

<온라인투고시스템(JAMS) 논문 투고 파일 업로드 확인 사항>

- 논문 투고 시, “빨간색 음영 부분”은 삭제 후 업로드 해주시고, 파일명에도 저자 성명 등 정보를 삭제해주세요.
- 저자 정보(성함, 소속 등), 감사의 글(사사) 내용은 논문 게재 확정 이후 게시할 수 있습니다.

경기도 태양광 잠재량의 공간적 분석: 일사량 수치에 따른 영향과 정책적 시사점

전승호¹⁾ · 저자 성함^{2)*} (바탕제 10pt)

Spatial Analysis of Solar PV Potential in Gyeonggi Province: Impact of Irradiance Magnitude Differences and Policy Implications

Name¹⁾ · Name^{2)*} (바탕제 10pt)

Abstract: (Times New Roman 9pt, 최대 200words, 영문으로 작성) Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here. Put Abstract here.

Key words: (Times New Roman 9pt, English(한글)형식으로 작성) Key word(주요용어), Key word(주요용어), Key word(주요용어), Key word(주요용어), Key word(주요용어), Key word(주요용어)

Nomenclature

g^{th} : theoretical potential generation
 g^{tc} : technical generation
 g^{mk} : market potential generation
 irr : irradiation
 $AreaRatio$: Ratio of module area to available installation area
 eff : module efficiency
 $geo_restricted$: geographically restricted area
 $policy_restricted$: politically restricted area
 $LCOE$: levelized cost of electricity
 eff : module efficiency
 SMP : system marginal price
 REC : renewable energy certificate
 CC : capital cost
 OC : operational cost
 LC : land cost
 r : discount rate

d : degradation rate
 LP : land price
 LR : annual land lease rate relative to officially assessed land value
 DF : required land area per unit of PV capacity

Subscript

i : grid
 j : type of PV technology
 t : year

1. 서론

전세계적으로 기후변화 대응을 위해 재생에너지를 활용한 전력공급, 그리고 최종 에너지소비의 전기화를 통해 온실가스 감축에 많은 노력을

기울이고 있다. 다만 국내 전력시장은 송전 계통 과부하와 그로 인한 전력망 투자비용 증가와 주민 수용성 문제 등 해결해야 할 문제가 적지 않다. 이러한 문제들은 근본적으로 국내 전력수급의 공간적 불일치로 인해 발생한다. 전통적인 발전원인 원자력과 화력발전소는 냉각수 확보, 연료 수입 등의 특성상 해안가에 위치하는 것이 불가피하다. 태양광과 풍력을 이용하는 재생에너지 발전소 또한 부지 확보와 그에 따른 비용 차이로 인해 비수도권 지역에 편중되어 있다. 한편, 수도권에는 인구가 집중되어 있어 가정용 전력수요가 많고, 또 반도체 산업과 같이 전력집약적 산업이 위치하고 있어, 산업용 전력수요 또한 높다. 이처럼 전력 공급원은 주로 비수도권에 위치한 반면, 전력 수요처는 수도권 지역에 몰려 있다. 이러한 상황에서 수도권 내 재생에너지 보급 확대는 국가 전력믹스를 깨끗하게 함과 동시에 국가 송전망에 대한 부담을 완화 시켜줄 수 있다.

특히 경기도는 전력을 가장 많이 소비하고 있는 시도로서, 2022년 국내 전력소비의 25.6%에 해당 140.5GWh의 전력을 소비하였다. 동시에, 경기도는 국내 발전량의 14.4%에 해당하는 85.9GWh를 발전하였다. 전력수급을 함께 고려하면, 경기도의 전력자립도는 61%로 나타났다^[1]. 경기도 재생에너지 보급률 또한 낮은 수준으로, 2023년 국내 전체 재생에너지 발전량의 7.6%에 불과하다^[2]. 이에 따라 경기도 내 재생에너지 보급 확대는 기후변화 대응 측면에서만뿐만 아니라, 국가 전력 인프라의 효율성 제고 및 지역 에너지 자립도 향상 측면에서도 전략적으로 중요하다^[3].

따라서 본 연구는 경기도의 태양광 잠재량을 평가하고자 한다. 선행연구와의 차별점으로는 일사량 데이터를 두 가지 출처를 활용함으로써 잠재량 산정 결과에 미치는 영향을 살펴보고, 시장잠재량 산정에 공시지가를 반영하였고, 시군별 시장 잠재량 활용률을 살펴보았다. 태양광 보급 확대를 위해서는 부지 적합성, 수용성, 경제성 등을 종합적으로 고려한 실현 가능한 잠재량 평가가 필수적이다. 특히 수도권처럼 전력 수요가 집중되어 있고, 재생에너지 보급이 제한적인 지역에서는, 지역 내에서 실현 가능한 잠재량의 규모와 공간적 분포를 파악하는 것이 효과적인 보급 전략 수립에 핵심적이다. 또한 기존 연구들은 하나의 일사량 데이터를 기반으로 분석한 경우가

많아, 데이터 출처에 따른 잠재량 평가의 차이를 정량적으로 비교하거나, 데이터 선택이 정책결정에 미치는 영향을 충분히 논의하지 못했다. 이에 따라, 본 연구에서는 서로 다른 일사량 데이터를 활용한 비교 분석을 통해, 잠재량 평가 결과의 불확실성을 정량적으로 살펴보고, 경기도 시군단위의 잠재량 활용률 및 불균형 문제까지 폭넓게 고찰하고자 한다. 이는 향후 수도권의 실질적 재생에너지 보급 전략 수립과 국가 전력망 부담 완화 정책에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

Koh *et al.*(2023)은 경기도 재생에너지 전환 로드맵 수립을 위해 태양광, 풍력, 바이오에너지의 시장잠재량을 시군단위로 산정하였으며, 설치 유형에 따라 지상형과 건축물형으로 구분하여 분석하였다^[4]. 이 과정에서 사회적 수용성과 경제성을 반영한 지목별 설치 가능 면적을 고려하고, 최소, 중간, 최대의 세 가지 시나리오를 설정하였다. 기준 시나리오에서 경기도의 태양광 설비 잠재량은 지상형 8.49GW, 건축물형 8.87GW로 총 17.36GW로 산정되었으며, 설비이용률을 15%로 가정할 경우, 각각 11.2TWh, 11.7TWh의 연간 발전 잠재량을 갖는 것으로 분석되었다. 전체 시나리오에서 태양광 발전 잠재량은 최소 18.1TWh에서 최대 36.4TWh까지의 범위를 보였다.

Kim *et al.*(2019)은 재생에너지별(태양광, 태양열, 풍력, 수력, 지열, 바이오매스) 시장잠재량을 1km 격자 해상도로 산정하고, 이를 바탕으로 전국 기초지방자치단체의 에너지 자립률을 평가하였다^[5]. 태양광 잠재량 계산을 위해, 위성 영상에서 추정한 수평면 일사량을 측정자료로 보정하여 격자단위 데이터를 활용하였다. LCOE는 설비투자비, 운영유지비, 연료비, 발전량을 활용하여 계산하였다. 분석결과, 경기도의 태양광 시장잠재량은 47.4TWh로 나타났고, 나머지 재생에너지원에 대해서는 태양열(35.7TWh), 지열(5.9TWh), 수력(2.2TWh), 바이오매스(0.7TWh), 풍력(0.5TWh) 순으로 잠재량이 크게 나타났다.

산업통상자원부와 한국에너지공단은 2008년부터 가장 최근 보고서인 2022년 까지 신재생에너지 백서를 격년으로 발간하고 있다. 백서는 국내 신재생에너지 정책과 보급 현황, 기술개발 동향, 통계자료 등을 종합적으로 정리하고 있다. 특히, 신재생에너지원별 세부기술까지 포함하여, 총 14가지 기술유형별로 국가단위에서 이론적, 기술적, 시장 잠재량을 평가하고 있다. 잠재량 분석 결과가 담겨 있는 가장 최근 보고서에 따르면 2020년 국내 전체 태양광의 연간 이론적 잠재량은 137,347TWh, 기술적 잠재량은 3,117TWh, 시장 잠재량은 495TWh으로 나타났다.

1) 직위, 소속 (영문으로 작성)

2) 직위, 소속 (영문으로 작성)

*Corresponding author: E-mail

Tel: +82-**-***-****

Fax: +82-**-***-****

2020년과 2018년 보고서^[6,7]에는 17개 시도별 태양광 시장 잠재량 평가 결과가 담겨 있는데, 경기도의 태양광 시장 잠재량은 2018년에 47.4TWh, 2020년에 36.2TWh로 대략 23.6% 감소하였다. 해당 기간의 규제정책, 계통한계가격, 발전단가 등의 변화가 시장 잠재량 평가 결과에 영향을 주었을 수 있다.

한국에너지기술연구원과 국립기상과학원에서는 태양광 자원지도를 플랫폼 형태로 제공하고 있다. 우선 한국에너지기술연구원은 전국 시도 및 시군구를 대상으로 태양광, 태양열, 육상풍력, 수력, 천부지열, 심부지열, 바이오, 폐기물의 기술적 잠재량 정보를 제공하고 있다^[8]. 이 자료에 따르면, 경기도의 태양광 기술적 잠재량은 282.2TWh로 나타난다. 또 다른 플랫폼^[9]에서는 편입면적 분석을 통해, 원하는 지점과 면적에 해당하는 일사량 정보를 확인할 수 있다. 또한 지리적, 정책적 제약이 있는 곳을 지도에서 확인하여, 태양광 설치가 가능한 곳을 가려낼 수 있다. 국립기상과학원^[10]에서도 풍력과 태양광의 기상자원지도를 플랫폼 형태로 제공하고 있다. 지점별로 일사량 분석이 가능하다. 한국에너지기술연구원과 국립기상과학원에서 제공하는 일사량 수치에는 차이가 있는데 이는 2.1 데이터 절에서 자세한 설명을 하고자 한다.

본 연구의 목적은 첫째, 서로 다른 일사량 데이터를 통해 경기도의 기술적, 시장 잠재량을 평가하고, 둘째, 일사량 데이터가 기술적, 시장 잠재량 각각 미치는 영향을 살펴보고, 셋째, 시군별로 시장 잠재량을 실제로 얼마나 활용하고 있는지 살펴보고, 넷째, 잠재량 분포의 공간적 불균형을 살펴보고자 한다.

2. 데이터 및 방법론

2.1 데이터

본 연구에서 사용한 첫 번째 일사량 자료는 한국에너지기술연구원에서 제공하는 2012년 1월부터 2019년 12월까지의 위성 영상 기반 격자별 월평균 수평면 전일사량 데이터이다^[11]. 해당 데이터는 위성영상 기반 일사량을 기반하여 지표일사량을 산출하는 UASIBS-KIER 모델과 유럽 ECMWF의 ERA5-Land 재해석 기상자료를 활용하여 TMY 데이터를 생산하는 것으로 알려져 있다^[12]. 해당 데이터는 공공데이터포털에서 csv 형태로 제공되고 있다. 두 번째 일사량 자료는 국립기상과학원에서 제공하는 2016년 7월부터 2021년 6월까지의 격자별 수평면 전일사량 데이터이다. 해당 자료는 1.5km 격자 간격의 국지예보 수치모델(LDAPS)에서 산출한 일사량 값을 바탕으로, 30m 해상도

의 SRTM 지형자료를 활용하여 경사각, 방위각, 고도, 천공비 보정을 수행한 결과물이다. 해당 데이터는 기상자료개방포털에서 netCDF 형태로 제공되고 있다^[13].

Table 1. Comparison of solar irradiance dataset characteristics from KIER and KMA

Attribute	KIER	KMA
Irradiance type	Global Horizontal Irradiance	
Period	2012.01~2019.12	2016.07.01.~2021.06.30
Resolution	1,500m	100m
Method	Satellite irradiance model developed by KIER using Cheollian-1 imagery and ERA5-Land reanalysis	Terrain-adjusted irradiance model based on LDAPS* and SRTM** data

* Local Data Assimilation and Prediction System

**Shuttle Radar Topography Mission

Table 2. Annual average solar irradiance value from KIER and KMA (W/m²)

Region	Metric	KIER	KMA
South Korea	Mean	151.3	285.6
	Std. deviation	5.4	24.3
Gyeonggi-do	Mean	150.6	286.0
	Std. deviation	2.5	19.0

2.2 방법론

2.2.1 이론적 잠재량

태양광의 이론적 잠재량은 지면에 도달하는 태양 복사 에너지를 기반으로 산정하며 이론적으로 최대 활용 가능한 에너지양을 의미한다. 기술적·지리적·정책적·경제적 제약은 전혀 고려하지 않으며, 아래의 수식과 같이 일사량 값이 이론적 잠재량과 같다.

$$G^{th} = \sum_i^n g_i^{th} = \sum_i^n irr_i$$

여기서, G^{th} (Theoretical potential) 는 경기도 전체 이론적 잠재량을 의미하며, 경기도 내 개별 격자(i)의 이론적 잠재량(g_i^{th})의 합으로 계산한다. 이론적 잠재량은 일사량(irr_i)과 같다.

2.2.2 기술적 잠재량

기술적 잠재량은 이론적 잠재량을 바탕으로 태양광 모듈의 효율, 설치가능 면적, 지형 조건

등의 기술적·지리적 제약을 고려하여, 현재 기술 수준에서 활용가능한 에너지량을 의미한다.

$$G^{tc} = \sum_i^n g_i^{tc} = \sum_i^n g_i^{th} \times AreaRatio_{i,j} \times eff$$

단, $i \notin geo_restricted$

여기서, G^{tc} (Technical potential)는 경기도 전체 기술적 잠재량을 의미한다. 현재 기술적으로 활용 가능한 에너지량은 지면 전체가 아닌 태양광 패널에 도달하는 태양 복사 에너지만 활용이 가능하고, 또 태양 복사에너지를 전기에너지를 변환 하는 과정에서 손실이 발생한다. 이는 태양광 설치면적 대비 모듈면적의 비율 ($AreaRatio$)과 태양광 모듈의 변환 효율(eff)을 통해 기술적제약을 반영한다. 태양광 설치면적 대비 모듈면적의 비율은 태양광기술 유형(j)에 따라 달리 적용한다. 태양광기술 유형(j)은 개별격자(i)에 따라 지상형 태양광 혹은 옥상형 태양광으로 구분된다. 또한 산지, 습지, 하천 등 지리적 제약($geo_restricted$)이 있는 지역은 제외한다.

2.2.3 시장 잠재량

시장 잠재량은 기술적 잠재량을 바탕으로 발전원가, 규제로 인한 제약 등의 경제적·정책적 제약을 추가로 고려하여, 현실적으로 경제성 확보가 가능한 에너지량을 의미한다.

$$G^{mk} = \sum_i^n g_i^{tc}$$

단, $i \notin policy_restricted$,
 $LCOE_i < SMP + REC$

여기서 G^{mk} (Market potential)는 경기도 전체 시장 잠재량을 의미한다. 기술적 잠재량 중에서 규제로 인해 제약($policy_restricted$)이 있는 지역을 제외한다. 또, 발전원가($LCOE$)가 계통 한계가격과 신재생에너지 공급인증서 가격의 합 ($SMP + REC$)보다 큰 지역은 경제성이 없으므로 제외한다. SMP 와 REC 가격은 최근 5년 (2020~2024)간 실적을 반영하여, SMP 와 REC 각각 131.1원/kWh, 55.4원/kWh을 활용하였다. 발전원가는 아래와 같이 계산한다.

$$LCOE_i = \frac{CC_{i,j} + \sum_{t=1}^n \frac{OC_{i,j,t} + LC_{i,j,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{(1-d)^t \times g_i^{tc}}{(1+r)^t}}$$

$$where LC_{i,j,t} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \in building \\ LP_i \times LR \times DF & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, 각 격자별 발전원가는($LCOE_i$)는 격자(i) 위치에 따라 결정되는 태양광 기술 유형(j)별 비용과 격자(i)별 토지 임대비용에 따라 달라진다. $CC_{i,j}$ 는 기술 유형(j)별 초기 투자비용(원/kW)이고, $OC_{i,j,t}$ 는 기술 유형별(j), 시점별(t) 발생하는 연간 운영비용 (원/kW/년)이다. $LC_{i,j,t}$ 는 기술 유형별(j), 시점별 (t) 발생하는 연간 부지 임대비용(원/kW/년)으로, 격자별 공시지가(LP_i , 원/ m^2), 공시지가 대비 연간 토지임대료 비율(LR , %), 태양광 설비당 필요면적(DF , m^2/kW)의 곱으로 계산한다. 단, 옥상형 태양광의 경우, 토지 임대비용은 발생하지 않는 것으로 가정한다. r 은 할인율(%), d 는 성능저하율(%), t 는 운영기간으로 1기부터 수명(n)까지 이다.

Table 3. Geographical and political constraints

Constraint	Specific criteria	source
Geographical constraints	Mountainous areas, rivers, areas with slopes $\geq 20^\circ$	
	Landslide risk zone (Grade 1)	
Political constraints	Zoning regulations: Protected natural areas, settlement zones, airports Cultural heritage zones: Cultural property protection zones (national/provincial), registered cultural heritage areas Development-restricted areas: Wildlife protection zones, natural monument habitats, military zones (DMZ/CCZ), environmental conservation zones, tidal flats, wetland protected areas, water resource protection zones, absolute conservation areas in land-use plans, special management coastal areas, Yeonpyeong NLL zone Ecological conservation zones: Ecological zoning map Grade 1, specially managed zones Other restrictions: Baekdudaegan protected zone, agricultural promotion areas	sources ^[14-17]
Economic constraints	LCOE, SMP, REC	[18] [6] [19]

Table 4. Technical and economic parameters for PV evaluation

Parameter	Ground-mounted PV	Rooftop PV	Remarks
Module area ratio (%)	33	25	Ratio of module area to available installation area
Module efficiency (%)	20	20	Power conversion efficiency of PV modules
System lifetime (years)	20		-
Degradation rate (%)	0.45		Annual efficiency loss rate of PV modules
Capital expenditure (1000KRW/kW)	1,366	1,720	Initial investment cost
O&M	20.5	25.8	Annual Operation and

(1000KRW/kW/year)		Maintenance cost
Land price (KRW/m ²)	Land price is spatially applied based on publicly disclosed data ^[19] . Rooftop PV is assumed to incur no land lease cost.	
Land lease cost ratio(%)	5	Annual land lease rate relative to officially assessed land value
Discount rate (%)	4.5	-
SMP (KRW/kWh)	131.1	5-year average of System Marginal Price
REC (KRW/kWh)	55.4	5-year average of Renewable Energy Certificate price

3. 분석결과

3.1 데이터에 따른 시장 잠재량 비교평가

경기도의 태양광 이론적, 기술적, 시장 잠재량을 두 가지 종류의 일사량 데이터를 활용하여 평가한 결과는 Table 5에 요약되어 있다. 이미 Table 2에서 확인한 바와 같이, KIER와 KMA의 일사량 데이터는 경기도 전역 평균 기준 약 1.9배 (150.6W/m^2 vs. 286.0W/m^2)의 차이를 보였다. 이론적 및 기술적 잠재량은 두 데이터 간 일사량 차이에 비례하여 약 1.9배 정도의 차이를 나타냈다.

이러한 일사량 차이는 이론적 및 기술적 잠재량에도 거의 동일한 비율로 반영된다. 이는 이들 잠재량이 일사량에 대해 선형적으로 반응하는 구조이기 때문이다. 즉, 동일한 면적과 조건에서 일사량이 증가하면 발전량도 비례하여 증가하며, 이는 산정식 구조상 당연한 결과이다. 반면, 시장 잠재량은 일사량 변화에 비선형적으로 반응한다. 일사량이 증가하면 발전량이 늘어나 LCOE가 낮아지고, 이에 따라 기존에는 경제성 기준을 충족하지 못했던 격자들이 새롭게 시장 잠재량에 포함되게 된다. 따라서 시장 잠재량의 증가는 단순한 발전량 증가에 더해, 경제성이 확보된 면적의 확대라는 추가적 효과를 동반한다.

Table 5의 실제 분석 결과를 보면 KMA 데이터를 활용한 시장 잠재량은 KIER 기반 잠재량의 약 18.5배에 달한다. 지상형과 옥상형을 나누어 살펴보면, 지상형의 경우 17.0배, 옥상형의 경우 110.8배로 옥상형 태양광 시장 잠재량의 확대가 더욱 두드러졌다. 옥상형은 지상형 보다 설비 및 운영비용이 더 높기 때문에(Table 4 참고), 기존에는 지상형 대비 상대적으로 많은 양의 옥상형 태양광 셀들이 경제성 기준을 충족하지 못하다

가, 새로운 경제성 기준을 충족하는 셀이 더 많아졌기 때문일 수 있고, 또 기존 옥상형의 시장 잠재량이 0.3TWh로 절대적인 양이 작아서, 비율이 커보이는 효과가 있을 수 있다.

요약해보면 일사량 입력값 차이가 이론적·기술적 잠재량에는 선형적 영향을 주는 데 비해, 시장 잠재량에는 비선형적인 변화를 초래함을 보여준다. 이러한 결과는 일사량 데이터의 출처와 특성이 시장 잠재량 평가에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 잠재량 산정 및 관련 정책 해석에서는 입력 데이터의 특성과 신뢰성에 대한 사전 검토가 필수적이다.

Table 5. Comparison of PV potential in Gyeonggi-do by data sources (unit: TWh)

stage	data	Theoretical	Technical	Market
Total	KIER	13,386 (1)	407 (1)	18.4 (1)
	KMA	25,660 (1.9)	786 (1.9)	340.4 (18.5)
Ground-mounted PV	KIER	12,929 (1)	385 (1)	18.1 (1)
	KMA	24,775 (1.9)	743 (1.9)	307.8 (17.0)
Rooftop PV	KIER	457 (1)	22 (1)	0.3 (1)
	KMA	885 (1.9)	43 (1.9)	32.6 (110.8)

Note: Numbers in parentheses indicate the ratio of values based on KMA data to those based on KIER data.

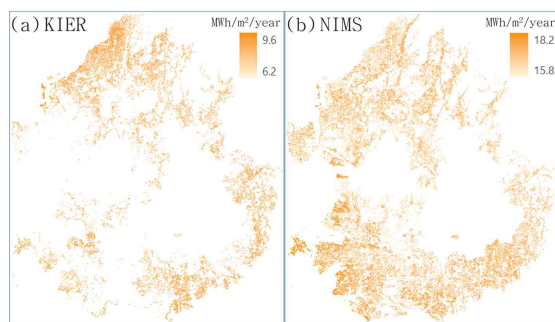


Fig 1. Market potential of PV: KIER vs. KMA

3.2 경기도 시군별 태양광 잠재량

Fig 2 (a)와 (b)는 경기도의 기술적, 시장 잠재량 분포를 보여주고 있다. 기술적 잠재량은 시장 잠재량의 분포에 비해 경기도 전역에 걸쳐 비교적 고르게 분포하는 것으로 나타난다. 격자기반의 잠재량 분석결과를 토대로 Table 6은 시군별 분석결과, 그리고 추가로 2023년 실제 발전량 실적치, 시장 잠재량의 활용률 (시장잠재량 중

실제 발전량 실적치가 차지하는 비중), 인구밀도, 면적을 보여주고 있다. 경기도의 기술적 잠재량은 407,131GWh으로 나타났고, 시장 잠재량은 기술적잠재량의 약4.5%인 18,124GWh으로 나타났다. 2022년 경기도의 전력소비량이 140,531GWh, 발전량이 85,780GWh으로, 전력자립률이 61.04%이다. 기존 2022년의 발전량에 태양광 시장잠재량(18,124GWh)을 합하면 103,904GWh이며, 2022년 전력 소비량 수준을 유지한다면 전력자립률은 73.94%로 전력자립률이 2022년 대비 12.9%포인트만큼 증가하게 된다. 2023년 경기도의 실제 태양광 발전량은 2,340GWh로, 시장잠재량 활용률 (2,340/18,124GWh)이 13%에 불과한 것으로 나타난다.

시군별로 연간 잠재량 규모를 살펴보면, 기술적 잠재량의 경우, 과천시가 1,189GWh로 가장 낮았고, 화성시가 44,751GWh로 가장 높았다. 시장 잠재량의 경우, 과천시가 역시 2GWh로 가장 낮았고, 연천군이 4,693GWh로 가장 높았다. 비교적 실현 가능한 수치를 나타내는 시장 잠재량에 대비하여 실제 발전량 실적치를 비교해 보고자 한다. 시군별로 시장잠재량 활용률도 최소 4%, 최대 428%로 편차가 크게 나타났다. 광주시의 시장 잠재량은 14GWh으로, 절대적인 양은 작게 나타났지만, 2023년 실제 태양광 발전량은 시장잠재량의 428%인 58GWh를 발전 한 것으로 나타났다. 한편 연천군의 시장 잠재량은 4,693GWh으로, 절대적인 양이 크게 나타났지만, 2023년 실제 태양광 발전량은 시장잠재량의 4%인 201GWh 만큼 발전한 것으로 나타났다.

시군별로 기술적 잠재량과 시장잠재량이 차이가 나는 것은 시군별 일사량, 행정구역 면적, 공시지가 등 지리적, 사회적 요인들로 인해 잠재량에 차이가 나게 된다. 본 연구에서는 Fig. 3 (a)~(e) 시군별 면적과 기술적 잠재량, 그리고 인구밀도와 시장잠재량 간의 관계를 보여주고 있다. Fig 3 (a)를 보면, 기술적 잠재량 상위 7개 시군 (화성시, 파주시, 평택시, 여주시, 이천시, 안성시, 용인시)은 경기도 전체 면적의 39.7%를 차지하고 있으며, 넓은 면적을 바탕으로 기술적 잠재량의 52.4%를 차지하는 것으로 나타난다. 시군별 면적과 기술적 잠재량의 비례적 관계는 Fig (b)에서 확인할 수 있다.

한편, 시장 잠재량은 기술 잠재량에 비해 경기도의 외곽지역에 많이 분포하는 것으로 나타난다 (Fig. 2 참고). Fig. 3 (c)를 보면, 시장 잠재량 상위 4개 시군 (연천군, 파주시, 포천시, 안성시)의 인구밀도는 62명/km², 782명/km², 191명/km², 377명/km²으로 경기도 인구밀도인 1,389명/km²보다 낮은 지역이다. 해당 4개 시군은 경기

도 전체 시장 잠재량의 60%를 차지하는 것으로 나타난다.

Fig. 3 (e)는 기술적 잠재량과 시장 잠재량의 높고, 낮은 대표적인 경우에 해당하는 4개 시군을 선택하여 보여주고 있다.

첫째, 기술적 잠재량, 시장 잠재량, 두 잠재량 모두 많이 보여하고 있는 대표적 지역은 양평군으로 나타난다. 양평군은 경기도 면적의 8.6%를 차지할만큼 넓어, 기술적 잠재량은 경기도 전체의 4.5%를 차지하는 것으로 나타난다. 또, 인구밀도는 낮아서, 시장 잠재량 또한 경기도 전체의 7.5%를 차지하는 것으로 나타난다.

둘째, 기술적 잠재량은 높으나, 시장 잠재량이 낮은 대표적인 지역은 화성시이다. 화성시는 경기도 면적의 6.8%를 차지할만큼 넓어, 기술적 잠재량도 경기도 전체의 11%를 차지하는 것으로 나타난다. 반면 인구밀도는 높아서, 시장잠재량은 경기도 전체의 4.7%를 차지하여 기술적 잠재량 대비 비교적 낮은 시장잠재량을 보유하고 있는 것으로 나타난다.

셋째, 기술적 잠재량, 시장 잠재량 두 잠재량 모두 낮은 대표적인 지역은 부천시로 나타난다. 부천시는 경기도 면적의 0.5% 밖에 차지 안하며, 기술적 잠재량도 경기도의 0.9%를 차지하는 것으로 나타난다. 또, 인구밀도는 높아서 시장 잠재량 또한 경기도 전체의 0.04%만 차지하는 것으로 나타난다.

넷째, 기술적 잠재량은 낮으나, 시장 잠재량은 높은 지역으로는 동두천시이다. 동두천시는 경기도 면적의 0.9% 밖에 차지 안하며, 기술적 잠재량도 경기도 전체의 0.5%를 차지하는 것으로 나타난다. 반면 인구 밀도는 낮아서, 시장잠재량은 경기도 전체의 0.6%를 차지하는 것으로 나타난다.

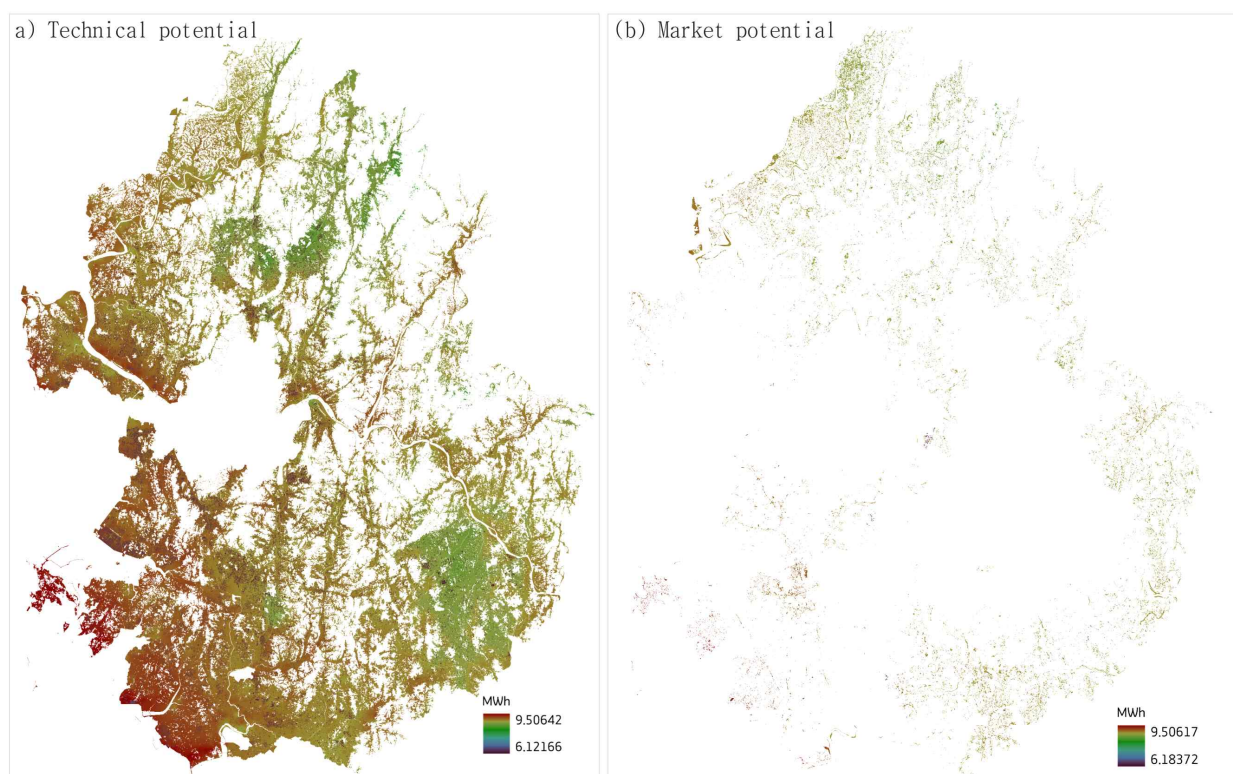


Fig 2. Spatial distribution of technical and market PV potential in Gyeonggi-do

Table 6. Comparison of solar PV potential and actual generation in 2023 across municipalities in Gyeonggi-do

	Technical potential (GWh)	Market potential (GWh) (A)	Actual PV Generation in 2023 (GWh) (B)	Utilization rate of market potential* (%) (A)/(B)	Population density (people/km ²)	Administrative area (km ²)
Gyeonggi-do (Total)	407,131	18,124	2,340	13%	1,389	10,195
Yeoncheon-gun	19,328	4,693	201	4%	62	676
Paju-si	31,355	2,228	125	6%	782	674
Pocheon-si	21,841	2,009	143	7%	191	827
Anseong-si	26,854	1,977	193	10%	377	553
Yangpyeong-gun	18,350	1,357	66	5%	146	878
Gapyeong-gun	9,794	1,150	55	5%	76	844
Yeoju-si	27,735	1,005	212	21%	196	608
Hwaseong-si	44,751	855	304	36%	1,461	698
Yangju-si	11,763	447	54	12%	963	310
Icheon-si	27,056	402	190	47%	505	461
Yongin-si	24,152	386	83	22%	1,872	591
Namyangju-si	12,899	341	50	15%	1,619	458
Ansan-si	8,871	220	63	28%	4,317	156
Pyeongtaek-si	31,245	198	152	77%	1,377	458
Siheung-si	8,669	148	54	36%	3,999	140
Gimpo-si	16,960	130	95	73%	1,853	277
Dongducheon-si	2,082	106	12	11%	952	96
Uijeongbu-si	2,950	96	16	17%	5,742	82
Hanam-si	3,447	83	16	19%	3,569	93
Uiwang-si	2,006	75	8	11%	2,880	54

Seongnam-si	5,712	73	26	35%	6,567	142
Goyang-si	14,593	34	59	171%	4,043	268
Suwon-si	7,935	24	41	173%	10,173	121
Anyang-si	2,277	17	9	50%	9,635	58
Gunpo-si	1,738	17	7	43%	7,191	36
Gwangju-si	10,989	14	58	428%	957	431
Guri-si	1,694	12	6	51%	5,653	33
Gwangmyeong-si	2,219	11	11	100%	7,295	39
Osan-si	2,854	7	19	275%	5,916	43
Bucheon-si	3,823	7	12	184%	14,953	53
Gwacheon-si	1,189	2	3	113%	2,391	36

* Utilization rate of market potential(%) is calculated as: Generation in 2023 ÷ Market potential×100

Note: Municipalities are listed in descending order of market potential.

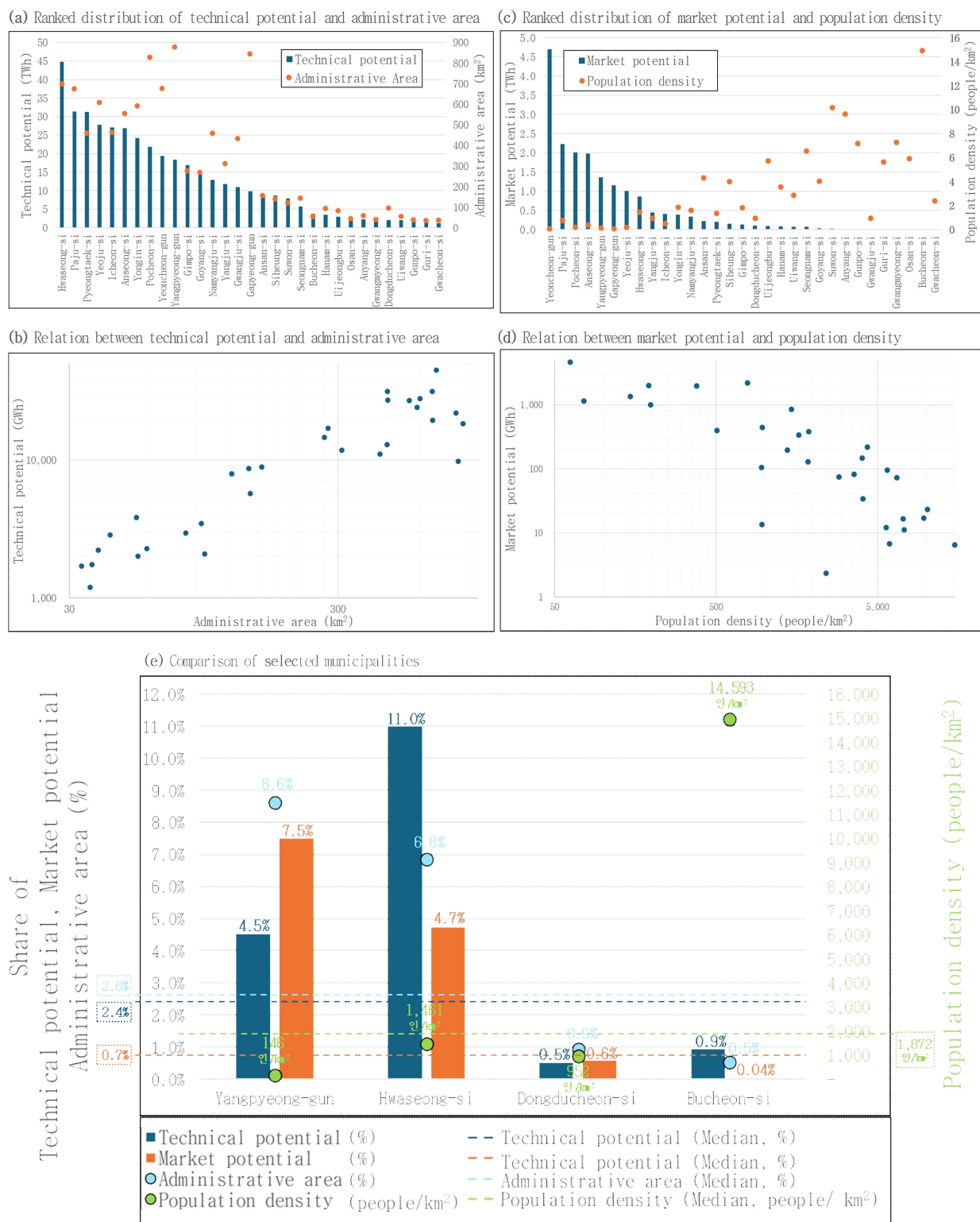


Fig. 3. Spatial and demographic associations with municipal PV potential in Gyeonggi-do

4. 결론

잠재량 활용률의 편차가 크다는 것은 태양광 시장 잠재량의 공간적 분포와 실제 태양광 발전량의 공간적 분포가 일치하지 않음을 의미한다. 시장 잠재량 활용률의 시공간 편차는 단순히 개념적 측면에서의 기술적, 경제적 조건 뿐만 아니라, 현실에서의 다양한 요인들이 복합적으로 작용한 결과로 해석될 수 있다.

GPT:

본 연구는 동일한 분석 방법론 하에서도 일사량 데이터의 출처에 따라 태양광 발전 잠재량 평가 결과가 크게 달라질 수 있음을 경기도를 사례로 실증하였다. 특히 이론적 및 기술적 잠재량은 일사량 입력값에 선형적으로 반응하는 반면, 시장 잠재량은 발전원가(LCOE) 구조에 따른 비선형적 반응 특성으로 인해 데이터 간 격차가 훨씬 더 크게 나타났다.

또한 경기도 내 시군별 시장 잠재량 대비 실제 발전량 실적은 4%에서 400% 이상까지 매우 큰 편차를 보이며, 이는 단순 경제성 외에도 입지 규제, 수용성, 인허가 절차 등 다양한 사회적·제도적 요인이 태양광 보급에 영향을 주고 있음을 시사한다.

수도권인 경기도는 높은 전력수요에도 불구하고 발전 비중이 낮고 재생에너지 보급률 또한 제한적인 구조를 갖고 있다. 이러한 상황에서 지역 내 실현 가능한 태양광 보급 확대는 국가 전력계통 부담 완화, 에너지 자립도 향상, 온실가스 감축이라는 측면에서 전략적으로 중요하다. 향후 연구에서는 비경제적 제약요소, 계통 수용성, 수요 예측 등을 추가적으로 고려하여 보다 현실적인 재생에너지 보급 시나리오를 도출할 필요가 있다.

감사의 글 (돋움체, 12pt)

(바탕체, 10pt)

본 연구는 ***** 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Korea Energy Economics Institute, “Yearbook of Regional Energy Statistics”.
- [2] Korea Energy Agency, “New & Renewable Energy Statistics”.
- [3] Jeon, S., and Kim, H.-S, 2023, “Decomposition Analysis of Greenhouse Gas Emissions in South Korea's Provincial and Local Governments: Identifying the Need for Renewable Energy in Gyeonggi Province”, Environmental and Resource Economics Review, **33**(4), 343-378.
- [4] Koh, J., Kang, C., Kim, D., Kim, J., Lee, J., Ye, M., H

wang, J., Lee, S., and Choi, S., 2023, “Renewable Energy Transition Roadmap for Decarbonizing Power in Gyeonggi-Do”, Gyeonggi Research Institute, Policy Research, <https://www.gri.re.kr/web/contents/resreport.do?schM=view&schPrjType=ALL&schProjectNo=20230061&schBookResultNo=15296>

[5] Kim, J.-Y., Kang, Y.-H, Cho, S., Yun, C., Kim, C.K., Kim, H.-Y., Lee, S.M., and Kim, H.-G., 2019, “Assessment of Energy Self-sufficiency Ratio Based on Renewable Market Potentials for Unit of Local Government”, Journal of the Korean Solar Energy Society, **39**(6), 137-151.

[6] Ministry of Trade, Industry and Energy, and Korea Energy Agency, 2020, “New&Renewable Energy White Paper”, <https://www.knrec.or.kr/biz/pds/pds/view.do?no=326>

[7] Ministry of Trade, Industry and Energy, and Korea Energy Agency, 2018, “New&Renewable Energy White Paper”, <https://www.knrec.or.kr/biz/pds/pds/view.do?no=291>

[8] Korea Institute of Energy Research(KIER), 2025, “Solar energy potential service”, Accessed May 19, 2025, <https://kier-solar.org/user/potential/energy>

[9] Korea Institute of Energy Research(KIER), 2025, “Resource map analysis system”, Accessed May 19, 2025, <https://kier-solar.org/user/gis/map/sl>

[10] National Institute of Meteorological Sciences, 2025, “Solar energy resource map”, Accessed May 19, 2025, <http://www.greenmap.go.kr/kr/inquiry.do?NUM=1>

[11] Korea Institute of Energy Research(KIER), 2025, “Solar Resource Data (COMS-1, GHI)”, Accessed May 19, 2025, <https://www.data.go.kr/data/15066413/fileData.do#tab-layer-file>

[12] Kim, B., Kim, C.K., Yun, C.-Y., Kim, H.-G., Kang, Y.-H., 2024, “System Construction and Data Development of National Standard Reference for Renewable Energy - Model-Based Standard Meteorological Year”, New & Renewable Energy, **20**(1), 95-101.

[13] National Institute of Meteorological Sciences, 2025, “Solar energy resource data”, Accessed May 19, 2025, <http://data.kma.go.kr/data/weatherResourceMap/selectWeatherResourceMapSla.do#>

[14] Ministry of Environment, 2025, “Environmental Geographic Information Service”, Accessed May 19, 2025, <http://egis.me.go.kr/>

[15] Gyeonggi Research Institute, 2025, “0.5m Digital Elevation Model”, internally produced dataset.

[16] Korea Forest Service, 2025, “Landslide Risk Map”, Accessed May 19, 2025, https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/trail/sanSaTae.do?publicDataId=PBD0000210&tabs=4&mn=NKFS_06_08_02&subTitle=%EC%82%B0%EC%82%AC%ED%83%9C%EC%9C%84%ED%97%98%EC%A7%80%EB%8F%84

[17] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2025, “V-World”, Accessed May 19, 2025, <https://www.vworld.k>

r/v4po_main.do

[18] Korea Power Exchange, 2024, “Power Market Statistics”, Accessed May 19, 2025, https://www.kpx.or.kr/board.es?mid=a11204000000&bid=0045&act=view&list_no=74718

[19] Gyeonggi Data Dream, 2025, “Official land price”, Accessed May 19, 2025, <https://data.gg.go.kr/portal/data/service/selectServicePage.do?infId=MSJSXP9RULQIW3Q4A6D934096841&infSeq=1>

(Times New Roman 9.5pt)

- * 본문에서 []안에 참고문헌의 번호를 기재하여 주십시오.
- * 참고문헌 리스트는 본문의 마지막 부분에 기재되어야 하며, 본문에 제시된 순서대로 번호를 기재하여 주십시오.
- * 모든 참고문헌은 영문으로 작성해야 합니다. (영문 Title이 없는)국문 참고문의 경우, 영문으로 번역하여 기재 후 해당 참고문헌을 찾아볼 수 있는 웹주소 (URL, doi)를 함께 기재해주시기 바랍니다.
- * Author와 Title은 빠짐없이 기재하여 주십시오.

1. **Journal의 표기**: author(s), year, “paper title”, journal title, volume, number, pages 순서로 작성해 주십시오.

1) **저자가 1인일 때**: 성, 이.름., 연도, “제목”, 저널명(약어가 있다면 약어로 작성), 권(호), 페이지

[예시] Jung, Y.H., 2015, “Mimicking the Fenton reaction-induced wood decay by fungi for pretreatment of lignocellulose”, *Bioresour. Technol.*, **179**, 467-472.

2) **저자가 2인일 때**: 성, 이.름., and 성, 이.름., 연도, “제목”, 저널명(약어가 있다면 약어로 작성), 권(호), 페이지

[예시] Jung, Y.H., and Kim, H.K., 2015, “Mimicking the Fenton reaction-induced wood decay by fungi for pretreatment of lignocellulose”, *Bioresour. Technol.*, **179**, 467-472.

3) **저자가 3인일 때**: 성, 이.름., 성, 이.름., and 성, 이.름., 연도, “제목”, 저널명(약어가 있다면 약어로 작성), 권(호), 페이지

[예시] Jung, Y.H., Kim, H.K., and Park, H.M., 2015, “Mimicking the Fenton reaction-induced wood decay by

fungi for pretreatment of lignocellulose”, *Bioresour. Technol.*, **179**, 467-472.

4) **저자가 3인~10인 이상일 때**: (10인까지만 작성) 성, 이.름., ... and 성, 이.름., *et al.*, 연도, “제목”, 저널명(약어가 있다면 약어로 작성), 권(호), 페이지

[예시] Jung, Y.H., Kim, H.K., Park, H.M., Jung, Y.H., Kim, H.K., Park, H.M., Park, Y.C., Park, K., Seo, J.H., Kim, K.H., and Kim, G.E., *et al.*, 2015, “Mimicking the Fenton reaction-induced wood decay by fungi for pretreatment of lignocellulose”, *Bioresour. Technol.*, **179**, 467-472.

2. **단행본의 표기**: author(s), year, book title, publisher, town(country) 순으로 작성해 주십시오.

[예시] Strunk Jr., W., and White, E.B., 2000, “The elements of style”, 4th ed., Longman, New York.

[예시] Wolsink, M., 2012, “Wind power: Basic challenge concerning social acceptance”, In: Meyers, R.A. (eds) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, New York.

3. **단행본의 Chapter 표기**: author(s), year, chapter title, editor(s), book title, publisher, town(country), pages 순으로 작성해 주십시오.

[예시] Mettam, G.R., and Adams, L.B., 2009, “How to prepare an electronic version of your article”, in: Jones, G.S., Smith, R.Z. (eds.), “Introduction to the electronic age”, E-Publishing Ins, New York, pp. 281-304.

4. **Conference Proceedings of Book 표기**: author(s), year, paper title, proceedings (editor) or book, pages 순서로 작성해 주십시오.

[예시] Peterson, H., 1984, “Fatigue testing of wood composites for aerogenerator rotor blade”, *Proc. 6th BWEA Wind Energy Conference*, 239-255.

5. 보고서 표기

1) **공개된 내용**(PDF 파일로 확인이 가능하거나 인쇄물 등)일 경우, 바로 확인할 수 있는 URL주소나 pdf링크 주소(doi가 있다면 doi를 기입해주세요)를 기입: **저자 (성, 이.름. 또는 기관명), 연도, “제목”, 발행기관, URL.**

[예시] Lee, T.E., and Lee, Y.S., 2020, “Expansion of renewable energy and the direction of stable operation of electric power systems in Jeju Island”, *Energy Economics Institute, Energy Focus*, 48-63, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiRhveKivH3AhX9zIsBHeJBCZUQFnoECBgQAw&url=http%3A%2F%2Fwww.keei.re.kr%2Fkeei%2Fdownload%2Ffocus%2Fef2012%2Fef2012_70.pdf&usg=AOvVaw0UYT5MaPW9VtqLifTV2I7x.

2) **비공개 내용**일 경우, URL 링크 없이 작성: **저자 (성, 이.름. 또는 기관명), 연도, “제목”, 발행기관.**

[예시] H2KOREA, 2019, “Internal data on the unit price of water electrolyte and hydrogen storage power generation”.

6. 웹페이지 표기: 저자(성, 이.름, ...), 작성 연도, “제목”, 접속날짜(Accessed DD MM YYYY), URL. 순서로 작성해주십시오.

[예시] Goos, E., Burcat A., and Rusic B., 2009, “Third millenium thermodynamic database for combustion and air pollution use”, Accessed 11 June 2022, <http://garfield.chem.elte.hu/Burcat/BURCAT.THR>.

1)인터넷 뉴스 기사: 발행기관, “기사 제목”, 발행연.월.일.

[예시1] ET News, “[Analyzing issues] NDC Up in 2030... achievable only with 100 GW of renewable energy”, 2021.10.26.

[예시2] YONHAPNEWS, “Rapid increasing about the number of local governments adopting the separation distance regulations for photovoltaic”, 2020.10.07., <https://www.yna.co.kr/view/AKR20201006159800003>.

7. 학위논문 표기: 연구자명, 학위 수여 연도, “논문 제목”, 학위명, 학위 수여 기관명, 소재지 순서로 작성해 주십시오.

[예시] Bak, H.M., 2016, “Estimation of yield capacity of fractured rock aquifer for multi-well groundwater heat pump system”, M.S. thesis, Chonnam National University, Gwangju.

8. 특허권 표기: 다음과 같은 기본적인 정보, 즉 '특허권자, 등록년도, “특허의 명칭”, 등록국가, 등록번호, 등록날짜 (publication)' 순서로 작성해 주십시오.

※ 여기에서 등록년도는 특허를 출원한 연도와 다르므로 유의하여야 한다.

[예시] Choi, J., Lee, J., and Kang, S., 2019, “Method of optimizing capture matrix”, KR Patent No. 1020190063688, June 10, 2019.

9. 법령 표기: 기관, 제정연도, “법(시행령)명”

[예시] Ministry of Legislation, 2022, “Basic Act on Carbon Neutral and Green Growth to Respond to the Climate Crisis”.

10. 고시 및 공고 표기

[고시 예시] Ministry of Trade, Industry and Energy, “고시 제목(영문)”, Notice No. 2022-031, URL.

[공고 예시] Ministry of Trade, Industry and Energy, “Partial revision (amendment) of the Korean electric facilities regulations administrative notice”, Announcement No. 2022-811, https://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce3/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=68017&bbs_cd_n=6¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=&biz_anc_yn_c=.