

탄소중립 정책에 따른 태양광 발전시설 입지영향 효율성 분석: 영호남 비교

이옥진*

<목 차>

- I. 서론
- II. 이론적 배경 및 선행 연구
- III. 연구모형
- IV. 분석 결과
- V. 결론

국문초록 : 최근 전 세계적으로 전례 없는 홍수와 극심한 폭염이 발생하면서 급속한 기후 변화의 심각성에 대한 세계적 인식이 높아졌다. 태양광 발전시설의 사회적 수용성과 안전성을 적극 홍보하는 한편, 국가 차원에서 정책 결정과 사업 운영을 최적화하기 위해 노력하고 있다. 본 연구는 영남·호남권 12개 주요 시·도의 태양광 발전설비 효율을 지역 에너지자원 지원 시스템과 기상자료를 활용한 DEA(Data Envelopment Analysis)를 활용하여 분석하였다. 첫째, 지역 내 지리적 범위의 차이는 발전효율의 성능적 평가의 차이점이 발생하는 것을 알 수 있었다. 둘째, 경제적 측면과 환경적 측면을 모두 고려한 태양광 발전시설에 대한 최적의 공간정보시스템의 중요성을 강조한다. 국내 신재생에너지 발전시설의 입지적 조건 개선으로 거시적 측면의 운영을 질적으로 보완하여 에너지 정책적 지원 필요성을 시사하며, 에너지 투자사업의 경제성 및 타당성을 제시하고자 한다.

주제어 : 태양광발전시설, 발전성능, 효율성 분석, 기상분석, 입지분석

* 경북대학교 융합기술경영학과 박사과정/(재)대구테크노파크 책임연구원(ojlee@dgtp.or.kr)

** 이 논문은 산업통상자원부 융합기술사업화 확산형 전문인력 양성사업 P0013989(예산논문)의 지원을 받아 수행되었음

Analysis of Site Impact and Efficiency of Photovoltaic Power Facilities under Carbon Neutrality Policy: A Comparison between Yeongnam and Honam Regions

Okjin Lee

Abstract : The recent occurrence of unprecedented floods and severe heatwaves worldwide has raised global awareness about the gravity of rapid climate change. Consequently, there is a growing focus on replacing fossil fuel-based energy systems with renewable energy sources as a significant measure to address the climate crisis. Additionally, the Russian-Ukrainian war has resulted in soaring fossil fuel prices and disruptions in energy supply chains, underscoring the need for renewable energy in ensuring energy security. In response, countries are actively promoting the social acceptance and safety of solar power generation facilities while striving to optimize policy decisions and business operations at a national level.

This research employs the DEA(Data Envelopment Analysis) using regional energy resource support systems and meteorological data to analyze the efficiency of photovoltaic power generation facilities in twelve prominent cities and provinces in the Youngnam and Honam Regions including Daegu, Busan, and Gwangju. The study findings reveal several key insights. Firstly, variations in the geographical scope within a region lead to differences in the evaluation of generation efficiency. The analysis also examines factors that influence annual power generation and operational revenue. Secondly, the study emphasizes the significance of optimal geospatial information systems for solar power facilities, considering both economic and environmental perspectives. Lastly, to enhance the operation of domestic energy generation facilities at a macro level, the study suggests that improving locational conditions can enhance the economic viability and feasibility of energy investment projects, offering valuable insights for domestic energy policies.

Key Words : Photovoltaic Power Generation, DEA(Data Envelopment Analysis), Efficiency Analysis, Location Condition Analysis

I. 서론

최근 세계 각지에서 나타나는 기록적인 폭우와 강력한 폭염 등의 자연재해는 전 세계적으로 급격한 기후변화의 심각성을 인식시켰다. 2015년 제21차 유엔기후변화 협약 당사국총회(COP21)에서 2020년부터 모든 국가가 참여하는 신기후 체제의 근간이 될 파리협정이 채택되었다. 이 협정을 통해 기존 선진국에만 온실가스 감축 의무를 부과하던 교토의정서 체제를 넘어 자국의 상황을 반영해 모든 국가가 자발적으로 참여하는 보편적인 체제가 마련되었다. 탄소중립을 향한 세계 각국의 정책에 재생에너지 비중 확대를 통한 탈탄소화 달성이 주요 내용으로 포함되어 있고, 유럽을 포함한 주요국들이 공격적인 에너지 전환 목표를 설정하는 추세이며, 재생에너지 보급이 에너지 안보의 수단으로 주목받는 계기가 되었다. 최근 러시아·우크라이나 전쟁으로 화석연료 가격 급등 및 에너지 공급망 문제가 발생하면서 에너지 수급의 문제가 확연히 도출되었으며 특히 유럽 국가들을 중심으로 대외 에너지 의존도를 낮추고 에너지 안보를 확보하는 차원에서 재생에너지 보급 목표를 상향 조정하는 추세로 돌아서고 있다. 국내 에너지정책 또한 국제 정세에 의해 재생에너지 확대를 위한 의지가 높아지는 상황이며, 최근의 추세를 반영하여 실효성 있는 재생에너지 보급제도에 대해 시의성 있는 정책 논의가 본격적으로 진행되고 있다(에너지경제연구원, 2022).

국내 탄소 중립 정책은 글로벌 탈탄소 전환에 능동적으로 대응하기 위해 관계부처 합동으로 '2050 탄소중립 추진전략'을 마련하고 2030 온실가스 감축 목표 달성을 위한 전환, 산업, 건물 등 10대 부문의 37개 정책과제를 제시하여 원자력과 신재생에너지의 합리적 조화를 통해 공급과 수요를 종합적으로 관리하고, 저탄소 신기술 기반 에너지를 생산하고자 정책 기반을 확대하였다(산업통상자원부, 2020).

해외 신재생 에너지정책 변화를 조사하면 국가별 보급 편차가 큰 태양광, 풍력 등 기상 자원의 재생에너지 체제로 급속히 재편 중이다. 특히 학계(실용 연구)와 정부(전략사업 육성, 투자유치 및 사업관리)를 중심으로 태양광 발전의 연구와 조사가 우선순위로 진행 중이며, 국가 차원에서 대규모 태양광발전소를 설치하고 있다. 국내 역시 태양광 발전사업을 추진하고자 한다면 필요한 종합정보(지역별 태양광 발전량, REC 거래량, 기상정보, 토지정보, 인구정보 등)를 검토하고 사업 타당성을 확인 후 최적의 입지 조건을 통해 공공기관과 민간기업이 전국적으로 다양한 산업단지 태양광발전 사업모델을 개발하고 사업을 활성화할 수 있어야 한다. 부적절한 위치에 발전소를 설치하면 에너지와 자원의 낭비를 초래하고 지역사회의 이미지와 신뢰성에 후속적인 불신을 초래하여 악영향으로 변질할 수 있다. 무한정·

무공해의 태양광에너지를 전기에너지로 직접 변환하여, 생산된 전기를 판매하는 사업 구조를 실현하기 위해서라면, 신뢰성 있는 태양광발전소 설치 시 중앙정부 승인 절차의 지연을 방지하기 위해 예비적이고 주요한 단계가 필요하다(Choudhary and Shankar, 2012).

기존 연구는 태양광 발전 고효율을 위한 연구 기반을 초점으로 치우쳐 있으나, 다양한 유형의 기상분석 매개체를 활용한 태양광 발전 실증단지 조성의 경제성, 기술성, 시장성, 위험 분석에 따른 연구는 거의 없는 실정이다. 발전소 구축은 국가산업정책과 맞물려 있는 전략적 구조를 고려한다면 신재생에너지 대책에 따른 영향성 평가 및 안정도 향상 방안에 관한 연구가 필수적이다. 주요 해외시장에서는 에너지정책 및 경제성에 있어 반드시 기상분석을 매개체로 통계분석에 기반을 둔 경제성 분석 결과를 바탕으로 상황별 사업 타당성이 제시된다. 본 연구에서는 영호남에 구축된 에너지 설비의 지리 조건과 지역별 인구밀도를 검토하였다. 또한 기상청에서 제공하는 영호남 12개의 시/군에 대한 연간발전량과 지리적 조건 데이터를 분석하였다. 발전소 구축의 최적 입지는 투입과 산출 요소의 상호관계를 고려하여 영호남 발전시설의 연간발전량 분석결과를 성과지표로 참고하여 선정되어야 한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제1장은 서론으로 연구 배경 및 필요성에 대해 서술하였다. 제2장은 에너지 분야의 이론적 배경과 선행연구를 고찰하였다. 제3장은 태양광 발전의 지리적 입지 효율성을 도출하고자 데이터 분석 및 수집 결과를 서술하였다. 제4장에서는 효율성 분석에 의한 결과 데이터를 분석하고 지리적 입지조건을 검토하였다. 제5장은 본 연구의 결론으로 연구내용을 요약하고 연구의 시사점 및 한계점에 대하여 정리하였다.

II. 이론적 배경 및 선행 연구

1. 태양광산업 및 지리적 분포

2021년 탄소 중립이라는 대전환 시대를 맞이하여 정부는 2050 탄소중립 달성을 목표로 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)의 에너지 분야 중장기 비전과 정책과제를 수립하였다. 탄소중립 실현을 위해 청정에너지 전환 가속화, 에너지전환 촉진 기반 구축, 신성장동력 창출 지원, 원활한 탄소 중립 이행체계 강화의 4대 전략과 14대 추진과제를 통해 재생에너지의 획기적 확대(2050년까지 70.8%)와 에너지 효율 선진화 등의 목표를 제시하였다. 산업통상자원부는 태양광 보급 확대를 위해 범부처의 입지, 인허가 애로 해결 지원체계를 구축하고, 수용성이 확보된 신규 입지 발굴을 추진 중이다. 국내 신재생에너지 설치 증가로 계통 변동성이 확대되었고 정부는 「2021년 분산 에너지 활성화 추진전략」을 수립하였다. 주요 정책과제는 전력망 인프라를 확충하고 전력 변동성을 극복하기 위해 전력망 통합관리시스템을 구축 및 운영 계획을 세우고 있다.

2020년 이후 산업통상자원부와 전력거래소는 분산에너지 특성을 고려한 전력시장 개편과 시장참여 유도를 목적으로 신재생에너지 발전량 예측 및 입찰제도를 도입하였다. 계획된 발전량을 제출하고, 이를 이행했을 경우 전력 계통안정 편익을 현금으로 돌려주는 인센티브 정책도 시행 중이다.

최근 4차 산업혁명 등장으로 세계 각지 기상관측 및 발전량 예측 기술의 중요성이 높아졌으며, 국내 기상청은 최근 「미래 기상 업무변화 대응 인공지능 활용전략」을 기획하였다. 선진화된 기상분석 결과에 통계적 유의성이 높은 기술을 도입하여 기상 예측의 정확도를 기대할 수 있다. 기상정보는 단순한 일기예보를 넘어 농업, 건설업, 유통업, 에너지 분야와 융합되어 수익과 관련된 많은 서비스를 제공하고 있다. 에너지정책은 기상 정보를 담고 있어 발전량의 상한과 하한이 명확하게 존재하고 있으며, 발전량에 고려되는 모든 당위성을 만족하는 변수 값을 사용하면 비정상적 시계열에서 쓰이는 여러 가지 기법들을 사용하지 않고도 유의한 결과를 도출할 수 있다. 태양광 발전은 특히 기상변수에 많은 영향을 미치고 있어(김백천 외, 2021; 허재 외, 2019) 연간발전량의 변수 값을 고려하여 시간당 발전량을 파악할 수 있는 자료 변환 방법이 필요하다(고재경 외, 2016; 김진철 외, 2018). 즉 지역 내 에너지 사업의 관심도와 참여도를 높이기 위해서는 국제적으로 표준을 제시할 수 있는 신뢰성 있는 데이터가 필요하며 태양광발전소의 경제적 가치를 추정하기 위해서는

신뢰성 평가 및 실증단지 분석 등 국내 표준화 구축이 필요하다. 그러나 국내 선행연구를 검토해본 결과 우리나라 기상과 지형분석이 태양광 발전에 어느 정도의 영향을 미치는지에 대한 연구가 부족한 것으로 확인되었다.

신재생에너지 사업은 정부 주도의 에너지산업 육성 정책을 기조로 개방화, 정부의 강력한 리더십, 시장경제 체제에 입각한 산업구도의 확립 등의 에너지산업 육성을 추진해 왔다. 그러나 국내 자본시장의 취약함과 기술의 후진성, 이에 따른 민간 부문의 자본과 기술 동원 능력의 부족 등의 이유로 정부를 중심으로 운영되었다. 향후에는 에너지산업의 구조 개편이 진행되고 기술수준도 향상되면서 민간 주도의 에너지 설비 증설 및 투자가 활성화될 것이다.

발전소 구축 시 태양에너지에 의존하는 특성상 효율적인 생산을 위한 입지 분석 선정과 기상 조건(기온, 전운양, 일사량 등) 및 대기조건(먼지 등)에 의해 발전량의 변동이 상황에 따라 달라질 수 있다. 또한 높은 초기 설치비는 태양광 발전사업의 효율성을 저하되는 요인으로 투자 비용을 고려한 체계적인 입지 조건 선정이 중요하다. 대한민국 국토 면적은 협소한 토지 평야 지대에 비해 63%의 높은 임야 비율을 가지고 있어 국내 발전소 설립에 있어 실제적인 토지 조건이 매우 까다롭게 형성되어 경제성을 객관적이고 합리적인 기준으로 평가할 필요가 있다.

본 연구는 영호남 시/군 단위의 12개 지역, 48개 태양광 발전시설의 기후요인과 지리적 입지 조건 분석으로 발전효율을 비교·분석하였다. 호남지역은 2022년까지 누적 태양광발전소 46,909개로 전국 태양광발전소의 38.3%를 차지하고 영남지역은 28,324개로 23.1%를 차지하여 전국 지역 태양광발전소의 61.4%가 영호남 지역에 집중되어 있다. (<표 1> 참고)

넓은 평야와 농경지가 특징인 호남권은 태양광 모듈 배치에 더 많은 기회를 제공하며, 농업과 양식업에 종사하는 농촌 지역사회의 에너지 수요 충족을 우선시할 수 있다. 비교군의 영남권은 산간 지형에 의해 태양광 모듈 설치 및 배치에 관한 제약을 받을 수 있으나, 공장 및 대규모 상업 시설의 전력 수요가 높은 산업 지역이므로 상업 및 산업용 전력 생산을 위한 태양광 발전에 집중할 수 있다. 발전량 예측량과 실제 발전량을 비교·분석하여 기상 조건이 발전효율에 영향을 미치는 경제성 평가 연구를 이해하는 것은 지리적, 기술적 잠재량의 비율을 효과적으로 적용하여 지역별 신재생에너지 사업성 분석에 기초적인 자료로 제시될 수 있을 것이다.

<표 1> 지역별 태양광발전소 설치현황

구 분	2019년까지 설치발전소 개소	2020년까지 설치발전소 개소	2021년까지 설치발전소 개소	2022년까지 설치발전소 개소	누적발전소 개소 (2022년까지)
서울특별시	372	53	59	28	512
부산광역시	311	102	92	141	646
대구광역시	378	156	204	196	934
인천광역시	440	117	60	73	690
광주광역시	884	197	220	181	1,482
대전광역시	264	76	85	62	487
울산광역시	181	94	88	90	453
세종특별자치시	221	55	56	72	404
경기도	4,606	1,717	1,780	1,734	9,837
강원도	3,592	1,561	1,639	1,248	8,040
충청북도	3,655	2,028	1,844	1,681	9,208
충청남도	6,360	3,491	3,992	2,668	16,511
전라북도	12,499	5,851	5,164	3,935	27,449
전라남도	8,204	3,757	3,279	2,738	17,978
경상북도	5,577	3,042	4,961	4,084	17,664
경상남도	3,549	1,554	1,699	1,825	8,627
제주특별자치도	831	302	360	102	1,595

출처 : 재생에너지 클라우드플랫폼 (검색일 : 2023-06-01)

* 설비확인이 2022년12월까지 완료된 발전소 대상 계산된 통계

** RPS사업 태양광 발전소 기준자료(연도 구분은 설치확인 일자 기준)

2. DEA(Data Envelope Analysis) 분석

DEA 모형(자료포락분석)은 연구목적 및 자료 특성에 따라 규모에 대한 수익 불변(CRS)을 가정하는 CCR 모형(Charnes et al., 1985)과 규모에 대한 수익가변(VRS)을 다루는 BBC 모형(Banker et al., 1984)이 대표적으로 적용한다. DEA 모형은 효율성 투입 관점(산출에 대한 투입 최소화) 및 산출관점(투입에 대한 산출 극대화)에서 측정하고, 기술적인 요인에 의한 것인지, 아니면 규모에 의한 것인지를 효율성 점수에 따라 DMU의 효율성을 판단할 수 있다.

2.1 CCR 모형

Charnes et al.(1978)은 기술적 효율성 측정 방법을 CCR 모형이라고 불리는 DEA 기본 모형을 제시했다. DMU들의 효율성을 1 이상 초과하지 않도록 하며 각각 투입 요소와 산출물에 부과된 가중치로서 의사 결정변수 결정을 위해 가중치가 0보다 크다는 제약조건을 포함한다. 효율성을 최대화하는 요소별 가중치를 구하는 방법으로 아래의 식과 같은 모형을 갖는다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & E_k = \frac{\sum_{r=1}^s y_{kr} u_{kr}}{\sum_{i=1}^m x_{ki} v_{ki}} \\ \text{Subject to} \quad & E_{kj} = \frac{\sum_{r=1}^s y_{jr} u_{kr}}{\sum_{i=1}^m x_{jr} v_{ki}} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

$$u_{kr} \geq 0, r=1, 2, \dots, s$$

$$v_{ki} \geq 0, i=1, 2, \dots, m$$

where,

E_k : k번째 DMU의 효율성, s : 산출물의 수, m : 투입요소의 수,

y_{kr} : k번째 DMU의 r번째 산출물의 산출량,

x_{ki} : k번째 DMU의 i번째 투입요소 사용량,

u_{kr} : k번째 DMU의 r번째 산출물 가중치,

v_{ki} : k번째 DMU의 i번째 투입요소 가중치

2.2 BCC 모형

CCR 모형은 규모에 대한 수익 불변을 가정하므로 순수한 기술적 효율성과 규모의 효율성을 명확히 구분하지 못하는 한계를 갖고 있다. Banker et al. (1984)는 규모에 따른 수익 가변(VRS)을 가정하고 규모의 효율성과 순수한 기술적 효율성을 구분하여 아래의 식과 같이 측정/분석을 할 수 있는 BCC 모형을 개발하였다.

$$\text{Maximize} \quad E_k = \sum_{r=1}^s y_{kr} u_{kr} - U_0$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^m x_{ki} u_{ki} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s y_{kr} u_{kr} - \sum_{i=1}^m x_{ki} u_{ki} - U \leq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

$$u_{kr} \geq 0, r=1, 2, \dots, s$$

$$v_{ki} \geq 0, i=1, 2, \dots, m$$

where, U_0 : 규모에 대한 보수

3. 에너지 분야 DEA 분석 선행연구

발전효율 연구의 일반적인 모형은 주로 전문가의 주관적 판단에 의존하는 반면 DEA 모형은 실제 데이터와 통계 기반의 발전량 추정변수를 사용하여 에너지 투자사업의 신뢰성 있는 경제성 평가 결과를 도출할 수 있다(Yang et al., 2020). 발전소의 경제성 평가에 있어 신뢰성을 점검하고 확보할 수 있는 환경을 조성하는 노력이 필요하다. 부지확보에 따른 발전량 차이가 발생하므로 문제를 해결할 입지조건을 탐색하고 전략적인 발전효율 연구가 필요하다(허재 외, 2019). 신재생에너지 분야의 효율성 분석에 관한 선행연구를 정리하여 <표 2>에 나타내었다.

<표 2> 신재생에너지 분야 효율성분석 선행연구 정리

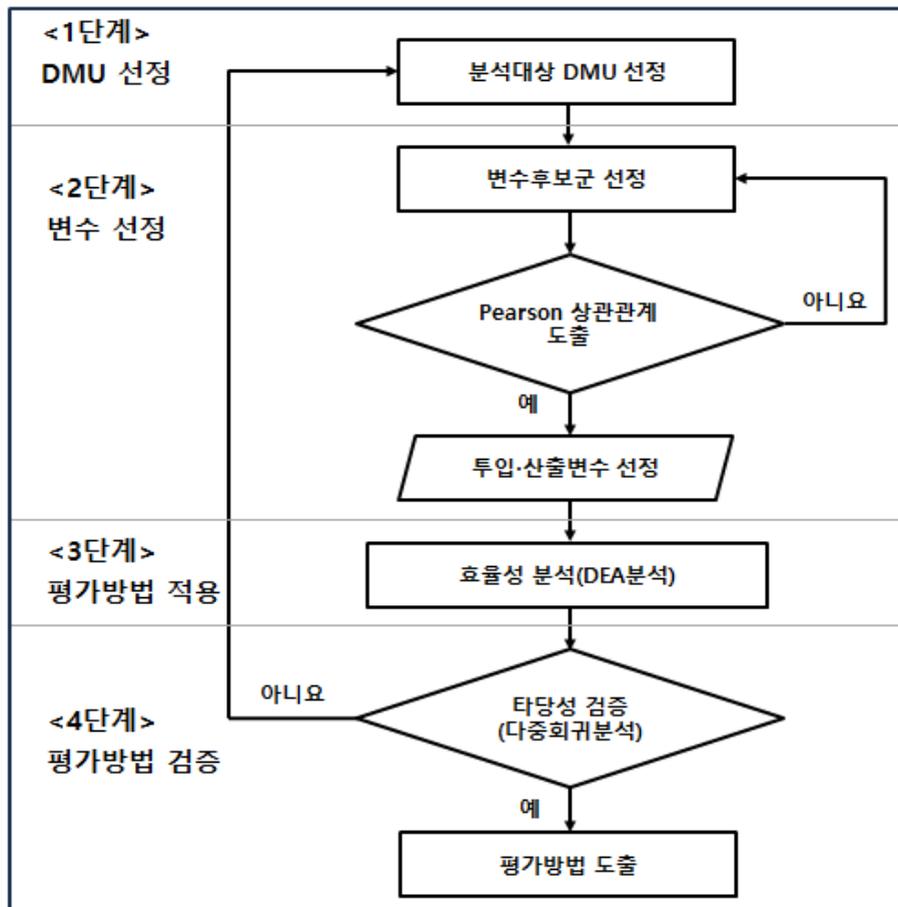
연구자	연구주제	투입변수	산출변수
정성문 (2014)	DEA모형을 활용한 국내 태양광발전소의 효율성평가연구	총사업비, 건설단가, 발전소면적, 발전용량, 일조량, 유지비, 건설기간	발전량, 발전차액지원금, 순이익
양일승 외 (2018)	효율성 측면에서 태양광 에너지 시설 최적입지에 관한 연구	대지면적, 방향, 평균풍속, 용도지역, 입지특성	발전시간
허재 외 (2019)	태양광발전소건설부지평가 및 선정을 위한 선형회귀분석기반 태양광발전량추정모델	강수량, 미세먼지, 습도, 온도, 운량, 일조시간, 풍속	발전효율
Yang et al. (2020)	FAHP-DEA모형기반의 중국의 지역적 차별성을 고려한 태양광발전소 효율성측정 및 요소분석	자산투자액, R&D, 일사량, 보조금, 종업원수	설치용량, 발전량
Mariano et al. (2021)	DEA 모형을 활용한 대만 태양광발전소 성능 평가	모듈수, 주변온도, 모듈 표면적, 발전용량, 일사량	발전량
Wang et al. (2022)	ESM모델을 이용한 태양광 발전소 운영 효율성 측정	건설비, 설치용량, 일사량	에너지생산량, 소비밀도

에너지시장 구조의 변화는 보급사업 지원으로 설치기준의 변화를 줄 수 있는 통계 데이터가 필요하다. 본 연구는 태양광발전소의 투입과 산출 요소 간의 상호관계에 대한 분석을 통해 효율성을 평가하는 DEA 모형을 활용한 평가 방법을 제시하고자 한다(Mousavi-Avval et al., 2011; Sueyoshi and Goto, 2017; Chachuli et al., 2020;).

Ⅲ. 연구모형

1. 효율성 도출 프로세스

본 연구는 국내 탄소 중립 정책 기반의 신재생에너지 사업 중점지역인 영호남 지역 중 기상청이 보유한 12개 시/군 단위 지역을 선별하고 주기적으로 유지보수가 진행되는 48개의 태양광 발전시설로 세분화하여, 태양광 발전시설의 효율성을 평가하였다. DEA 모형 연구 흐름도는 <그림 1>와 같다.



<그림 1> 효율성 도출 프로세스

발전시설의 효율성을 평가하기 위해 투입변수와 산출변수 후보를 선정하였고, 변수 간의 관련성을 위해 피어슨(Pearson) 상관관계를 도출하여 유의 값을 제외한 투입변수와 산출변수를 재선정하였다.

2. 조사방법

설계방식에 따라 태양광 발전효율이 달라진다는 가정 하에 동일 기자재(모듈, 인버터)로 사용한 발전소를 선별하였다. 기상청에서 제공하는 데이터는 전 일사량 데이터만 포함하고 직달 일사량 및 방사 일사량의 데이터는 누락되어 분석에 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 Meteonorm 7.1 소프트웨어를 사용하였다. Meteonorm는 발전량 예측 상용 프로그램으로, NASA와 Meteonorm의 해외 기상정보를 활용한 발전량 예측 값과 국내 기상청 정보를 활용한 발전량 예측 값을 비교할 수 있으므로(김진철 외, 2018) 한국전력거래소의 실제 발전량 계량 값과의 비교 분석을 통해 태양광발전소 구축비의 적정성을 확보할 수 있는 주요 프로그램이다. 총건설비는 건축물 등 기존 시설물을 이용하지 않는 경우(공급인증서 가중치 1.0/100kW 이상, 1.2/100kW 미만)와 건축물 등 기존 시설물의 경우(공급인증서 가중치 1.5)로 구분하여 시공단가를 산정하였다.

연간발전량은 각 해당 지역의 연간 평균 일사량 대비 해당 설비시설의 연간발전량을 환산된 지표로 적용하였으며 운영수익은 신재생에너지 공급의무화제도(RPS)를 기준으로 하여 가중치를 적용하여 산출하였다(한국에너지관리공단, 2022). 태양광에너지 가중치는 아래 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 태양광에너지 가중치

공급인증서 가중치	설 치 유 형	지목유형	용량기준
0.7	건축물 등 기존시설물을 이용하지 않는 경우	5개 지목 (전, 답, 과수원, 목장용지, 임야)	
1.0		기타 23개 지목	100kW 이상
1.2			100kW 미만
1.5	건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우 유지의 수면에 부유하여 설치하는 경우		

출처: 한국에너지공단

3. 분석변수 선정

각 태양광 발전시설의 설계를 기반으로 모듈 및 발전소 용량을 수집했으며, 주변 온도는 각 발전시설의 인접한 기상청에서 수집했다. 최적의 입지를 선정하고자 선행연구(정선문, 2014; Mariano et al., 202; Yang et al., 2020; Wang et al., 2022)를 참고하여 투입·산출변수 후보군을 선정하였고 <표 4>의 평가에 사용된 입출력 지표에 대한 설명은 다음과 같다.

<표 4> 투입·산출변수 후보군 설명

구 분	변수후보군		개 념
투입변수	I1	모듈표면적(m ²)	태양광발전시설의 모듈의 총 면적
	I2	모듈수량(장)	설치된 태양광 모듈의 총 수량
	I3	총건설비(원)	태양광발전시설을 설치하기 위해 필요한 모든 비용(부지 비용 제외)
	I4	대기온도(°C)	태양광발전시설 주변의 연평균 온도
	I5	인구밀도(km ²)	지역의 인구를 그 지역의 면적으로 나눈 값
	I6	일사량(kWh/m ²)	1m ² 에 1분 동안 복사되는 태양 에너지양
	I7	발전용량(kW)	태양광발전시설에 설치된 총 전력용량
산출변수	O1	연간발전량(kWh)	태양광 발전 시스템이 일정 시간 동안 생산한 전기의 양
	O2	운영수익(원)	태양광 발전 시스템으로부터 발생한 전력을 판매하여 얻는 수익

출처: 지식경제부 기술표준원(2010년판), 한국에너지기술연구원

투입변수는 모듈 표면적, 모듈 수량, 총건설비, 대기 온도, 모듈 온도, 일사량, 발전 용량으로 적용하였으며, 태양광 발전시설의 효율성에 영향을 미칠 것으로 판단되는 대상 시설의 연간발전량과 운영수익을 산출변수로 선정하여 평가하였다.

DEA 모형을 분석하려면 선택한 투입 및 산출변수가 상관관계를 가져야 한다. 피어슨(Pearson) 상관 분석은 각 DMU 투입과 산출 간의 상관관계를 확인하기 위해서 사용되며 계수 변수가 음수이면 투입변수와 산출변수를 변경해야 한다. <표 5>에 제시된 투입·산출변수의 Pearson 상관관계 분석결과는 영호남 태양광 발전시설의 투입 및 산출 지표가 양수 값과 음수 값이 공존함을 보여주며, 일부 데이터 지표가 DEA 모형을 사용하여 실행할 수 없음을 나타낸다.

<표 5> 투입·산출변수의 Pearson 상관관계 분석

구분	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	O1	O2
I1	1								
I2	1.000**	1							
I3	0.996**	0.996**	1						
I4	0.101	0.101	0.093	1					
I5	0.015	0.015	0.024	0.100	1				
I6	-0.021	-0.021	-0.036	0.160	0.259	1			
I7	1.000**	1.000**	0.996**	0.101	0.015	-0.021	1		
O1	0.994**	0.994**	0.994**	0.091	0.021	-0.039	0.994**	1	
O2	0.991**	0.991**	0.982**	0.099	-0.003	0.068	0.991**	0.996**	1

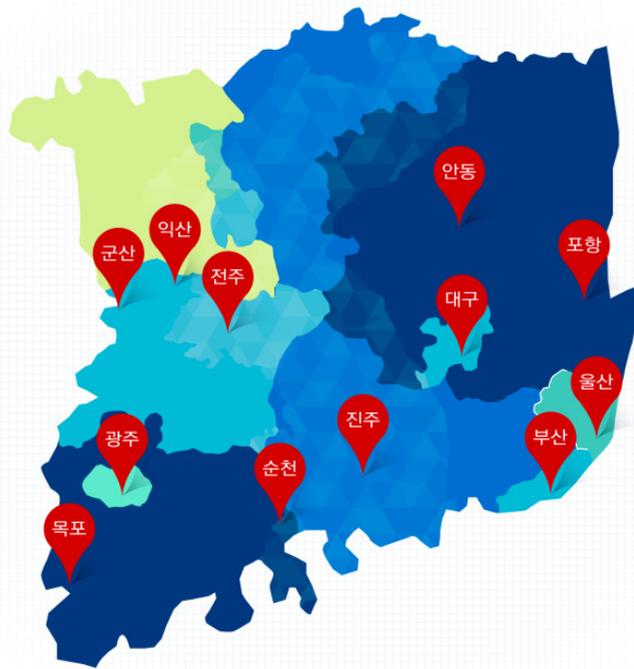
주석 : **p<0.01

산출변수(O1, O2)와 낮은 상관관계를 보이는 일사량(I6)에 비해 투입변수 모듈 수량은 다른 변수들과 강한 상관관계를 있는 것으로 확인할 수 있었다. 또한 투입변수에서 음수의 값을 가지거나 낮은 상관계수를 가지는 변수를 제외하고 <표 6>과 같이 최종 투입변수와 산출변수를 선정하였다(Mariano et al., 2021).

<표 6> 최종 투입·산출변수 선정결과

구분	최종변수군
투입변수	모듈표면적(I1), 모듈수량(I2), 총건설비(I3), 대기온도(I4), 인구밀도(I5), 발전용량(I7)
산출변수	연간발전량(O1), 운영수익(O2)

<그림 2>는 영호남 시/군 단위의 12개 지역의 태양광 발전시설 위치로 위도상의 위치와 내륙지방/해안지방, 도심지역/농경지역의 분포 등 입지적 조건이 유사한 영호남 지역 중 경상북도(대구광역시(A), 안동시(B), 포항시(C)), 경상남도(부산광역시(D), 울산광역시(E), 진주시(F)), 전라북도(군산시(G), 전주시(H), 익산시(I)), 전라남도(광주광역시(J), 목포시(K), 순천시(L))에서 선별된 지역별 태양광 발전시설의 DMU 데이터를 수집하였다.



<그림 2> 영호남 시/군 단위의 12개 지역 태양광 발전시설 위치

부적합한 장소에 태양광 발전시설을 구축하면 지역사회의 문제가 될 수 있으므로(Wang et al., 2021; Dahooie et al., 2022) 구체적이며 효과적인 DMU 선정은 적절한 입지 영향 분석을 위해 필요하다. 영호남 지역의 태양광 발전시설을 독립된 DMU로 처리하였다. 영호남 태양광 발전시설 위치정보의 위·경도 정보를 아래 <표 7>에 나타내었다.

<표 7> 영호남 태양광발전시설 위치정보

DMU	분류	위치	위도	경도	비 고		
A	영남권 (경북)	대구광역시	35.872	128.602	A1	도시(산업단지)	
					A2	도시(산업단지)	
					A3	도시(건물)	
					A4	도시(산업단지)	
B		안동시	36.568	128.729	B1	농림(산지)	
					B2	농림(평야)	
					B3	농림(산지)	
					B4	농림(산지)	
C		포항시	35.825	129.341	C1	도시(산업단지)	
					C2	도시(산업단지)	
					C3	도시(산업단지)	
					C4	도시(산업단지)	
D	영남권 (경남)	부산광역시	35.179	129.075	D1	도시/바다(평야)	
					D2	도시/바다(평야)	
					D3	도시(건물)	
					D4	도시(건물)	
E		울산광역시	35.538	129.311	E1	도시(산업단지)	
					E2	도시(산업단지)	
					E3	도시(산업단지)	
					E4	도시(산업단지)	
F		호남권 (전북)	진주시	35.180	128.107	F1	농림(산지)
						F2	농림(평야)
						F3	농림(산지)
						F4	농림(평야)
G	군산시		35.968	126.737	G1	농림(평야)	
					G2	농림(산지)	
					G3	농림(산지)	
					G4	농림(산지)	
H	전주시		35.825	35.825	H1	농림(평야)	
					H2	농림(산지)	
					H3	농림(평야)	
					H4	농림(평야)	
I	익산시	35.948	126.957	I1	농림(평야)		
				I2	농림(평야)		
				I3	농림(평야)		
				I4	농림(평야)		

DMU	분류	위치	위도	경도	비 고	
J		광주광역시	35.159	126.853	J1	도시(건물)
					J2	도시(평야)
					J3	도시(평야)
					J4	도시(건물)
K	호남권 (전남)	목포시	34.811	126.392	K1	농림/바다(평야)
					K2	농림/바다(평야)
					K3	농림/바다(평야)
					K4	농림/바다(평야)
L		순천시	34.955	127.490	L1	농림(평야)
					L2	농림(평야)
					L3	농림(평야)
					L4	농림(평야)

IV. 분석 결과

1. 기술통계 데이터

본 연구에서는 국내에서 제작된 (주)갈렙에이비씨의 B-BOX 소프트웨어를 사용하여 48개의 태양광 발전시설에서 평가한 결과를 분석하고 논의하였다. DEA 모형은 2022년 한 해 동안 운영된 태양광 발전소의 투입 및 출력 지표로 연간 생성된 발전량과 운영수익금으로 성능 효율성과 순위를 평가하였다.

투입변수는 기술적 요소와 환경적 요소를 고려하여 모듈표면적, 모듈수량, 총건설비, 대기온도, 인구밀도, 발전용량 등을 사용하고, 산출변수는 연간발전량과 운영수익금으로 정의하였다.

태양광 발전시설의 누적 설치현황을 살펴보면 지역 일조량 현황 분석을 바탕으로 수익여부가 판단된다. 효율성분석을 위해 선정된 DMU의 전체적인 기술통계 현황은 모듈 표면적 평균 812.2㎡, 모듈수량 평균 481.5장, 대기온도 평균 21.1℃, 총건설비 평균 200,872,420원, 발전용량 평균 144.5kW, 연간발전량 평균 208,652.5kWh, 수익금 평균 37,931,157원이다. 투입·산출변수의 기초 통계량을 아래 <표 8>에 정리하였다.

<표 8> 투입·산출변수의 기초통계량

구 분		평균	표준편차	최소값	최대값
투입 변수	모듈표면적(㎡)	812.2	746.6	157.9	4,469.2
	모듈수량(장)	481.5	422.6	94	2,650
	총건설비(만원)	200,872,420	174,284,360	35,380,800	1,001,548,800
	대기온도(℃)	21.1	0.7	20.0	22.8
	인구밀도	1,737.5	1,538.6	103.1	4,278.0
	발전용량(kW)	144.5	132.8	28.1	794.9
산출 변수	연간발전량(kWh)	208,652.5	197,891.6	42,385.7	1,112,087.8
	운영수익(만원)	37,931,157	35,647,566	8,388,151	220,082,731

2. 분석결과

영호남 시/군 단위의 12개 지역 중 주기적으로 유지보수가 진행되는 48개 지역의 태양광 발전시설의 효율성 평가 결과를 아래 <표 9>에 나타내었다. 총효율성을 평가하는 CCR분석의 경우, 총효율성 점수의 평균이 0.75로 확인되며, 전체의 6% 정도인 3개의 DMU가 1로 나타났다(DMU D2, I2, I3). 분포를 살펴보면 1 미만 0.9 이상 1개, 0.9 미만 0.8 이상 7개, 0.8 미만 0.7 이상 21개, 0.7 미만 0.6 이상 12개, 0.6 미만 0.5 이상 4개로 확인 할 수 있다. CCR 값이 1에 가까울수록 높은 효율성을 나타낸다. 기술적 요소와 환경적 요소를 고려하면 모듈표면적, 모듈 수, 총건설비, 대기온도, 발전용량 등 투입변수를 연간발전량과 운영수익 등의 산출이 효율적으로 전환하고 있음을 알 수 있었다.

순수기술 효율성을 평가하는 BCC분석의 경우, 전체 평균이 0.96이고, 전체 DMU 중 8개(16.7%, DMU A4, D1, D2, G4, I2, I3, I4, L1)가 기술적으로 매우 효율적임을 확인되었다. 영남권에 비해 호남권의 태양광 발전시설이 순수기술 효율성의 평균값이 더 높은 것을 확인할 수 있었다. BCC분석은 CCR분석에서 규모의 효과를 배제한 값으로, 일반적으로 순수기술 효율성(Pure Technical Efficiency) 또는 분배적 효율성(Allocative Efficiency)으로 부른다. 어떤 DMU의 기술적 효율성은 이미 완전하게 달성되고 있다는 가정 하에, 특정 산출 수준과 일련의 투입 가격에서 생산비용을 최소화할 수 있도록 투입의 결정 여부를 확인할 수 있다. 영남권에 비해 호남권의 순수기술 효율성이 높은 것으로 확인되었으며, DMU의 결과 값을 최소화하는 비율로 투입하여 분배적 효율성과 연관이 있는 것으로 확인되었다. 총효율성 분석 시 비효율적으로 나타난 DMU가 기술적 비효율성에 의한 것인지, 아니면 규모의 비효율성으로 인한 것인지를 여부를 판단하기 위해 CCR 및 BCC 분석을 통해 규모의 효율성을 추정할 수 있다. CCR 분석에서 얻어지는 총효율성의 점수를 BCC 분석에서 도출되는 순수기술 효율성으로 나누어 추정할 수 있다(Banker et al., 1978).

<표 9> DMU의 효율성평가 결과

DMU	CCR	BCC	SE	DMU	CCR	BCC	SE
A1	0.66	0.88	0.75	G1	0.86	0.90	0.96
A2	0.71	0.91	0.78	G2	0.68	0.99	0.69
A3	0.76	0.91	0.84	G3	0.59	0.99	0.60
A4	0.57	1	0.57	G4	0.66	1	0.66
B1	0.65	0.96	0.68	H1	0.74	0.99	0.75
B2	0.78	0.96	0.81	H2	0.69	0.94	0.73
B3	0.61	0.96	0.64	H3	0.77	0.94	0.82
B4	0.65	0.96	0.68	H4	0.78	0.94	0.83
C1	0.63	0.96	0.66	I1	0.84	0.94	0.89
C2	0.72	0.94	0.77	I2	1	1	1
C3	0.59	0.93	0.63	I3	1	1	1
C4	0.58	0.93	0.62	I4	0.99	1	0.99
D1	0.72	1	0.72	J1	0.72	0.92	0.78
D2	1	1	1	J2	0.89	0.93	0.96
D3	0.88	0.96	0.92	J3	0.74	0.92	0.80
D4	0.81	0.98	0.83	J4	0.70	0.92	0.76
E1	0.70	0.98	0.71	K1	0.84	0.99	0.85
E2	0.73	0.98	0.74	K2	0.74	0.98	0.76
E3	0.77	0.98	0.79	K3	0.83	0.99	0.84
E4	0.75	0.98	0.77	K4	0.82	0.99	0.83
F1	0.69	0.96	0.72	L1	0.75	1	0.75
F2	0.81	0.96	0.84	L2	0.77	0.97	0.79
F3	0.70	0.96	0.73	L3	0.75	0.98	0.77
F4	0.81	0.98	0.83	L4	0.76	0.97	0.78
평균	0.75	0.96	0.78	표준편차	0.11	0.03	0.11
최소값	0.57	0.88	0.57	최대값	1	1	1

<표 9>의 DMU의 효율성평가 결과에 따라 총효율성의 평균값은 약 0.75로 효율성이 1보다 작은 비효율적인 발전소는 효율적인 발전소와 비교하여 평균적으로 약 25%의 비효율성이 존재하는 것을 알 수 있었다. 동일한 산출물을 가정할 때 투입변수의 약 75%가 효율성이 있음을 의미하는데, 국내 태양광 발전시설의 효율성이 높은 수준에 머무르는 것으로 확인되었다. 규모 요인을 제거한 순수기술 효율성은 평균값이 약 96%로 확인되었다. 이는 기술적 비효율성 25% 중에서 규모 요인보다는 관리상의 효율성에 기인하고 있는 것을 의미할 수 있다.

총효율성과 순수기술 효율성의 값이 모두 1일 때 해당 발전시설이 효율적인 것으로 판단되며, 총효율성은 1개의 발전시설이 에너지 효율을 달성했다고 볼 수 있다. 그러나 발전소 규모를 고려하지 않은 순수기술 효율 측면에서는 8개의 발전시설이 효율적인 것으로 확인되었다. 순수기술 효율성 측면에서는 효율적이지만 총효율성 측면에서는 그렇지 않은 발전설비는 관리상의 비효율성보다는 투입변수의 규모가 부적절하기 때문임을 알 수 있다. 규모 효율성을 살펴보면 3개의 발전설비가 총효율성과 순수기술 효율성이 일치하는 규모에 대한 지속적인 수익이 있는 상태에 있다. 이는 모든 입력 변수가 동시에 증가하면 출력 변수가 비례하여 증가한다는 것을 나타낸다(진경미 외, 2012; Krmac et al., 2022).

발전효율이 높은 지역은 섬, 바다 근처 지역의 부산광역시(D1, D2), 목포시(K1, K3, K4) 등의 순수기술 효율성 값이 모두 1로 확인되었다. 태양광 일조량 누적 데이터(기상청 기상자료개방포털, data.kma.go.kr)를 확인하면 대한민국 1일 평균 일사량은 3.6시간이다. 대체적으로 북쪽지방은 낮은 편이고 남쪽지방은 높은 편이다. 발전효율이 높은 지역의 입지 조건을 분석하면 일조량이 풍부하고 주변 장애물이 없는 넓은 농경지인 평야 지대, 호수, 강, 하구, 간척지, 대규모 저수지 등의 지리적 입지 조건을 갖춘 지역이 발전 효율성이 높은 것으로 확인되었다. 태양광 발전시설의 경제적 측면은 환경적 요인에 의해 발전량 차이가 있으므로 가장 좋은 지리적 조건을 찾는 것이 중요하다. 발전시설의 집적화 및 규모화 측면에서 효율성이 긍정적이라 할 수 있는 호남지역은 비도시지역인 농림지역 및 자연환경보전지역의 익산시(I2, I3), 순천시(L1) 등이 인구 밀집 지역 및 산업단지에 구축된 도시지역에 비해 상대적으로 발전효율이 우수한 것으로 확인할 수 있었다.

3. 평가방법 검증

효율성 평가 방법의 타당성을 검증하기 위해 가장 중요한 점은 투입/산출변수와 효율성 사이에 일관된 관계가 있어야 한다. DEA 모형은 효율성을 도출하기 위해 투입/산출변수를 활용해야 하며, 결과적으로 투입변수는 적고 산출변수는 많을수록 효율성이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 투입변수의 사용은 DEA 모형에 의해 측정된 효율성에 부(-)의 영향을 주어야 하며, 산출변수는 정(+)의 영향을 가져야 한다(정성문, 2014). 이러한 관계를 DEA 모형을 통해 얻은 효율성을 종속변수로 하고 투입/산출변수를 독립변수로 한 다중회귀분석의 결과 값으로 아래의 <표 10>에 정리하였다.

<표 10> 다중회귀모형 분석결과

통계값	CCR분석	BCC분석
R^2	0.655	0.805
F	15.89	33.26
P-값	0.0000	0.0000

회귀모형의 적합성을 일차적으로 확인하면, <표 10>에서 회귀모형의 적합도를 나타내는 결정계수 R^2 값이 CCR 분석과 BCC 분석에서 각각 0.655과 0.805인 것으로 볼 때, 추정된 회귀선이 변수와 효율성 간의 변동성을 설명할 수 있는 유의성이 있는 회귀모형으로 볼 수 있다. 또한 F 분포를 활용하여 모형의 적합성을 검증해 보면 CCR 분석의 경우, F값이 15.89, 유의확률 값(P-값)이 0.0000로 유의수준 0.05보다 작으므로 본 모형에서 채택된 투입/산출변수들과 DMU 효율성 간의 선형회귀모형이 적합하다고 할 수 있다. BCC 분석의 경우에도 F값이 33.26, P-값이 0.0000인 것으로 볼 때, 적합한 모형이라고 판단된다.

회귀모형을 활용하여 투입과 산출변수와 효율성의 상관관계를 살펴본 다중회귀 계수의 분석결과는 아래의 <표 11>와 같다. CCR/BCC 분석 모두 투입변수에 대해 부(-)의 영향과 정(+)의 영향을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. DEA 효율성에 대한 출력변수는 입력변수와 바람직한 관계로 있음을 확인할 수 있다(정성문, 2014). 회귀계수의 유의성 검정에서 일부 변수에 대한 p-값이 유의수준 0.05보다 높은 것으로 나타났으며, 이는 입력 및 출력 변수가 효율성에 유의한 관계를 보이지 않는다.

모듈 표면적, 충전설비, 대기온도는 태양광 발전시설 구축 시 개별 독립변수가 고정적이지

않는 부분이 있다. 정확한 회귀식은 변수들의 개별 유의성에 따라 작성 여부를 판단하는 것이 아니라 회귀식에 투입된 모든 변수들을 가지고 작성할 필요가 있다. 태양광 발전 투자대비 발전 수익면에서 중요한 효율성, 발전용량(kW), 연간발전량(kWh), 운영수익(원)은 유의한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

<표 11> 다중회귀계수의 분석결과

통계값	CCR분석			BCC분석		
	계수	t	P-값	계수	t	P-값
효율성(Y절편)	0.950	3.599	0.001	1.769	26.880	0.000
모듈표면적(m ²)	0.492	-0.415	0.681	0.270	-0.379	0.707
모듈수량(장)	-0.001	-5.643	0.002	0.000	-0.481	0.941
총건설비(원)	-0.000	-0.678	0.651	-0.000	-1.269	0.212
대기온도(℃)	-0.004	-0.024	0.781	-0.037	-11.860	0.000
인구밀도	-0.000	-0.324	0.001	-0.000	-5.397	0.000
발전용량(kW)	-2.805	-0.424	0.042	-0.734	-0.485	0.027
연간발전량(kWh)	0.000	3.318	0.002	0.000	2.287	0.035
운영수익(원)	0.000	3.197	0.003	-0.000	-0.348	0.042

* 유의수준 0.05

4. 연구결과

영호남 태양광 발전시설의 기상조건, 지리적 입지 조건, 환경적 요소 및 지방자치단체의 정책과 지원체계가 발전효율에 영향을 미치는 영향을 분석한 본 연구의 결과는 다음과 같이 정리된다.

DMU의 D, E, F는 경남지방을 나타내고 J, K, L은 전남지방을 나타낸다. 위도의 차이에 따라 북쪽지방에 비해 남쪽지방의 효율성 결과 값이 더 높은 것으로 보아 남쪽지방의 발전효율이 더 높은 것으로 예상된다. DMU의 A, C, E는 도심지역의 산업단지 구역으로 I, K, L 농림/도시지역의 평야지역에 비해 발전 효율성이 낮은 것으로 나타났다.

첫째, 지리적 입지와 기상 조건 등이 발전효율에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 효율성 분석 결과 영남지역이 호남지역보다 발전효율에 영향이 있었다. 호남지역이 지리적 특성상 태양광 시설의 집적화, 규모화 측면에서 효율적이다. 평야 지대로 구성된 호남지역의 태양광

발전시설이 산간 지대로 구성된 영남지역의 태양광 발전시설에 비해 발전효율이 높은 것으로 확인되었다. 지리 분포를 보면 호남지역은 바다와 광활한 평야 지대를 끼고 있어 일조량이 풍부해 태양광 발전에 적합한 최적의 입지 조건을 갖추어져 있고, 대지 면적이 넓을수록 발전 시간이 높아 발전량이 비례적으로 높은 것으로 판단된다(이기현 외, 2018). 이에 반해 산간 지대가 많은 영남지역은 태양광 발전시설이 대지면에 비해 건물 옥상이나 외벽 등을 활용하여 설치 공간의 협소함에 따라 발전효율이 저하의 요인이 되어 태양광 모듈 설치에 여러 가지 제약조건이 따랐다.

둘째, 태양광 발전량은 환경적 요인에 의해 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 태양광 발전시설 구축은 크게 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역으로 구분된다. 영남지역은 태양광 발전시설은 그림자 차폐를 증대시키는 높은 인구 밀집 지역 및 산업단지에 구축되어 있어 연간발전량에서 호남지역과 차이점을 확인할 수 있었다. 원인 인자가 명확해 그림자 차폐(햇스팟)를 유발하는 전신주, 식물, 새 배설물, 먼지 등이 전력 효율을 낮아지게 만드는 원인이 될 수 있다. 이러한 요인으로 모듈 내부의 에너지 소비 증가로 모듈이 부분적으로 온도가 상승하면 바이패스 다이오드 현상에 의해 과열된 영역에서 단락 및 EVA를 노화시켜 발전효율이 낮아지게 된다. 분석 결과를 토대로 농림지역 및 자연환경보전지역이 많은 호남지역의 발전효율이 높다는 사실을 재확인할 수 있다.

셋째, 해당 발전원의 공사비용이 발전효율에 미치는 영향을 확인하였다. 국내 태양광발전 설비 설치 및 유지관리의 기본 가이드라인은 발전시설의 설치, 운영 및 관리의 중요성을 나타내고 있다. 대체로 모듈 설치 시 정남향(100%)이 이상적인 발전효율을 낼 수 있는 방향이지만 지형적 특성으로 남동향/남서향(96%), 동향/서향(85%), 북향(66%)등 발전량이 상황에 따라 조금씩 달라짐을 확인할 수 있다. 영남지역은 도심지역과 산업단지로 구분되며 모듈 각도에 따라 그림자 영향이 없는 설치 공간이 필요하나 도심지역과 산업단지의 협소한 입지 조건에 의해 모듈의 설치 면적 제한과 이동경로 확보가 어려워 유지보수 비용이 증가한다. 호남지역의 대지면적은 경제성 분석 시 면적당 직접화, 규모화에서 넓은 바다와 광활한 평야 지대를 갖고 있어 공사비용을 절감할 수 있는 요건을 모두 갖춘 것으로 확인할 수 있다. 지역별 태양광발전소 확인해보면, 호남지역이 다수의 발전시설이 구축된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 국내 태양광 에너지 사업시장은 호남지역이 경제성 측면에서 긍정적이라 할 수 있다.

V. 결론

기후변화 문제해결을 위한 국제사회의 정책과 기술발전으로 에너지 산업의 탈탄소화가 확산되고 있다. 유엔기후변화협약 당사국 회의(COP24)에서 선진국과 개도국에 동일한 책임과 의무를 부여하고 개도국의 기후변화 문제해결을 위한 재정지원인 적응기금을 지속할 것이라는 내용을 담은 ‘파리 협정 이행규칙’의 최종 합의안이 도출되었다. 기업들은 탈탄소화를 통한 탄소 배출비용과 발전비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 기업경쟁력 및 수출경쟁력을 강화하고, 브랜드 이미지를 제고하며, 신규 비즈니스 창출 기회로 활용할 수 있다. 탈탄소화 동참은 이제 선택이 아닌 필수이며, 국내 기업들은 재생에너지 사용목표와 계획을 수립하고 정부는 전력구매계약 등이 가능하도록 소규모 재생에너지를 자유롭게 거래할 수 있는 제도적 기틀을 마련할 필요가 있다. 공급 측면에서의 에너지 탈탄소화 기술 트렌드를 확인하면, 글로벌 재생에너지 발전설비 비중 중에서 2017년 이후 가장 빠른 성장세를 보이고 있는 에너지원은 태양에너지와 풍력임을 알 수 있다.

신재생에너지는 분산화 및 디지털화 기술들과 결합하여 향후 장기적으로 에너지 대전환을 이끌어갈 것이다. 그러나 국내 선행연구를 검토하면 발전원의 효율을 높이기 위한 기상과 지형분석이 태양광 발전에 어느 정도의 영향을 미치는지에 대한 연구가 부족하며, 실증단지 조성의 경제성, 기술성, 시장성, 위험 분석에 따른 연구는 거의 없는 실정이다. 발전소 구축은 국가산업정책과 맞물려 있는 전략적 구조를 고려한다면 신재생에너지 대책에 따른 영향성 평가 및 안정도 향상 방안에 관한 연구가 필수적이다.

태양광 발전시설의 지리적 입지 조건에 대한 이전 연구들은 소규모 특정 지역에 대한 분석을 시행한 연구가 대다수이다. 연구 결과도 기상분석을 매개체로 통계분석 기반의 경제성, 기술성, 시장성, 위험 정도 분석을 활용한 발전시설 분야의 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이미 해외에서는 에너지 정책 및 경제성 분석에 있어 기상분석 매개체로 하는 통계분석 기반의 효율성 분석이 보편화되고 있다(Wang et al., 2022). 예를 들면 대만(Mariano et al., 2021), 중국(Yang et al., 2020), 베트남(Wang et al., 2022) 등의 해외사례들도 국가적 차원에서 신재생에너지 성능연구, 지속 가능 위치, 효율성 및 에너지·환경 관련 분쟁을 평가하기 위해 기상분석을 활용하고 있다. 특히 에너지 선진 국가인 유럽 에너지 시장은 기술·경영을 바탕으로 경제성, 기술성, 시장성, 위험 정도에 대해 DEA 모형으로 효율성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 기후조건과 에너지 생산의 융합분석을 통해 최적 입지 조건을 선정하고자

영호남 12개 지역(시/군 단위)의 48개 태양광발전소를 비모수적 접근 방식인 DEA 모형을 활용하여 분석하였다. 모듈 면적, 모듈 개수, 총건설비, 대기 온도, 인구밀도, 발전 용량 등 투입변수와 연간발전량과 운영수익을 포함한 산출변수를 선정하고 입지 조건이 유사한 영호남 지역을 선정하여 동일 기자재, 설계, 공사 기간을 적용한 1년 이상 실적이 있는 태양광 발전시설로 제한하여 분석하였다.

발전 기술 및 경제성 효율 분석 결과 호남지역이 경제성 측면에서 긍정적이라 할 수 있었다. 투입 및 산출 대비 CCR, BCC 결과 값이 1로 확인되었으며, 높고 낮은 DMU 사이에 투입 대비 산출 차이가 있는 요인은 다음과 같다. 첫째, 호남지역의 지리적 입지 조건을 경제성 분석 시 면적당 직접화, 규모화에서 넓은 바다와 광활한 평야 지대를 갖고 있어 모듈 설치에 필요한 최적의 조건을 부여할 수 있었다. 둘째, 고비용의 태양광 발전시설을 구축하기 전에 발전원의 효율을 높이는 데 필요한 위치를 식별하고 최적화된 입지 조건에 시설을 구축되는 것이 필수적인 것으로 확인할 수 있었다. 마지막으로 지역의 지리적 입지 조건을 최대한 활용하기 위해서는 지방자치단체의 정책과 지원체계가 중요한 것으로 판단되었다. 에너지 산업의 민간 기술혁신 및 정책 적용방안에 대한 신뢰성을 높이는 방안이 한국형 에너지 효율 네트워크 구축 운용과 산업 활성화에 필요하기 때문이다.

영호남 12개 지역의 태양광 발전시설을 대상으로 투입과 산출 요소 간의 상호관계를 분석하는 연구는 투자활성화와 지속가능한 생태계 조성을 목적으로 민간 태양광 발전시설의 효율적 운영을 위한 구체적 대안 도출의 일환이다. 향후 추가적인 연구를 통해 미시 및 거시적 수준의 요인과 DMU를 추가하여 이러한 단점을 보완할 예정이다. 태양광 발전시설의 장기적 데이터 축적과 정책별 경제성 평가 형태에 따라 연구를 확장해야 할 필요가 있다.

참고문헌

(1) 국내문헌

- 고재경·김성욱 (2016), “태양광 발전시설 분포에 영향을 미치는 요인 연구”, 「한국지역개발학회지」, 제28권, 제5호, pp. 109-128.
- 김백천·정승환·김민석·김종근·김성신 (2021), “계절별 기상조건에 기반한 태양광 발전량 예측에 관한 연구”, 「한국지능시스템학회 논문지」, 제31권, 제2호, pp. 102-108.
- 김진철·김경남 (2018), “태양광시스템의 지역별 최적 방향 및 각도 연구: SAM을 활용한 시뮬레이션 사례분석”, 「신재생에너지」, 제14권, 제2호, <https://doi.org/10.7849/ksnre>.
- 박인용·정재용 (2020), “재생에너지 정책수단 전환의 효과성 연구: 한국의 전환 사례 분석”, 「기술혁신연구」, 제28권, 제2호, pp. 1-36.
- 양일승·안형순 (2018), “효율성 측면에서 태양광 에너지 시설 최적입지에 관한 연구”, 「한국콘텐츠학회논문지」, 제18권, 제7호, pp. 656-664.
- 윤영철·정재용 (2019), “후발국의 제도 변화 요인 연구: 한국의 신재생에너지 정책 변동 사례를 통해”, 「기술혁신연구」, 제27권, 제2호, pp. 1-36.
- 이기현·이건주·강성우 (2018), “태양광 에너지의 효율적인 생산을 위한 발전소 입지분석과 선정”, 「에너지경제연구」, 제17권, 제2호, pp. 53-87.
- 이동성·임재욱 (2019), “태양광 발전시설 입지에 영향을 미치는 요인 연구: 서울시를 중심으로”, 「서울도시연구」, 제20권, 제4호, pp. 107-117.
- 이영석·김병근 (2015), “우리나라 에너지 정책의 전환적 특성: 전환관리 이론을 중심으로”, 「기술혁신연구」, 제23권, 제4호, pp. 89-122.
- 장연재·공지영 (2022), 「국제 신재생에너지 정책변화 및 시장분석」, 에너지경제연구원
- 진경미, 윤병운 (2012) “DEA 모형을 이용한 국내 대학의 기술이전 효율성 분석”, 「한국산학기술학회」, 제13권, 제6호, pp. 2558-2569.
- 전수진·이진수, 홍재범 (2016) “DEA를 활용한 민간 기업의 R&D 효율성 분석 사례: 공작기계 A사를 중심으로”, 「기술혁신연구」, 제24권, 제4호, pp. 27-54.
- 정성문 (2011), “DEA모형을 활용한 국내 태양광발전소의 효율성 평가에 관한 연구”, 「에너지기후변화학회지」, 제6권, 제2호, pp. 40-62.
- 한정희 (2013), “DEA 모형을 이용한 발전회사 환경효율성에 대한 연구”, 「디지털융복합연구」, 제11권, 제5호, pp. 119-133.
- 허재·박범수·김병일·한상욱 (2019), “태양광 발전소 건설부지 평가 및 선정을 위한 선형회귀분석 기반 태양광 발전량 추정 모델”, 「한국건설관리학회 논문집」, 제20권, 제6호, pp. 126-131.

(2) 국외문헌

- Agostino, M., Nifo, A., Ruberto, S. and Scalera, D. (2022), "Productivity Changes in the Automotive Industry of Three European Countries. An Application of the Malmquist Index Decomposition Analysis", *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 61, pp. 216-226.
- Banker, R. D., A. Charnes and W. W. Cooper (1984), "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, Vol. 30, No. 9, pp. 1078-1092.
- Bingjun Li, Xiaoxiao Zhu (2018), "Analysis of Maize Production Efficiency Based on DEA-Malmquist Indexes: A Case Study of Henan Province", *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, Vol. 7 No. 4, Article 88794.
- Charnes, A., C. T. Clark, W. W. Cooper and B. Golany (1985), "A Developmental Study of Data Envelopment Analysis in Measuring the Efficiency of Maintenance Units in the U.S. Air Forces" *Annals of Operation Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 95-112.
- Chia-Nan Wang, Thanh-Tuan Dang, Ngoc-Ai-Thy Nguyen and Jing-Wein Wang(2022), "A Combined Data Envelopment Analysis (DEA) and Grey Based Multiple Criteria Decision Making(G-MCDM) for Solar PV Power Plants Site Selection: A Case Study in Vietnam", *Emergy Reports*, Vol. 8, pp. 1124-1142.
- Evelin Krmac, Mozhgan Mansouri Kaleibar (2022), "A Comprehensive Review of Data Envelopment Analysis (DEA) Methodology in Port Efficiency Evaluation", *Maritime Economics & Logistics*, <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00239-5>.
- Fairuz Suzana Mohd Chachuli, Norasikin Ahmad Ludin, Sohif Mat and Kamaruzzaman Sopian(2020), "Renewable Energy Performance Evaluation Studies Using the Data Envelopment Analysis (DEA): A Systematic Review", *Journal of Renewable Sustainable Energy*, Vol. 12, Article 062701.
- Jalil Heidary Dahooie, Ali Husseinzadeh Kashan, Zahra Shoaie Naeini, Amir Salar Vanaki, Edmundas Kazimieras Zavadskas and Zenonas Turskis (2022), "A Hybrid Multi-Criteria-Decision-Making Aggregation Method and Geographic Information System for Selecting Optimal Solar Power Plants in Iran", *Energies*, Vol. 15, Article 2801.
- Jing Yang, Changhui Yang, XiaojiaWang, Manli Cheng and Jingjing Shang (2020), "Efficiency Measurement and Factor Analysis of China's Solar Photovoltaic Power Generation Considering Regional Differences Based on a FAHP - DEA Model", *Energies*, Vol. 13, Article 1936.

- June Raymond Leonen Mariano, Mingyu Liao and Herchang Ay (2021), “Performance Evaluation of Solar PV Power Plants in Taiwan Using Data Envelopment Analysis”, *Energies*, Vol. 14, Article 4498.
- Mita Bhattacharya, Sudharshan Reddy Paramati and Ilhan Ozturk·Sankar Bhattacharya (2016), “The Effect of Renewable Energy Consumption on Economic growth: Evidence from Top 38 Countries”, *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 733–741.
- P. Zhou, B.W. Ang and K.L. Poh (2008), “A survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, pp. 1–18.
- Seyed Hashem Mousavi-Avval, Shahin Rafiee, Ali Jafari and Ali Mohammadi (2011), “Improving Energy Use Efficiency of Canola Production Using Data Envelopment Analysis (DEA) approach”, *Energy*, Vol. 36, pp. 2765–2772.
- Seyed Hashem Mousavi-Avval, Shahin Rafiee, Ali Jafari and Ali Mohammadi (2011), “Optimization of Energy Consumption for Soybean Production Using Data Envelopment Analysis (DEA) Approach”, *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 3765 - 3772.
- Sonal Sindhu, Vijay Nehra and Sunil Luthra (2017), “Investigation of Feasibility Study of Solar Farms Deployment Using Hybrid AHP-TOPSIS Analysis: Case study of India”, *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 73, pp. 496 - 511.
- Toshiyuki Sueyoshi, Mika Goto(2017), “World Trend in Energy: An Extension to DEA Applied to Energy and Environment”, *Sueyoshi and Goto Economic Structures*, Vol. 6, No. 13, DOI 10.1186/s40008-017-0073-z.

□ 투고일: 2023.08.15. / 수정일: 2023.09.28 / 게재확정일: 2023.10.05.