서 최근 해외에서는 이를 고려한 연구가 수행되고 있다. Yılmaz et al.(2023)은 홍수와 침식, 중요 시설과의 거리 등을 포함하여 태양광발전시설의 입지 적정성 평가를 위한 요소를 도출하고, Turkiye, Mentese를 대상으로 실증 분석하였다. Khan et al.(2023)은 홍수취약성을 포함한 지리, 기술, 경제성 등 10가지 평가 요인을 도출하고 이를 파키스탄에 적용하여 태양광발전소 건설에 가장 적합한부지를 선정하였다. 하지만 국내의 대부분의 선행연구

Table 2. Literature Review

Title	Methodology	Application Region	Reference
A Study of PV System Facilities Using Geo-Spatial Information System	AHP-GIS	Busan	Lee and Kang (2010) (in Korean)
An Evaluation and Suggestion of Photovoltaic Power Plant Locations Based on Environmental and Social Impacts, and Sustainability	ANP-GIS	Jeollanam-do	Park and Kim (2012) (in Korean)
A Study on GIS Based Suitability Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation Using Correlation Analysis	Correlation Analysis, GIS	Jeollanam-do	Park et al. (2012) (in Korean)
Solar Power Plant Location Analysis Using GIS and Analytic Hierarchy Process	AHP-GIS	Daegu and Gyeongsangbuk-do	Lee and Lee (2015) (in Korean)
Study for Planning Optimal Location of Solar Photovoltaic Facilities Using GIS	GIS	Nationwide	Yun et al. (2019) (in Korean)
Exploring Flood and Erosion Risk Indices for Optimal Solar PV Site Selection and Assessing the Influence of Topographic Resolution	AHP-GIS	Mentes,e district of türkiye	Yılmaz et al. (2023)
Solar PV Power Plant Site Selection Using a GIS-Based Non-Linear Multi-Criteria Optimization Technique	Full Consistency Method-GIS	Pakistan	Khan et al. (2023)

는 AHP, FUCOM 등 다기준의사결정법을 활용하여 평가 요인을 도출하고 있어 응답자의 지식, 경험에 따라 평가 결과가 영향을 미칠 수 있다는 한계가 존재한다.

본 연구는 데이터 기반의 확률·통계적인 기법을 사용하여 재해요인을 고려한 태양광발전시설의 취약성 평가 방법을 개발하고, 기존 시설의 취약성을 평가하고자 한다. 연구의 차별성은 다음과 같다. 첫째, 그간 국내 연구에서 고려하지 않았던 재해요인을 검토하여 기존 시설의 취약성을 재검토하였다. 둘째, 재해가 가지는 불확실성을 반영할 수 있도록 정보이론 기반의 연구 방법을 활용하여 평가요소를 도출하였다. 셋째, 태양광발전시설의 안전성 확보를 위한 정책적 시사점을 제시하고자 하였다.

2. 연구 설계

2.1 영향인자 조사

태양광발전시설의 취약성 평가를 수행하기에 앞서 지표 선정을 위해 피해에 직·간접적으로 관련된 영향인자를 도출하였다. 본 연구에서는 피해의 주요 원인인 풍수해와 간접적으로 영향을 미치는 태양광발전시설 입지에 관련된 문헌을 조사하였다 (Table 3).

먼저 풍수해 평가에 대한 연구를 살펴보면, 김근영·김상원(2010)과 김상원·김근영(2012)은 국내 시·군·구 또는 시·군의 풍수해 안전성 평가를 목적으로 인구 및 경제, 토지이용, 환경, 방재 4개 분야의 평가항목을 제시하였다. 주진걸 외(2012)는 풍수해 위험요소에 따른 위험도 산정을 목적으로 재해발생 지수, 재해취약성지수, 재해피해분석지수 3개 분야별 평가항목을 제시하였다. 김금지·윤성환(2023)은 특·광역시, 도, 시·군·구 등 도시 규모에 따른 위험도 평가를 목적으로 기상, 인명, 도시기반시설, 환경 4개 분야의 평가항목을 제시하였고, 박상식(2015)

은 풍수해위험지수를 개발하며 수리구조물, 풍수해 위험지구 지정현황, 우수관거 보급률, 과거 10년 동안의 재산 및 인명피해, 불투수면적비 등 10개의 평가요인을 제시하였다.

태양광발전시설 입지에 관한 선행연구의 대부분은 효율성 향상을 위한 최적입지 평가를 목적으로 하고 있으며, 일부 연구에서만 입지 제약요인을 다루고 있다. 이지영·강인준(2010)은 환경을 고려한 입지 설정을 목적으로 공사 중인 장소, 역사적인 장소, 유보지를 제약요인으로 제시하였고, 박정일 외(2012)는 환경성과 효율성을 고려한 입지 선정을 위해 국토환경성평가, 지가가 높거나 인구가 밀집한 도시지역을 제약요인으로 선정하였다. Yilmaz et al.(2023)은 홍수와 침식을 고려한 태양광발전시설의 적정 입지 선정을 위해 하천댐 붕괴 관련 홍수위험지수와 침식위험지수를 위험지수로 고려하였고, 그 밖에 지리적 요인으로 인구밀집지역, 도로, 송전선과의 거리, 토지이용을 영향요인으로 제시하였다. Khan et al.(2023)은 홍수 민감성 지표로 수로 및 수역까지의 거리와 경제적 기준으로 인구밀집지역 및 도로까지의 거리를 제시하였다. Kim and Park(2021)은 태양광발전시설의 산사태 민감도 분석을 목적으로 기후와 지형, 산림 유형, 토지이용을 제시했다.

검토 결과, 선행연구들은 기상과 같은 재해 유발요인뿐만 아니라 인구, 기반시설, 토지이용 등 재해 영향요인을 함께 고려하고 있다는 공통점이 있었다. 다만 효율성 향상을 배경으로 한 태양광 발전 시설 연구의 특성상 특정 지역이나 시설과의 거리 등 효율성을 높이기 위한 경제적 민감도를 함께 고려하고 있음을 확인할 수 있었다.

2.2 후보지표 선정 및 자료구축

재난에 취약한 지역은 재난을 유발할 수 있는 기상 현상이 자주 발생하고, 재난에 취약한 사회적, 지형적 조건을 가지고 있으며 동일한 재해가 발생하였을

Table 3. Summary of Variables Exploited in the Previous Studies

Category	Title	Factors
Flood Risk Assessment	Kim and Kim (2010) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • (Population and economy) population density, number of disaster victims, employment density • (Landuse) park and forest area, land area, river area • (Environment) embankment area, ditch area, maintenance area • (Etc) sewage coverage rate, precipitation amount, precipitation days
	Kim and Kim (2012) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • (Social&economy) population density, employment density, rate of disaster victims • (Landuse) green area, land area, river area • (Disaster prevention facilities) embankment area, sewage rate, catchment area • (Natural environment) precipitation, precipitation days, wind speed
	Joo et al. (2012) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • (Disaster occurrence index) number of disasters by grade over the past 10 years • (Disaster vulnerability index; social) population density, proportion of dependent population, casualty • (Disaster vulnerability index; topography) landslides, disaster risk areas, drainage density, semi-basement households, vinyl house area • (Disaster damage analysis index) average disaster damage by disaster level
	Kim and Yoon (2023) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • (Climate) rainy days, typhoon • (Human) exposed people, vulnerable people • (Urban infrastructure) semi-basement building, old building, impermeable area, underground road, no sewerage • (Environment) river, flood prone river area
	Park (2015) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • (Vulnerability) water structures (drainage culverts and channels, pump stations, reservoirs), storm and flood risk sections, stormwater pipe penetration rate, river opening rate, disaster warning facilities • (Risk) property damage over the past 10 years, human casualties over the past 10 years, impermeable area ratio
Solar Power Plant Location Analysis	Lee and Kang (2010) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • Places under construction • Historic places • Reserved land
	Park and Kim (2012) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • National environmental assessment rating (level 1 and 2) • Distance from livestock facilities (within 1 kilometer) • Densely populated areas
	Park et al. (2012) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • National environmental assessment rating (level 1 and 2) • Urban area
	Lee and Lee (2015) (in Korean)	<ul style="list-style-type: none"> • Distance of the historic site/cultural assets • Residence
	Yilmaz et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • (Risk) flood hazard index, erosion risk index • (Distance) distance from densely populated areas, distance from roads, distance from transmission lines and transformation centers • Landuse
Khan et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • (Flood susceptibility criteria) distance to water ways, distance to water bodies • (Economic criteria) distance to populated area, distance to roads 	

때 타 지역에 비해 피해가 크게 발생된다는 특징을 가지고 있다(주진걸 외, 2012: 76).

본 연구는 선행연구 고찰을 바탕으로 기후, 인구, 지형, 토지이용 4가지 부문을 기준으로 연구 목적과의 적합성, 대표성, 데이터취득 가능성 등을 고려하여 평가지표를 선정하였으며, 최종적으로 선별된 후보지표는 Table 4와 같다.

기후요인은 기상현상에 의한 취약성을 평가하기 위한 항목으로써, 기후의 빈도와 강도는 피해 발생 가능성과 직접적으로 관계가 있다. 본 연구는 풍수해의 빈도와 강도를 모두 고려하기 위해 강우 및 태풍발생일수와 일 및 시간당 최대 강수량, 5일 이상 강수 지속기간, 최대풍속을 후보 지표로 선정하였다. 기후요인 자료는 기상청(Korea meteorological administration)에서 제공하는 일 강수량, 1시간 최대 강수량, 최대풍속, 최대 순간풍속 자료를 활용하여 구축하였다. 구축 시 해남군 경계에 25km 이내의 15개 기상관측소 자료를 활용하였으며, 기상관측소 값을 공간보간법(IDW)을 통해 집계구 값으로 산출하였다.

인구요인은 재해에 직접적인 영향을 받는 요인으로 인명피해 발생 규모를 예측하기 위한 항목이다. 대상 지역에 인구가 많을수록 재해에 대한 노출도가 높고 어린이 또는 노약자 등 대·대응이 취약한 인구가 많을수록 피해 규모가 클 것으로 판단된다. 이에 인구밀도와 행정안전부 지역안전지수에서 정의하고 있는 65세 이상 14세 이하의 재난약자 인구수를 후보 지표로 선정하였다. 자료는 통계청 집계구 단위의 연령별 인구수와 총인구를 활용하여 산출하였다.

지형 요인은 지형에 의한 재해 노출 또는 영향력을 의미한다. 이진걸 외(2019)는 태양광발전시설의 사고 원인으로 집중호우에 의한 토사유출과 강풍으로 인한 설비파손을 지적했다. 배수능력이 낮고 바람에 의한 영향이 높을수록 취약성이 높을 것으로 판단된다. 이를 반영하기 위해 물이 빠져나가

는 정도를 측정할 토양 배수등급과 모든 방향에 대한 평균 바람 영향을 나타내는 바람영향지수를 후보 지표로 선정하였다. 자료는 농촌진흥청 국립농업과학원의 배수등급 데이터와 한국지질자원연구원의 바람영향지수 데이터를 활용하여 구축하였다. 배수등급과 바람영향지수는 값이 클수록 배수능력이 낮고 바람영향이 크다는 것을 나타내기 때문에 데이터 구축 시 집계구 단위로 할당할 후 최대등급과 최댓값으로 산출하였다.

마지막으로 토지이용은 대상지의 피해 가능성을 평가하는 항목으로, 위험이 발생할 우려가 있는 토지를 의미한다. 이에 대한 지표로는 풍수해 발생이 우려되는 지역인 풍수해 위험지역과 자연재해위험지구, 토사유출 우려가 있는 산사태 위험지역, 그리고 불투수 면적비를 후보지표로 선정하였다. 자료는 해남군의 내부 자료와 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지피복 현황을 활용하였으며, 집계구 단위로 면적을 할당하여 산출하였다.

3. 취약성 평가 지표 선정

3.1 표준화 과정

먼저 서로 다른 단위 및 성질을 가지는 변수들 간의 연산을 위해 이를 통합하는 표준화 과정이 필요하다. 표준화 방법은 매우 다양하나 일반적으로 순위매기기(ranking), 정규화 점수(Z-score) 및 축척 재조정(re-scaling) 방법이 많이 사용된다(김지은 외, 2019: 444). 그중 본 연구는 국내 취약성 평가에서 가장 많이 사용되는 정규화 점수(Z-score) 방법을 활용하여 모든 자료들의 평균이 0, 표준편차가 1이 되도록 표준화하였다.

3.2 주성분 분석을 통한 평가 인자 선정

주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)은 다변량비모수적(non-parametric) 방법을 이용

Table 4. Candidate Influencing Factors for Vulnerability Assessment of Solar Power Generation Facilities

Classification	Factors	Definition	Unit	Data		
Climate	Disaster Frequency	Number of days with rainfall of 10 mm or more	Average number of days 10 mm/day over the past 10 years (2013-2022)	Day	Korea Meteorological Administration	
		Number of days with rainfall of 25 mm or more	Average number of days 25 mm/day over the past 10 years (2013-2022)	Day		
		Number of days with rainfall of 20 mm or more	Average number of days 20 mm/day over the past 10 years (2013-2022)	Day		
	Number of typhoon occurrence days	Number of times the maximum wind speed was 17 m/s or more in the past 10 years (2013-2022)	Number			
	Disaster Intensity	Number of rainfall days lasting more than five days	Average number of days with rainfall exceeding 5 days over the past 10 years (2013-2022)	Day		
		Maximum daily rainfall	Average maximum daily precipitation over the past 10 years (2013-2022)	mm		
		Maximum hourly rainfall	Average maximum precipitation per hour over the past 10 years (2013-2022)	mm		
		Maximum wind speed	Average daily maximum wind speed over the past 10 years (2013-2022)	m/s		
	Population	Number of people aged 65 to 14	Number of people aged 65 to 14 as of 2022	Person		Statistics Korea
		Population density	Population density as of 2022	Person/m ²		
Topography	Soil drainage grade	Maximum level of drainage class	Class	National Institute of Agricultural Sciences		
	Wind impact index	Wind exposure index of terrain		Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources		
Land Use	Areas susceptible to landslide	Area of areas susceptible to landslide as of 2022	m ²	Haenam-gun		
	Natural disaster prone areas	Area of natural disaster prone areas as of 2022	m ²			
	Area of risk area	Area of risk area according to local comprehensive plans for storm and flood damage reduction of 2016	m ²			
	Impermeable area ratio	Percentage of impervious surface area in 2022	%	Environmental Geographic Information Service		

Note 1) The impervious surface area is based on the calculation method of environmental spatial information service, and is divided into single residential facilities (111), communal residential facilities (112), industrial facilities (121), commercial/office facilities (131), and mixed in the land cover map. Region (132), culture, sports, and recreation facilities (141), airport (151), port (152), railroad (153), road (154), other transportation and communication facilities (155), basic environmental facilities (161) Extracted from the area of educational/administrative facilities (162), other public facilities (163), facility cultivation areas (231), and ranches/fish farms (251).

Note 2) Grade 1 (very good), Grade 2 (good), Grade 3 (slightly good), Grade 4 (slightly poor), Grade 5 (poor), Grade 6 (very poor)

하여 정보의 손실이 최소가 되도록 결정한 몇 개의 주요 성분으로 요약하여 원래의 데이터가 포함하는 정보와 거의 같아지도록 구성하는 것을 의미한다(정수정 외, 2010: 70). 따라서 주성분 분석은 최적의 해를 도출하는 것으로 알려져 있다(홍준호 외, 2020: 141). 본 연구에서는 도출된 영향인자 중 해 남균과 상관성이 떨어지는 인자를 제거하기 위해 주성분 분석을 수행하였다.

주성분 분석을 통해 평가 인자를 선정하는 과정은 다음과 같다. 표준화된 자료를 바탕으로 각 영향인자 사이의 상관성을 파악하기 위해 두 가지 인자 사이의 상관계수를 계산하여 상관관계 매트릭스를 작성하고, 이를 활용하여 고유값 및 고유벡터를 추정한다(김지은 외, 2019: 445). 그 결과 각 주성분의 고유치가 1 이상 또는 누적 기여율이 80%를 넘는 것을

기준으로 하여 주성분을 선택한다(정수정 외, 2010: 71). 그러나 주성분 분석의 개수를 결정할 때 일반적으로 주관적인 판단에 의한 경우가 많다. 1개의 주성분의 설명력이 크다고 판단되면 1개의 주성분을 취하는 경우도 있으며, 1개의 주성분으로 설명력이 충분하지 않을 경우 2개 이상의 주성분을 취할 수 있다.

2절에서 도출된 평가 인자를 주성분 분석한 결과는 Table 5와 같다. 분석 수행 전 요인간 공통성을 높이기 위해 0.4 이하의 요인은 제거하였다. 또한 KMO와 Bartlett 구형성 검정을 이용하여 요인분석의 적합성을 확인한 결과, KMO 0.665, Bartlett 구형성 검정치는 0.001로 적합한 것으로 판단되었다. 주성분 분석 결과, 3개의 요인이 추출되었고, 제1주성분은 37.9% 제2주성분은 24.3%, 제3주성분은 16.6%로 총 76%의 설명력을 가진다. 본 연구는 과반수에 가

Table 5. Results of Principal Component Analysis

Factors	Communalities	Component		
		1	2	3
Maximum Hourly Rainfall	.952	.935	-.219	-.077
Maximum Wind Speed	.902	-.933	.011	-.145
Number of Typhoon Occurrence Days	.927	-.920	-.119	-.033
Number of Rainfall Days Lasting More than Five Days	.834	.879	.244	.041
Maximum Daily Rainfall	.684	.816	.121	.059
Impermeable Area Ratio	.929	.641	-.378	-.137
Population Density	.861	.545	-.265	-.196
Number of Days with Rainfall of 25 mm or More	.892	-.012	.963	.025
Number of Days with Rainfall of 10 mm or More	.406	.252	.936	.112
Number of Days with Rainfall of 20 mm or More	.572	-.209	.927	-.014
Soil Drainage Grade	.861	-.151	.015	.916
Wind Impact Index	.906	.247	-.148	.907
Area of Risk Area	.545	-.078	.368	.635
Eigenvalues		4.934	3.169	2.168
Proportion of Variance		37.956	24.375	16.680
Cumulative Proportion		37.956	62.331	79.011

KMO=.665, Bartlett's $\chi^2=2674.08$ ($p<.001$)

Note 1: Factor extraction method: principal component analysis

Note 2: Rotation method: Varimax with Kaiser normalization

까운 설명력을 가지는 제1주성분을 평가인자로 채택하였다. 제1주성분에는 시간당 최대 일강수량, 최대풍속, 태풍 발생일수, 지속기간 5일 이상 강수일수, 1일 최대 일강수량, 불투수 면적비, 인구밀도 등 7개의 평가 인자가 포함되어 총 7개의 인자를 최종 평가 지표로 선정하였다.

3.3 엔트로피를 활용한 가중치 도출

가중치를 산정하기 위해 AHP 기법, 델파이 기법 등이 많이 사용되나, 응답자의 주관적 판단에 따라 결과가 달라질 수 있는 한계가 존재한다. 반면 엔트로피 기법은 의사결정자의 주관적 요소를 배제하고 주어진 데이터의 속성을 이용하여 가중치를 추정해낼 수 있는 객관성이 검증된 방법이다(김지은 외, 2019: 445). 이러한 특성으로 인해 데이터의 정량적인 특성을 활용하여 재해의 불확실성을 고려할 수 있어 홍수와 산사태 등 재해 취약성 평가와 수문학에서 활발히 활용되고 있다(이규민 외, 2020; 김지은 외, 2019; 이선미 외, 2020 등).

엔트로피 가중치 산정 절차는 다음과 같다(Fig. 2). 먼저 지표의 변수들의 표준화 과정을 거친 후 대안-

속성 행렬을 적용하여 엔트로피 E_j 를 산정한다. 이후 각 평가 인자에 대한 가중치를 구하기 위해 사용되는 자료들의 다양성 척도인 d_j 를 계산하며, 이 값들을 속성정보에 대해 정규화한 것이 해당 평가 인자의 가중치 w_j 가 된다(김지은 외, 2019: 445).

위의 과정을 통해 도출된 가중치는 Table 6과 같다. 시간당 최대 일강수량에 대한 가중치가 가장 높게 나타났으며 그 외 최대풍속, 1일 최대 일강수량, 지속기간 5일 이상 강수일수 등 순으로 높은 가중치를 나타냈다. 반면 인구밀도는 타 지표에 비해 현저

Table 6. Weights of Evaluation Factors Applying the Entropy Method

Evaluation Factors	Weight
Maximum Hourly Rainfall	0.202
Maximum Wind Speed	0.198
Number of Typhoon Occurrence Days	0.137
Number of Rainfall Days Lasting More than Five Days	0.159
Maximum Daily Rainfall	0.170
Impermeable Area Ratio	0.113
Population Density	0.021

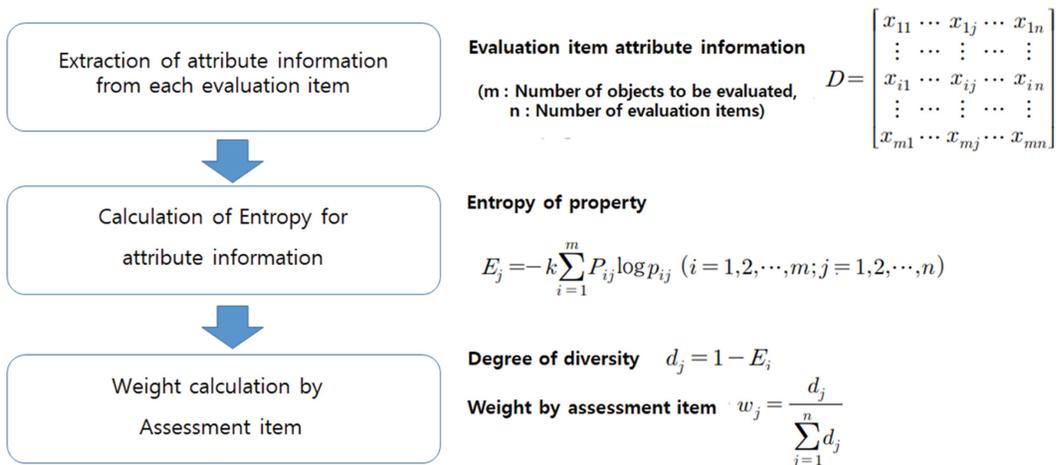


Fig. 2. Procedure for Entropy Weight

Source: Ha and Chung (2019: 189), Kim et al. (2019: 445) (in Korean)

히 낮은 가중치가 도출되었는데, 이는 자료가 흩어진 정도에 따라 가중치를 산출하는 엔트로피 방법의 특성상 보간법을 사용한 다른 데이터에 비해 값의 분포가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결과 및 고찰

3장에서 도출된 지표별 가중치를 적용하여 중첩하면 재해요인을 고려한 태양광발전시설의 취약성을 분석할 수 있다. 분석 결과를 토대로 취약 정도를 구분하기 위해 자치단체의 안전을 관리하는 제도 중 하나인 지역안전지수 산출 기준을 활용하여 5등급으로 구분하였다. 지역안전지수는 1등급 10%, 2등급 25%, 3등급 30%, 4등급 25%, 5등급 10%로 설

정한다. 평가는 2022년 기준 태양광발전사업으로 허가된 2,133개 시설을 대상으로 하였다.

4.1 집계구별 평가 결과

지표별 분석 결과를 집계구 단위에 중첩한 결과는 Fig. 3과 Table 7과 같다. 분석 결과, 전반적으로 남동지역에 1, 2등급이 집중 분포하며 취약한 것으로 나타났으며, 화원면, 산이면, 문내면 등 북쪽 지역의 경우 주로 4, 5등급이 분포하며 안전한 지역으로 나타났다. 특히 취약지역은 해남읍, 북일면 등 비교적 인구가 집중되는 도심지역에 다수 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 태풍 및 강우 영향요소뿐만 아니라 불투수 면적비, 인구밀도 등 도심지역 특성이 결과에 반영된 것으로 판단된다.

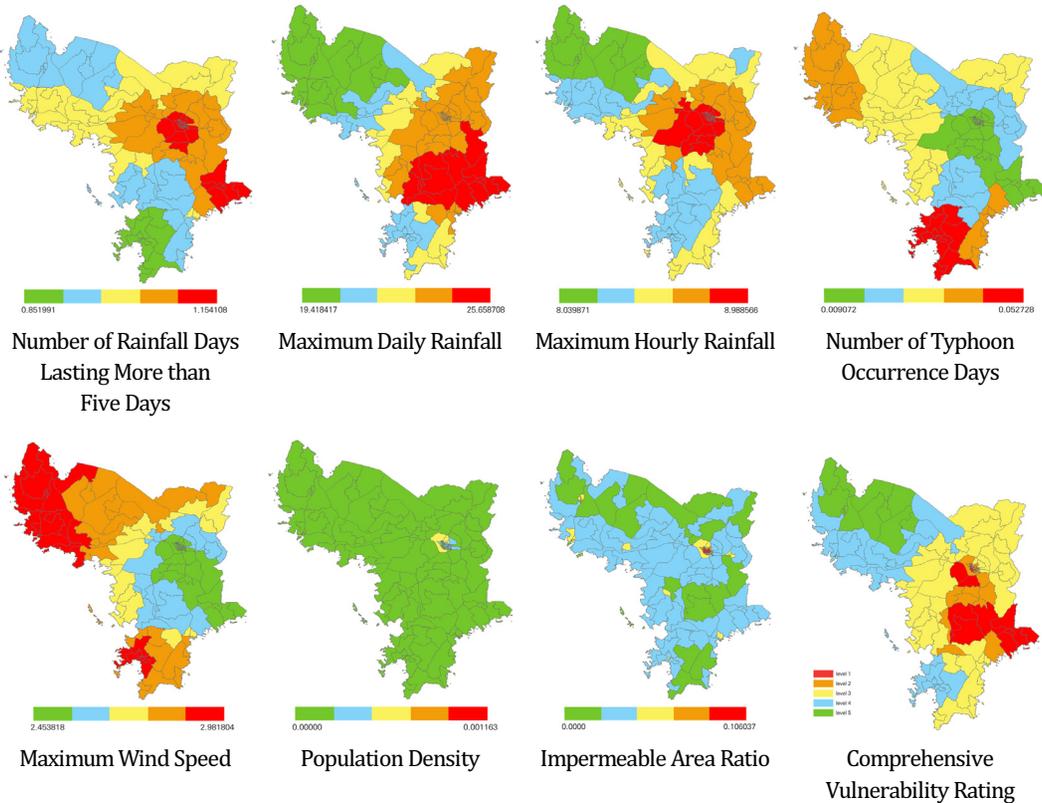


Fig. 3. Analysis Results

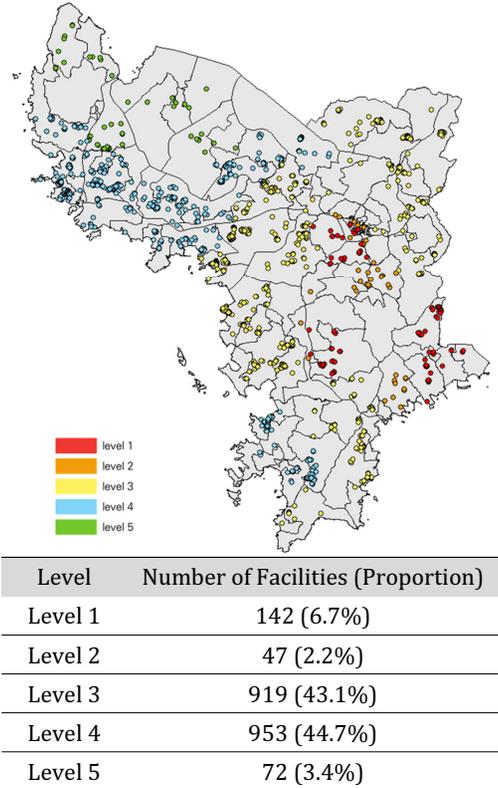
Table 7. Analysis Results by Administrative District in Haenam-gun

Level	Number of Output Area	Eup/Myeon
Level 1	16	Haenam-Eup (8), Bukil-Myeon (5), Hyeonsan-Myeon (2), Samsan-Myeon (1)
Level 2	41	Haenam-Eup (33), Samsan-Myeon (5), Bukpyeong-Myeon (1), Songji-Myeon (1), Hyeonsan-Myeon (1)
Level 3	52	Bukpyeong-Myeon (11), Hwasan-Myeon (8), Okcheon-Myeon (6), Haenam-Eup (6), Hwangsan-Myeon (5), GyeGok-Myeon (4), Masan-Myeon (4), Hyeonsan-Myeon (3), Songji-Myeon (3), Bukil-Myeon (2), Songji-Myeon (15), Munnae-Myeon (12), Hwangsan-Myeon (9), Hwawon-Myeon (2), Sani-Myeon (2), Masan-Myeon (1), Hwasan-Myeon (1)
Level 4	42	Hwawon-Myeon (9), Sani-myeon (7)
Level 5	16	Hwawon-Myeon (9), Sani-myeon (7)

4.2 기존 시설의 평가 결과

집계구별 분석 결과를 토대로 시설별 등급을 도출한 결과는 Fig. 4와 같다. 등급별 시설의 수를 살펴보면, 4등급 시설이 953개소로 가장 많았고, 3등급 919개소, 1등급 142개소, 5등급 72개소, 2등급 47개소로 3등급 이상의 시설이 91.1%로 대부분 양호한 수준으로 나타났다.

그러나 1등급에 해당하는 시설이 142개로 2등급 시설보다 많이 도출되어 이에 대한 대책이 시급한

**Fig. 4.** Vulnerability Assessment Results of Solar Power Generation Facilities in Haenam-gun

상황으로 보인다. 특히 시설의 허가 연도를 살펴보면 다수의 시설이 2017~2018년에 허가받은 시설로 나타났는데, 이러한 결과는 설치 기준 완화 정책이 영향을 미친 것으로 판단된다. 2017년 정부는 재생에너지 보급 확대를 위해 도로·주거지역으로부터의 이격 거리를 100m 이내로 완화하는 ‘태양광발전 입지 가이드라인’을 제정하였다. 완화 기준에 따라 설치된 태양광발전시설의 경우 거주지와의 인접성이 취약성에 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 시설별 평가결과에서도 인구가 밀집된 해남읍과 북일면에 1등급 시설이 다수 위치하고 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과는 기준 완화 시점에 설치된 시설의 재검토가 필요하며, 더 나아가 일관된 완화정책 보

다 지역의 특성에 맞춘 완화 정책이 필요하다는 시사점을 제시한다.

5. 결론

본 연구는 기후변화로 태양광발전시설의 피해가 가중되고 있으나 이에 대응할 수 있는 제도가 미흡하다는 문제에서부터 시작하였다. 이에 전라남도 해남군을 연구 대상으로 재해정보를 고려한 태양광발전시설의 취약성 평가를 위한 평가 기준과 방법을 마련하고, 기존 태양광발전시설의 취약성을 평가하였다. 취약성 평가는 데이터의 정량적 특성을 활용하여 기후변화의 불확실성을 반영할 수 있도록 통계적 기법인 주성분 분석과 엔트로피 기법을 사용하였다. 주성분 분석 결과, 전라남도 해남군의 태양광발전시설 취약성을 평가하기 위한 주요 지표는 시간당 최대 일강수량, 최대풍속, 태풍 발생일수, 지속기간 5일 이상 강수일수, 1일 최대 일강수량, 불투수 면적비, 인구밀도 등 7가지 지표가 선정되었고, 엔트로피 기법을 통해 지표별 가중치를 산출한 결과 시간당 최대 일강수량, 최대풍속, 1일 최대 일강수량, 지속기간 5일 이상 강수일수 순으로 높은 가중치가 도출되었다. 계산된 가중치를 합산하여 취약성을 도출한 결과, 남동지역에 1, 2등급이 집중 분포하는 경향이 나타난 반면 화원면, 산이면, 문내면 등 북쪽 지역의 경우 4, 5등급이 주로 분포하며 비교적 안전한 지역으로 나타났다. 시설별로는 2,133개 시설 중 91.1%가 3등급 이상의 시설로 대부분 양호한 것으로 나타났다으나 1등급 시설이 142개로 2등급 시설보다 많이 도출되어 이에 대한 대책 마련이 필요한 상황으로 나타났다.

본 연구 결과에 따른 정책적 제언은 다음과 같다. 첫째, 해남군 도시군 조례 내 태양광 발전 시설 허가 기준의 보완이 필요하다. 해남군은 군 조례 제19조의3에 발전 시설에 대한 허가 기준을 제시하고 있으

며, 도로, 자연취락지구, 주거 밀집 지역, 관광지와의 이격 거리, 그리고 산지 태양광의 경우 경사도를 규제 사항으로 명시하고 있다. 그러나 본 연구 결과 시간당 최대 일강수량, 최대풍속, 태풍 발생일수, 지속기간 5일 이상 강수일수, 1일 최대 일강수량 등 재해 빈도와 강도, 기후 관련 지표가 시설 취약성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 따라 재해 및 기상 요인을 허가 기준에 반영할 수 있도록 보완 방안을 검토할 필요가 있다.

둘째, 기존 시설의 재평가와 재해영향평가의 대상 확대가 필요하다. 현재 수행되는 재해영향평가는 일정 규모 이상의 사업만을 대상으로 하고 있어 평가 대상에 포함되지 않는 시설이 있다. 따라서 기존 시설의 재평가가 이뤄져야 할 것이며, 도시의 경우 부지확보의 어려움으로 작은 규모로 설치되는 경우가 많기 때문에 시설의 규모와 관계없이 취약성을 평가할 수 있도록 대상 시설 확대 방안이 논의될 필요가 있을 것이다.

본 연구는 그동안 성능 및 효율성을 고려한 기존 연구에서 벗어나 시설의 취약성을 고려하였다는 점에서 의의가 있으며, 본 연구의 결과가 향후 시설 설치 시 또는 기존 시설의 관리 및 운영 시 피해 잠재력을 확인할 수 있는 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구는 해남군에 국한하여 적용하였지만, 제시된 평가방법을 기반으로 다양한 변수와 방법론을 검토하고 발전시킨다면 지역 및 도시단위로 확대 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 위해 연구 대상 지역의 확대와 신뢰도 확보를 위한 후속연구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. 김호준·김학수·고택조(2021), "복합유역 홍수량 산정 및 개발지역 하류 통수능 평가", 「한국방재학회」, 21(4): 187~195.
2. 김근영·김상원(2010), "풍수해에 대한 우리나라 기

- 초단치단체의 안전성 평가를 위한 다기준 의사결정기법의 활용방안 연구”, 「한국지역개발학회 하계종합학술대회 논문집」, 33~44.
- Kim, G. Y. and S. W. Kim (2010), “Developing The Evaluationg Approach for Flood-Disaster Safety of Kaeon Local Govenments Using a Multi-Criteria Decision-Making Process”, *The Korean Regional Development Association*, 33~44. (in Korean)
3. 김금지·윤성환(2023), “기후변화 적응을 위한 재해 위험도 평가방법론 구축 및 적용에 관한 연구”, 「대한건축학회논문집」, 39(3): 161~170.
Kim, K. J. and S. H. Yoon (2023), “Establishing and Applying Disaster Risk Assessment Methodologies for Climate Change Adaptation”, *Architectural Institute of Korea*, 39(3): 161~170. (in Korean)
 4. 김상원·김근영(2012), “네트워크 분석적 의사결정기법을 활용한 우리나라 시군의 풍수해 안전성 평가연구”, 「한국지역개발학회」, 24(2): 1~14.
 5. 김지은·박지연·이주현·김태웅(2019), “주성분 분석 및 엔트로피 기법을 적용한 사회·경제적 가뭄 취약성 평가”, 「한국수자원학회」, 52(6): 441~449.
Kim, J. E., J. Y. Park, J. H. Lee and T. W. Kim (2019), “Socioeconomic Vulnerability Assessment of Drought Using Principal Component Analysis and Entropy Method”, *The Korea Water Resources Association*, 52(6): 441~449. (in Korean)
 6. 박상식(2015), “풍수해위험지수를 활용한 지역별 방재기상특보 기준 설정기법”, 박사학위논문, 단국대학교.
Park, S. S. (2015), “Methodology of Regionalized Meteorological Disaster Warning Level Considering Storm Hazard-Index”, D. dissertation, Dankook University. (in Korean)
 7. 박유민·김영호(2012), “환경적·사회적 영향을 고려한 태양광발전소의 기존 입지 타당성 평가 및 지속가능한 입지 제안”, 「한국경제지리학회」, 15(3): 437~455.
Park, Y. M. and Y. H. Kim (2012), “An Evaluation and Suggestion of Photovoltaic Power Plant Locations based on Environmental and Social Impacts, and Sustainability”, *The Economic Geographical Society of Korea*, 15(3): 437~455. (in Korean)
 8. 박정일·박민호·최승영(2012), “상관분석을 이용한 GIS 기반 태양광발전소 적지분석 연구”, 「한국지적학회」, 28(2): 91~107.
Park, J. I., M. H. Park and S. Y. Choi (2012), “A Study on GIS Based Suitability Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation Using Correlation Analysis”, *The Korean Society of Cadastre*, 28(2): 91~107. (in Korean)
 9. 윤성욱·백이·장재경·최덕규·강동현·손진관·박민정·강석원·권진경(2019), “GIS를 이용한 태양광시설 설치를 위한 적정지역 선정에 관한 연구”, 「한국생물환경조절학회」, 28(3): 243~254.
Yun, S. W., Y. Paek, J. K. Jang, D. K. Choi, D. H. Kang, J. K. Son, M. J. Park, S. W. Kang and J. K. Gwon (2019), “A Study for Planning Optimal Location of Solar Photovoltaic Facilities using GIS”, *The Korean Society For Bio-Environment Control*, 28(3): 243~254. (in Korean)
 10. 이규민·최진원·전경수(2020), “사회적 평가 지표를 반영한 도시 홍수취약성 평가”, 「LHI Journal」, 11(1): 109~116.
 11. 이기림·이원희(2015), “GIS와 계층분석법을 이용한 태양광 발전소 입지 분석”, 「한국지리정보학회」, 18(4): 1~13.
Lee, K. R. and W. H. Lee(2015), “Solar Power Plant Location Analysis Using GIS and Analytic Hierarchy Process”, *The Korean Association of Geographic Information Studies*, 18(4): 1~13. (in Korean)
 12. 이동우(2022.10.2), “태양광 태풍·폭우에 ‘와르르’... 5년간 설비 사고 220건, 아시아경제.
Lee, D. W. (2022.10.2.), “Solar Typhoons and Heavy Rains ‘Rumbled’... 220 Equipment Accidents in 5 Years”, *Asia Economy*.
 13. 이선미·최영제·이재응(2020), “엔트로피 가중치 산정방법을 활용한 도시지역 홍수취약성 평가”, 「한국방재학회」, 20(6): 389~397.
 14. 이정민·윤정란·김영진·진규남·한형근(2010), “사전 재해영향성검토 시 합리적인 홍수유출 모의모형 선정에 관한 연구”, 「LHI Journal」, 1(1): 75~82.
 15. 이지영·강인준(2010), “GIS 기술을 활용한 태양광 시설 입지선정에 관한 연구”, 「대한공간정보학회」, 18(2): 99~105.
Lee, J. Y. and I. J. Kang(2010), “A Study of PV System Facilities Using Geo-Spatial Information System”, *Korea Spatial Information Society*, 18(2): 99~105. (in Korean)

16. 이진철·김의경·권태훈·전민수·진명은·이규상·강병주(2019), “태양광 설비의 사고 유형 분석”, 「한국태양에너지학회」, 17(2): 7~11.
17. 장승범(2006.7.8), “전남 서남해안 일사량 많고 지가 저렴 태양광발전 최적지”, 한국수산업경제.
18. 정수정·김용수·김태형(2010), “주성분분석을 이용한 사면의 위험성 평가”, 「한국지반공학회」, 26(10): 69~79.
19. 주진걸·이정호·박무중(2012), “풍수해 위험환경 평가모형 개발”, 「한국방재학회」, 12(4): 75~81.
Joo, J. G., J. H. Lee and M. J. Park (2012), “Development of Flood Risk Assessment Model”, *Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(4): 75~81. (in Korean)
20. 하준혁·정건희(2019), “전국 시군구 대상 대설 취약성 분석”, 「한국방재학회」, 19(6): 187~195.
Ha, J. H. and G. H. Chung (2019), “Snow Vulnerability Analysis for Administrative Districts in South Korea”, *Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(6): 187~195. (in Korean)
21. 홍준호·오민지·조용빈·이경희·조완섭(2020), “다차원 데이터의 군집분석을 위한 차원축소 방법: 주성분분석 및 요인분석 비교”, 「한국빅데이터학회」, 5(2): 135~143.
22. Khan, A., Y. Ali and D. Pamucar (2023), “Solar PV Power Plant Site Selection Using a GIS-based Non-Linear Multi-Criteria Optimization Technique”, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(20): 57378~57397.
23. Kim, H. G. and C. Y. Park (2021), “Landslide Susceptibility Analysis of Photovoltaic Power Stations in Gangwon-do Republic of Korea”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1): 2328~2351.
24. Yilmaz, K., A. E. Dinçer and E. N. Ayhan (2023), “Exploring Flood and Erosion Risk Indices for Optimal Solar PV Site Selection and Assessing the Influence of Topographic Resolution”, *Renewable Energy Volume*, 216(119056): 1~16.

요 약

본 연구는 재해영향을 고려한 태양광발전시설의 평가 방법을 개발하고, 기존 시설의 취약성 분석을 목적으로 한다. 기존 시설의 재평가가 시급한 전라남도 해남군을 연구 대상지로 선정하였으며, 보다 객관적인 관점에서 취약성을 평가할 수 있도록 주성분 분석과 엔트로피 기법을 연구 방법으로 활용하여 대상지의 취약성을 평가하였다. 취약성 평가지표는 시간당 최대 일강수량, 최대풍속, 태풍 발생일수, 지속기간 5일 이상 강수일수, 1일 최대 일강수량, 불투수 면적비, 인구밀도 등 7개가 선정되었으며, 시간당 최대 일강수량, 최대풍속, 1일 최대 일강수량, 지속기간 5일 이상 강수일수 순으로 높은 가중치가 도출되었다. 도출된 가중치를 중첩한 결과 해남군 지역별로는 해남읍, 북일면 등 남동지역은 1, 2등급이, 화원면, 산이면, 문내면 등 북쪽 지역의 경우 4, 5등급이 분포하며 취약성의 차이를 보였으며, 시설별로는 2,133개 시설 중 3등급 이상 시설이 91.1%로 양호한 편이나 2등급보다 1등급의 시설 개수가 많아 이에 대한 대책이 필요한 상황으로 나타났다. 본 연구는 도시방재력을 고려하여 태양광발전시설을 평가하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 시설 설치 시 또는 기존 시설의 관리 및 운영 시 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 풍수해, 자연재해, 태양광발전시설, 취약성 평가