

기초지방자치단체별 보급 가능한 재생에너지 시장잠재량을 이용한 에너지 자립률 평가

김진영* · 강용혁** · 조상민*** · 윤창열**** · 김창기***** · 김하양***** · 이승문*** · 김현구***

*한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 선임기술원
 **한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 책임연구원
 ***에너지경제연구원 신재생에너지팀, 연구위원
 ****한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 선임연구원
 ***** (전)한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 연구원

Assessment of Energy Self-sufficiency Ratio Based on Renewable Market Potentials for Unit of Local Government

Kim Jin-Young* · Kang Yong-Heack** · Cho Sangmin*** · Yun Changyeol**** · Kim Chang Ki***** · Kim Ha-Yang***** · Lee Seung Moon*** · Kim Hyun-Goo***

*Senior Engineer, New and Renewable Energy Data & Policy Center, Korea Institute of Energy Research
 **Principal Researcher, New and Renewable Energy Data & Policy Center, Korea Institute of Energy Research
 ***Research Fellow, New and Renewable Energy Research Team, Korea Energy Economics Institute
 ****Senior Researcher, New and Renewable Energy Data & Policy Center, Korea Institute of Energy Research
 *****Researcher, New and Renewable Energy Data & Policy Center, Korea Institute of Energy Research

†Corresponding author: hyungoo@kier.re.kr

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
 Vol.39, No.6, pp.137-151, December 2019
<https://doi.org/10.7836/kjes.2019.39.6.137>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 18 December 2019

Revised: 26 December 2019

Accepted: 30 December 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

This study estimated the available renewable market potential based on Levelized Cost Of Electricity and then assessed the renewable derived energy self-sufficiency for the unit of local government in South Korea. To calculate energy self-sufficiency, 1 km gridded market renewable generation and local government scale of final energy consumption data were used based on the market costs and statistics for the recent three years. The results showed that the estimated renewable market potentials were 689 TWh (Install capacity 829 GW, 128 Mtoe), which can cover 120% of power consumption. 55% of municipalities can fully replace the existing energy consumption with renewable energy generation and the surplus generation can compensate for the rest area through electricity trade. However, it was confirmed that, currently, 47% of the local governments do not fully consider all renewable energy sources such as wind, hydro and geothermal in establishing 100% renewable energy. The results of this study suggest that energy planning is decentralized, and this will greatly contribute to the establishment of power planning of local governments and close the information gap between the central government, the local governments, and the public.

Keywords: 재생에너지(Renewable energy), 시장잠재량(Market potential), 최종에너지 소비(Final energy consumption), 에너지 자립률(Energy self-sufficiency ratio), 균등화발전비용(Levelized Cost Of Electricity), 기초지방자치단체(basic unit of local government)

기호설명

- GW : Gigawatt[-]
 AGL : Above Ground Level[m]
 IEA: International Energy Agency[-]
 RE : Renewable Energy[-]
 LCOE : Levelized Cost of Electricity[won/kWh]
 I_t : t facility investment costs[won]
 M_t : t maintenance costs[won]
 F_t : t fuel costs[won]
 E_t : t power generation[kWh]
 r : discount rate[%/year]
 n: facility lifetime[year]
 SMP : System Marginal Price[won/kWh]
 REC : Renewable Energy Certificate[won/kWh]
 kWh: kilowatt hour[-]
 TWh: terawatt hour[-]
 toe: tonne of oil equivalent[-]
 Mtoe: Million tonne of oil equivalent[-]
 Std: Standardization[-]
 P50: 50th percentile[-]

1. 서론

전 세계는 환경을 고려한 재생에너지의 공급을 늘려 에너지전환을 이루고자 하는 추세에 있다¹⁾. 우리나라도 친환경적인 에너지 이용을 확대하고자 태양광과 풍력을 중심으로 재생에너지 보급 확대 정책을 수립하고 이행하면서 에너지전환을 고려한 에너지믹스가 이루어지기 시작했다. 현재 한국의 재생에너지는 1차 에너지 대비 공급비중 5.55%를 차지한다²⁾. 이는 주요 선진국인 독일 29.3%, 미국 14.9%, 일본 15.9%에 비해서 많이 낮은 수준이어서, 정부는 지속적으로 재생에너지를 늘릴 계획을 추진하고 있다. 국가 에너지전환 로드맵 및 제 3차 에너지기본계획에 따르면, 2030년 재생에너지 발전량 비중을 20% (48.7 GW)까지 늘릴 계획이 있다^{3,4)}. 그리고 정부는 국민의 자발적인 재생에너지 발전사업 확대를 위하여 상계제도 개선, 한시적 발전차액지원제도와 협동조합 및 농민과 개인사업자를 지원하는 제도, 계획입지제도 도입 등 다각적인 측면의 정부 정책 및 지원제도

를 마련하고 있다³⁾. 자발적인 국민과 지자체의 참여를 유도하기 위해서는 지역에너지 사업을 위한 제도 개선뿐만 아니라 공급 가능한 여건을 판단할 지역 재생에너지의 정보가 필요하다^{5,6)}.

이 점을 감안하여 제 3차 에너지기본계획에서는 국가단위의 에너지 빅데이터 플랫폼 구축을 통해 에너지 전환 촉진을 위한 기반 확충하기로 계획되었다⁴⁾. 한국에너지공단에서는 태양광 발전을 대상으로 소비자 사업 부지에서 사업성을 평가할 수 있는 재생에너지 클라우드 플랫폼(REcloud)을 오픈 서비스 하고 있다⁷⁾. REcloud는 태양광 에너지의 잠재량 특성을 제시하고 있다. 하지만 분석요소는 이론적 잠재량을 가늠할 수 있는 일사량과 일조울만을 제시하고 있다. 이미 제 2차 에너지기본계획 단계부터 자원량 기준의 이론적 잠재량이 아닌 지리적, 기술적 잠재량 이후 실제적으로 필요한 시장잠재량 산정이 필요하다고 제시된 바 있었다⁸⁾. 그래서 한국에너지기술연구원에서는 국외 시장잠재량 산정모델을 검토하여 환경규제 및 정책적 지원 영향요인을 반영한 한국형 시장잠재량 모델에 기반을 둔 시도별 잠재량 통계를 공개하였다^{8,9)}. 이때 이미 모든 재생에너지원(태양광, 태양열, 풍력, 수력, 해양, 지열, 바이오매스, 폐기물)을 고려하였다. 그 외 기존의 학술적 선행연구를 살펴본 결과, 아직도 대부분 특정 재생에너지원에 대한 기술적 잠재량 수준의 공급 가능 잠재량을 산정 수준에 머물러 있었다¹⁰⁻²¹⁾. 경제비용을 고려한 시장잠재량은 극히 드물다²²⁻²⁵⁾. 김현구^{21,22)}이 선제적으로 기술적 자원량을 경제성 기준(> 200 W/m²/70m AGL와 > 350 W/m²/100m AGL)을 반영하여 공급 가능한 잠재량으로 간단하게 검토하였고 실제 비용함수에 근간한 산업공정열에 대한 시장잠재량을 산정한 김진영²⁴⁾과 에너지경제연구원²⁵⁾이 유일하다. 그리고 이들 역시 통합 재생에너지원 전체를 포함하지 않으며 통합 재생에너지원의 시장잠재량 산정한 학술논문은 전무한 실정이다.

그리고 재생에너지 시장 잠재량은 사회경제적 가치를 고려한 보급 가능한 에너지량이지만, 실제 에너지 공급 여건에 따라 실질적인 보급 에너지량은 달라질 수 있다^{26, 27, 28)}. 실제 재생에너지 3020 이행점검에서 재생에너지 사업이 반드시 시장잠재량이 높은 곳에서 진행되는 것은 아님이 확인되었다. 최근 Top-down 방식의 국가 재생에너지 보급 확대 전략에서 bottom-up 역할을 강조한 국민의 자발적 사업 참여에 인한 재생에너지 효율적인 보급 확대 전략으로 수정된 것도 그 맥락이 같다. IEA에서는 재생에너지 공급 여건을 추가적으로 감안하여 에너지 효율에 대한 지표인 에너지 자립도 및 에너지 강도 등을 국가별로 모니터링 하고 있다²⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 재생에너지원별 기술적 잠재량 입지지도 데이터를 활용하여 육상에서의 통합재생에너지원(태양광, 태양열, 풍력, 수력, 지열, 바이오매스)에 대한 시장잠재량을 산정하고 시장잠재량 분석 해상도에 맞춰서 에너지 효율의 지표를 추가 해석하여 재생에너지의 지역별 에너지 공급량뿐만 아니라 공급 효율성을 분석하고자 한다. 논문 구성은 다음과 같다. 2장에서 자료를 간략하게 설명하고, 재생에너지 시장잠재량 산정 및 에너지 자립률 연산 과정을 설명한다. 현재 공개된 시도단위보다 상세한 공간해상도로 업그레이드된 재생에너지 시장잠재량 산정 결과 및 에너지 자립률은 3 ~ 4장에 제시하였고 이를 바탕으로 지자체별로 수립된 지역 에너지 계획에 대한 의견을 5장에서 포함하였다. 마지막으로 6장에서 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 재생에너지 잠재량과 최종전력 소비량 데이터

본 연구에서는 기초지방자치단체별 수요대비 공급 가능한 재생에너지의 지역별 특성을 분석하기 위해서 수집된 공급량과 소비량 데이터는 각각 산업부⁶⁾에서 생산한 통합 재생에너지의 발전량 단위의 기술적 잠재량과 한국전력공사에서 모니터링된 전력소비량 데이터이다.

시군구 통계자료에 기반으로 하는 바이오매스에너지의 기술적 잠재량을 제외하고 재생에너지원들의 기술적 잠재량은 현재 설비가 활용가능한 자원량(예, 이용률, 효율을 이용한 발전 환산)을 기초로 산정된 것이다^{8,9)}. 자료는 1 km² 격자간격의 공간해상도를 가지고 있고, 전 국토를 대상으로 총 10만개로 격자로 구성되어 있다. 이들의 기술적 잠재량의 기초자원량은 한국전력통계정보시스템의 발전량 통계와 실운영데이터를 바탕으로 검증을 통해 신뢰성이 확보된 자료를 활용하였다^{10,11,13,17,29-34)}. 태양광과 태양열에너지는 위성영상에서 추정된 수평면 일사량을 측정자료(1982~)로 보정하여 오차 9.1 ~ 15.5% 정도의 내외의 격자 단위 데이터를 활용하였다. 풍력에너지를의 중규모 및 상세규모 수치모델링에 의한 풍속 자료를 기초로 표준설비 해석한 이용률 자료를 전력통계자료로 보정하여 0.75%의 상관성을 갖는 자료를 활용하였다. 전력통계자료에 도출된 소수력 표준이용률 40%를 기준으로 지역별 유량 및 낙차에 의한 발전량과 용량을 산정하였으며, 천부지열에너지의 지중온도와 열전도도는

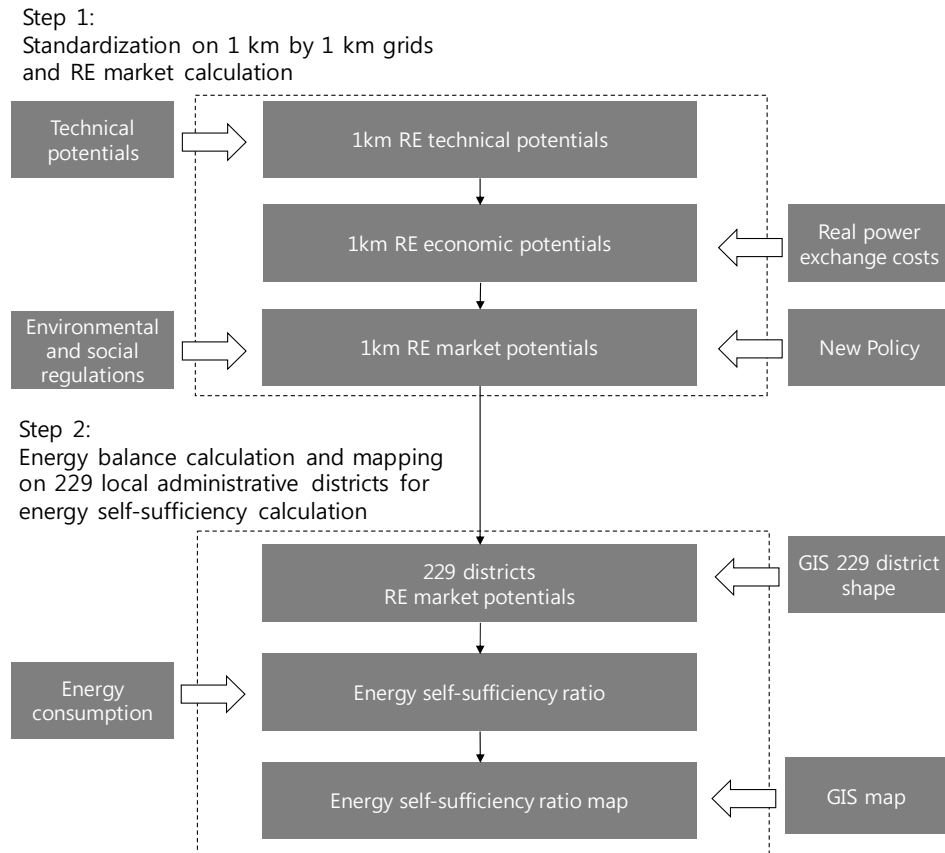


Fig. 1 Schematic diagram of energy self-sufficiency calculation steps

한국에너지공단의 실제 지중열전도도시험 측정 자료를 활용하여 히트펌프에 의한 채열량과 전문가 협의에 의한 표준설비용량을 격자별로 산출하여 활용하였다. 그리고 전력소비량은 한국전력공사에서 2016 ~ 2018년의 최근 3년간 모니터링한 229개 기초지방자치단체 단위의 자료를 수집하였다. 이때 전기요금 계약방식에 따라 분류된 주택용, 일반용, 교육용, 산업용, 농사용, 가로등, 심야 부문 자료를 합성하여 통합된 소비량으로 활용하였다.

2.2 에너지 자립률 산정 및 맵핑 방법

그리고 본 연구에서 에너지 자립률 연산은 크게 두 단계로 나뉜다(Fig. 1). 1단계는 재생에너지 공급 가능한 시장잠재량 산정과정이고, 2단계에서 에너지 소비량을 고려한 에너지 자립률을 실제 계산하고 맵핑하였다.

시장잠재량은 서로 다른 재생에너지원들을 동일한 기준으로 비교하기 위해서 발전량 단위(kWh)당 평균 발전 비용인 균등화 발전 원가(Leveled Cost of Electricity, 이하 LCOE)에 기초한다. LCOE 산정식은 식(1)과 같다.

$$\sum_{i=1}^{Potential\ grid} LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

여기서 i 는 기술적 잠재량의 각 격자점을 가리킨다. 그리고 I_t 는 t 기의 설비투자비, M_t 는 t 기의 운영유지비, F_t 는 t 기의 연료비, E_t 는 t 기의 발전량, r 은 할인율, n 은 설비수명을 의미한다. LCOE 기본 가정은 신재생에너지백서⁵⁾에 자세히 제시되어 있다.

본 연구에서 산정한 시장잠재량은 LCOE가 계통한계가격(System Marginal Price, 이하 SMP)보다 큰 지역은 제외하고 남는 경제성이 있는 지역(경제적 잠재량)이거나, 정부의 정책적 지원 및 규제 사항에 의해 시장보급 여건이 좋은 지역들만 선택하여 합산된 잠재량이다. 연산식은 식(2)와 같다.

$$\sum_{i=1}^{Potential\ grid} RE\ potential, \text{ if } (LCOE \leq SMP + REC) \quad (2)$$

최근 시장여건을 반영하여 2016 ~ 2018년까지 최근 3년간 평균 SMP와 REC를 각각 95.16원/kWh, 87.83원/kWh를 활용하였다³⁵⁾. 그리고 규제사항은 Table 1에 제시된 현재 환경, 산림, 토지이용계획 등을 격자별로 입력하여 반영하였다³⁶⁾.

Table 1 Specification of social exclusion criteria and factors

Categories	Sub-categories
Landuse area	Scenic area
	Aesthetic district
	Fire zone
	Disaster prevention district
	Maintenance district
	Settlement district
	Airport
Heritage area	Downtown
	Cultural heritage reserve
	Country designation
	Designation
Ecology area	Registered cultural property
	Grade 1
Undeveloped area	Separately managed area
	Baekdudaegan Sanctuary area
	Wildlife sanctuary
	Fisheries resources reserve
	Local plan absolute conservation
	Nature park
	Absolute conservation
	Natural environment conservation area
	DMZ
	Shooting range
	Cable
Natural monument habitat	
Topography 1000 m	
Road space 100 m	

그 다음, 앞서 산정한 재생에너지 시장잠재량과 비교하여 에너지 자립률은 229개 공간 벡터 데이터로 변환하여 기초지자체별 공간해상도에서 식(3)과 같이 연산하였다.

$$\sum_{i=1}^{City\ and\ district} \frac{RE\ potential}{Final\ electricity\ consumption} \times 100 \tag{3}$$

최종 지자체별 잠재량, 에너지자립률은 WGS1984 좌표계에 표준화된 지형공간상에 맵핑하여 지도를 제작하였다.

3. 통합 재생에너지의 시장잠재량

태양광, 태양열, 풍력, 수력, 지열, 바이오매스 에너지에 대한 기술적 잠재량을 활용하여 최근 지원 정책에 따른 시장거래 가격을 고려하여 통합 재생에너지에 대해 공급 가능한 시장잠재량을 시군구 단위로 산정하였다. 통합 재생에너지의 연간 시장잠재량은 총 689 TWh (설비용량 829 GW, 석유환산톤 128 Mtoe)이고, 최근 3년간 전력소비량(510 TWh)의 120%에 이르는 것으로 확인된다(Fig. 2). 전체 재생에너지 공급 가능량에 대해 재생에너지원별 비율을 비교해보면, 태양광 에너지 > 태양열 에너지 > 풍력 에너지 > 지열 에너지 > 수력 에너지 > 바이오매스 에너지 순으로 발전 잠재량이 많았다.

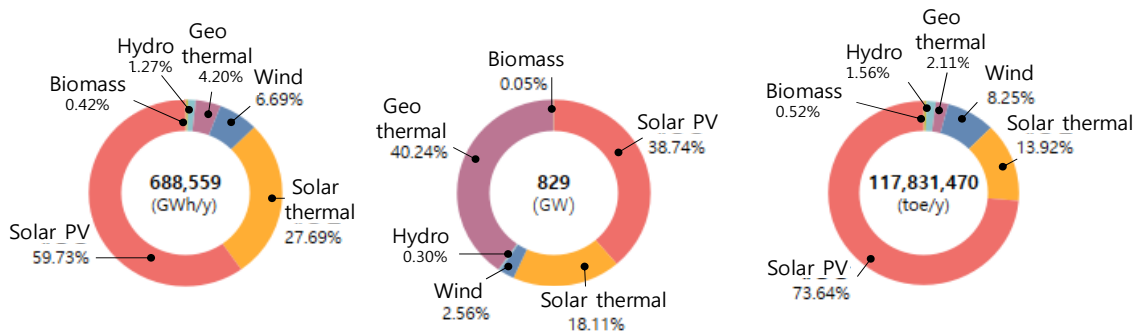


Fig. 2 Market potential share(%) of each renewables in electricity generation in South Korea

각 에너지원은 설비 성능과 활용비용의 특성이 매우 다르다³⁷⁾. Table 2는 각 에너지원의 기술적 그리고 시장경제적 영향요인들을 정리한 것이다. 시장경제성을 갖는 균등화발전비용은 수력과 풍력이 작고 그 다음 태양에너지 순이다. 하지만 태양광, 태양열, 그리고 지열 에너지는 산지가 설비의 입지제약으로 제외되었음에도 불구하고 공급 가능한 발전 잠재량이 상대적으로 크게 산정되었다. 이는 설비의 입지밀도가 높거나(풍력에 비해) 시스템 규모가 크기(수력에 비해) 때문인 것으로 보인다. 한편 바이오매스에너지의 균등화발전비용이 제일 크게 나왔다. 바이오매스를 제외하고 최종 시장잠재량 산정 기준이 된 균등화발전비용은 국외 연구결과와 유사한 것으로 확인되었다^{38,39,40)}.

Table 2 Details of techno-economical areas for each renewables in South Korea

Resources	Technical impact factors		Market impact factors		
	Suitable area (km ²)	Total system LCOE (Won/kWh)		Regulation area (km ²)	Suitable area (km ²)
		Mean	Area (km ²)		
Solar PV	36,457	132.62 (±8.10)	34,786	20,230	14,556
Solar thermal*	36,457	-	1,499	-	1,499
Wind	81,212	129.91 (±22.52)	37,848	8,752	11,578
Hydro	78,667	122.68 (±27.93)	6,063	4,350	1,713
Geothermal*	36,457	-	1,499	-	1,499
Biomass	81,212	162.91	19,578	-	19,578

*Solar thermal and geothermal were considered only for heating, air-conditioning, and hot water supply in the building.

보다 구체적으로 원별 특성을 살펴보면, 태양광에너지는 균등화발전비용이 높은 지역이 설비입지 대상지의 95%이고 이 중의 58%가 도시환경규제로 제외되어 총 설비입지 대상지 40%가 411 TWh (321 GW)의 시장경제성이 있는 것으로 나타났다. 반면 태양열에너지와 지열에너지는 지금까지 보급된 온수냉난방용 건축물만 고려하였기 때문에 전국의 1.5%인 대상지에 대해 각각 191 TWh (150 GW), 29 TWh (334 GW) 정도였다. 풍력에너지는 균등화발전비용이 높은 지역이 설비입지 대상지의 47%였고 이 중의 이 중에서 도시환경규제로 제외하고 시장경제성 있는 24%의 대상지에 시잠재량이 47 TWh (21 GW) 있는 것으로 나타났다. 수력에너지는 하천에서의 소규모 수력 설비를 고려했기 했기 때문에 잠재량은 9 TWh (2 GW) 정도였다. 그리고 바이오매스 에너지를 구성하는 농산, 임산, 축산, 도시폐기 발생원에 대한 환경규제는 거의 없으므로, 시장잠재량은 시장경제성이 있는 돈분, 음폐수, 하수슬러지만 포함되어 해당 건축물 대상지에서 발전 잠재량이 3 TWh 정도였고 설비용량은 미미했으며 그 외 바이오매스 자원량은 시장잠재량에서 제외된다. 따라서 재생에너지원 마다 시장잠재량에 영향을 미치는 기술적, 지원정책에 의한 발전비용과 도시계획 및 환경 규제 등의 요인들이 원마다 그 기여도가 다르게 나타났다.

4. 재생에너지기반 에너지 자립률

Fig. 3은 기초 지자체 단위 에너지 자립도를 지형공간상에 제시하였다. Table 3과 Fig. 4에는 지역별로 에너지 자립률에 대한 정량적인 통계결과를 제시하고 막대그래프로 요약하여 정리하였다. 무색 또는 하얀색은 에너지 자립률이 낮은 지역을, 붉은 색은 에너지 자립률이 높은 지역을 나타낸다. 먼저 100% 재생에너지 대체가 가능한 지역만 표시하였다.

앞서 확인한 바와 같이 신재생에너지에 의한 전국 에너지 자립도는 120%에 이르고, 주된 보급 전략원인 태양광 풍력만으로도 국내 에너지 자립도는 81%에 이른다(Table 4). 통합재생에너지원에 의한 20% 이상, 그리고 100% 에너지 자립이 가능한 시군구는 각각 전체 시군구의 98%와 55%에 해당된다. 광역시와 경기도에서 에너지 자립률이 현저히 낮아 제외된 것을 확인할 수 있다. 이는 광역지자체의 대부분이 100% 이상 자립률을 이룬다는 과제 추정량을 지역적으로 보정한 결과이다. 그리고 각 시군구가 속한 동일한 광역지자체 내에서도 에너지 자립률 편차가 0 ~ 3,894% 범위에서 매우 크게 나타났다. 이는 광역지자체기준 에너지 자립률 최대 931%의 약 4배에 이른다. 실제 에너지 자립률이 100% 이상인 기초지자체가 광역시내에서도 포함되었으며 인천광역시 옹진군(973%), 강화군(388%), 광주광역시 남구(225%), 광산구(121%), 부산광역시 기장군(203%), 세종특별자치시(132%), 대구광역시 달성군(125%), 동구(110%), 대전광역시 동구(108%) 지역이 해당된다. 대체로 에너지 소비대비 재생에너지 공급량이 풍부하여 에너지 자립률이 높은 지역은 충청이남지방에 산발적으로 위치한다. 기초지자체의 100% 이상 재생에너지 대체 후, 잉여 시장잠재량이 178 TWh에 이른다. 에너지 자립률 10분위수에 포함되는 빗금친 지역(964 GWh 이상)은 강원도와 경상북도 경계의 시군구, 경상남도와 전라북도 경계 시군구, 전라남도 도서 시군구 등에 해당된다. 이들의 시장잠재량은 전체 잉여 시장잠재량의 53.9%를 차지한다.

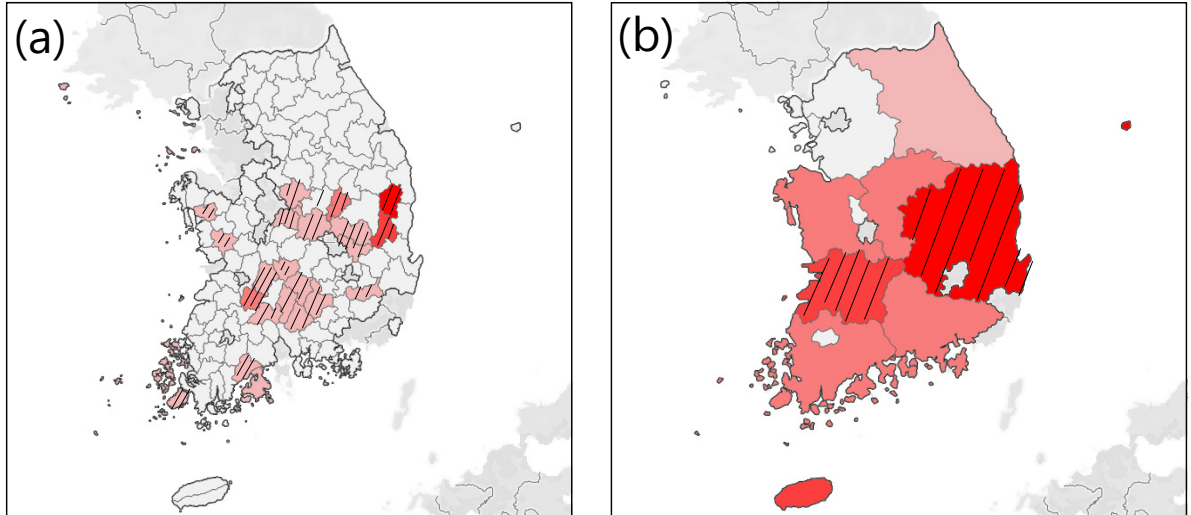


Fig. 3 Geospatial distribution of energy self-sufficiency ratios in (a) local and (b) regional scale of governments

Table 3 Quantitative summary on the level of energy self-sufficiency

Category	Energy self-sufficiency (%)					
	Mean (Std)	Minimum	Maximum	P50		
Metropolitan city scale	Gwangju (R5)	119(62)	74	225	92	
	Daegu (R6)	80(29)	43	125	77	
	Daejeon (R7)	70(27)	36	108	67	
	Busan (R8)	60(40)	33	203	48	
	Seoul (R9)	35(10)	17	54	36	
	Sejong (R10)	132(-)	-	-	-	
	Ulsan (R11)	49(30)	9	87	57	
	Incheon (R12)	164(306)	16	973	34	
	Province scale	Gyeonggi-do (R1)	127(147)	26	624	68
		Gwangwon-do (R2)	331(183)	59	676	204
		Gyeongsangnam-do (R3)	544(547)	60	1576	307
		Gyeongsangbuk-do (R4)	847(931)	44	3894	469
Jeollanam-do (R13)		479(387)	18	1415	372	
Jeollabuk-do (R14)		652(501)	52	1622	608	
Jeju-do (R15)		582(136)	485	678	582	
Chungcheongnam-do (R16)	424(317)	48	1120	402		
Chungcheonbuk-do (R17)	454(391)	68	1199	338		

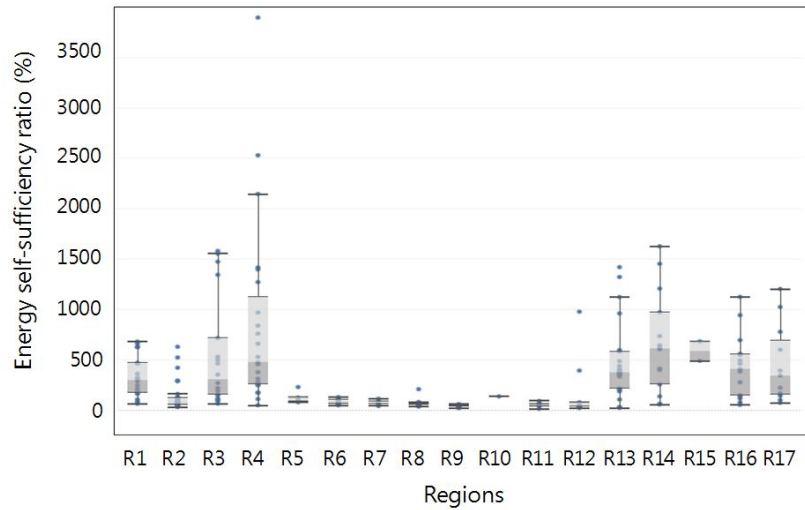


Fig. 4 Bar chart of energy self-sufficiency in regions

5. 토론

현재 광역지자체는 국가에너지계획의 목표 달성과 지역경제 발전을 위하여 지역에너지 계획 수립이 법제화 되어 있다⁴⁰⁾. 이때 신재생에너지를 활용한 에너지 공급도 의무적으로 고려해야 한다⁴¹⁻⁵⁸⁾. 실제 신재생에너지 계획을 수립중인 지자체를 중심으로 지역에너지 계획에서의 보급 전략이 지역 재생에너지 특성을 충분히 반영 하고 있는지 본 연구에서 앞서 산정된 보급 가능한 재생에너지원의 시장잠재량과 에너지 자립률을 비교분석할 필요가 있다.

Table 4는 지금 공시된 지역에너지 계획에 포함된 보급 전략화한 재생에너지 유무와 본 연구에서 새롭게 산 정된 재생에너지 시장잠재량을 비교하였다. 시기는 다르지만 전국 17개 광역단위 지자체에서 지역에너지계획 에서 재생에너지원의 보급 전략이 자연환경의 특성을 고려하여 지역마다 다르게 나타난다. 광역지자체들이 대 부분 대표 공급원은 태양광인 반면 주요 대도시들은 건물 밀집도 때문에 태양열에너지의 기여가 큰 것으로 나 타났다. 즉 광역지자체의 면적을 고려하면 우리나라에서의 시장잠재량 공급 기여율은 태양광에너지가 매우 우 세하다. 서울시의 경우 수력을 전력 보급원으로 계획하고 있으나 실제 시장경제성을 갖은 시장잠재량은 없는 것으로 나타났고, 울산과 충청북도 등 광역지자체의 47%가 시장 경제성이 있는 재생에너지원을 충분히 고려하 지 않고 있었다. 특히 후자의 경우 충분히 고려하지 재생에너지원은 태양열, 풍력, 수력이 해당된다. 따라서 에 너지 자립을 위해 지자체들은 지역별 활용 가능한 재생에너지원의 지역별 특성을 재검토해야 할 것으로 보인 다. 그와 동시에 재생에너지원의 공급량을 충분히 고려하더라도 Fig. 5에서 확인한 바와 같이 에너지 소비량이 많으면 에너지 자립률이 낮기 때문에 주변으로부터의 확보방안도 마련해야 한다.

Table 4 Regional renewable portfolio and estimated market potentials. Italics indicates a major contributor resource

	Seoul (2015)		Busan (2018)		Daegu (2015)		Incheon (2014)		Gwangju (2014)		Daejeon (2012)	
	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential
Solar PV	○	0.8 TWh	○	2.1 TWh	○	4.5 TWh	○	4.0 TWh	○	4.9 TWh	○	1.6 TWh
Solar thermal	○	11.8 TWh	-	8.2 TWh	○	6.3 TWh	○	6.2 TWh	-	3.9 TWh	○	3.6 TWh
Wind	-	-	○	0.05 TWh	○	0.02 TWh	○	0.4 TWh	-	0.02 TWh	○	-
Hydro	○	-	-	-	○	0.2 TWh	-	-	-	-	○	0.4 GWh
Geothermal	○	2.4 TWh	-	1.2 TWh	○	1.1 TWh	○	1.1 TWh	○	0.7 TWh	○	0.6 TWh
Biomass	○	0.3 TWh	○	0.1 TWh	○	0.1 TWh	○	0.01 TWh	○	0.03 TWh	○	0.05 TWh
Resources	Ulsan (2017)		Sejong (2015)		Gyeonggi-do (2015)		Gwangwon-do (2015)		Chungcheonbuk-do (2017)		Chungcheong nam-do (2016)	
	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential
Solar PV	○	3.2 TWh	○	2.6 TWh	○	47.4 TWh	○	29.0 TWh	○	36.9 TWh	○	63.1 TWh
Solar thermal	-	4.2 TWh	○	1.1 TWh	-	35.7 TWh	○	8.6 TWh	-	9.7 TWh	○	15.4 TWh
Wind	○	0.2 TWh	-	-	○	0.5 TWh	○	2.9 TWh	-	1.5 TWh	○	5.6 TWh
Hydro	-	0.8 GWh	-	0.01 TWh	○	2.2 TWh	○	0.9 TWh	-	0.6 TWh	○	0.8 TWh
Geothermal	○	0.6 TWh	○	0.2 TWh	-	5.9 TWh	○	1.0 TWh	○	1.5 TWh	○	2.4 TWh
Biomass	-	0.09 TWh	-	-	○	0.7 TWh	○	0.01 TWh	○	0.1 TWh	○	0.3 TWh
Resources	Jeollabuk-do (2017)		Jeollanam-do (2017)		Gyeongsangbuk-do (2015)		Gyeongsang nam-do (2015)		Jeju-do (2012)			
	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential	Dissemi nation scenario	Estimated market potential		
Solar PV	○	38.2 TWh	○	30.7 TWh	○	84.7 TWh	○	39.3 TWh	○	18.3 TWh		
Solar thermal	-	14.2 TWh	○	17.3 TWh	○	21.0 TWh	○	20.1 TWh	○	3.3 TWh		
Wind	○	1.7 TWh	-	7.3 TWh	○	0.2 TWh	○	3.2 TWh	○	6.1 TWh		
Hydro	-	0.4 TWh	-	0.1 TWh	○	0.9 TWh	○	2.7 TWh	-	-		
Geothermal	-	2.2 TWh	○	2.2 TWh	○	2.8 TWh	○	2.6 TWh	○	0.4 TWh		
Biomass	○	0.3 TWh	○	0.2 TWh	○	0.2 TWh	○	0.3 TWh	○	0.02 TWh		

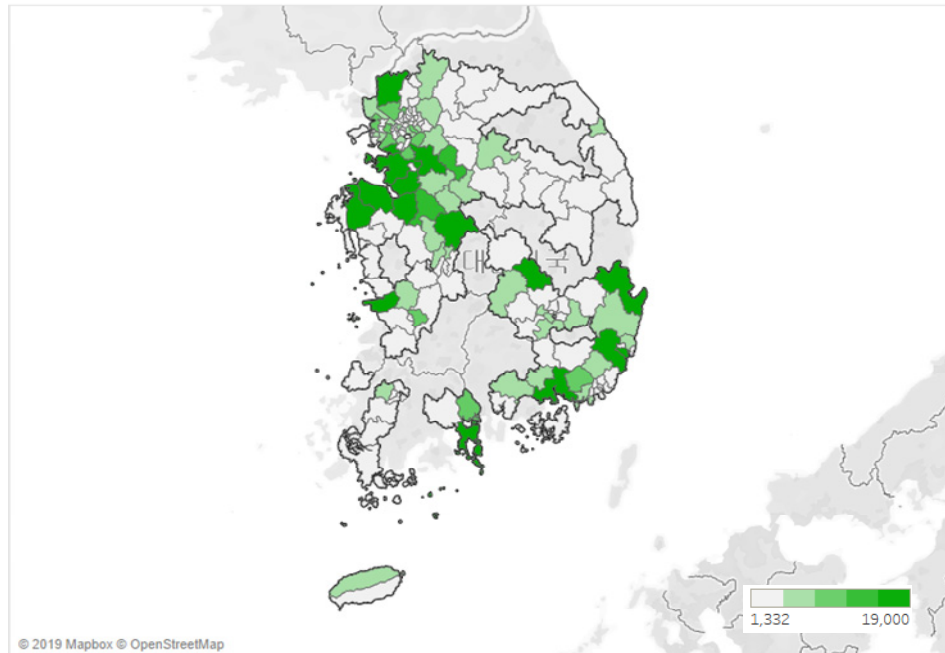


Fig. 5 Geospatial distribution of electricity consumption with the 50th percentile as reference (units: GWh)

6. 결론

본 연구에서는 최근 3년간의 시장거래 및 지원정책 비용을 고려하여 실제 육상에서 활용 가능한 통합 재생에너지의 시장잠재량을 산정하고 동일한 분석기간에 수집된 전력소비량 통계를 활용하여 에너지 자립률 지도를 국내 처음으로 제작하였다. 새롭게 제시된 에너지 자립률은 환경에 대한 재생에너지 공급 효율성을 나타내는 종합적인 지표이므로 재생에너지 공급여건에 대한 보다 현실적인 분석이 가능하다. 재생에너지에 기반을 둔 에너지 자립률의 지역별 특성, 그리고 지역별로 공급 가능한 개별 에너지원을 분석한 결과, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 전국 단위에서 통합 에너지원의 공급 가능한 시장잠재량은 기존 전력소비량의 120%를 대체(에너지 자립률)할 수 있음을 확인하였다. 또한, 전체 229개 시군구 중에서 55%는 기존 에너지 수요를 100% 대체하고도 재생에너지 공급 가능한 대상지가 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 에너지 자립률은 분석에 필요한 에너지 소비량과 공급 가능한 시장잠재량의 분석 자료의 공간 해상도에 크게 달라진다. 광역지방자치단체단위 에너지 자립률(~931%) 대비 기초지방자치단체별 에너지 자립률(~3894%)의 최대 에너지 자립률이 4배 까지 차이가 난다. 기존 선행연구⁴⁾와 유사하게 광역지자체별 분석결과 에너지 자립률이 100% 이상인 지역은 제주도, 경상북도, 강원도, 전라북도, 충청북도, 충청남도, 경상남도 이지만 기초지자체별 분석결과, 에너지 자립률이 낮은 지자체 중에서도 부산광역시의 기장군, 인천광역시의 강진군, 옹진군 등과 같이 자립률이 100% 이상인 기초지자체가 존재하고 최대 973%가 넘는다는 것을 새롭게 확인하였다.

- (3) 통합 재생에너지원 마다 시장잠재량은 기술적 요소 뿐 만 아니라 지원정책에 의한 발전비용과 도시계획 및 환경 규제 등의 요인들에 의해 잠재량 크게 달라진다. 전국으로 공급 가능한 재생에너지 잠재량은 태양광 에너지 > 태양열 에너지 > 풍력 에너지 > 지열 에너지 > 수력 에너지 > 바이오매스 에너지 순으로 발전 시장잠재량이 많았다. 하지만 지역에 따라 그 기여도가 달랐고 건물 밀집도가 높은 대도시에서는 태양광에너지보다는 태양열에너지의 기여도가 상대적으로 컸다.
- (4) 지역에너지계획에서의 보급 전략과 비교한 결과, 계획시점이 다르지만 현재 47%의 광역지자체는 풍력, 수력, 지열 등 모든 재생에너지원을 충분히 고려하지 못하고 있다. 하지만 충분히 고려하더라도 에너지 소비량이 너무 많은 서울, 경기일부, 울산, 그리고 부산은 주변으로부터의 공급대안을 마련해야 하는 상황을 확인하였다. 광역지자체들은 에너지 자립을 위해 지자체들은 지역별 활용 가능한 재생에너지원과 에너지소비량의 지역별 특성을 충분히 반영할 필요가 있겠다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20194210200010).

REFERENCES

1. IEA(International Energy Agency), <http://www.iea.org>
2. KEA(Korea Energy Agency), <https://www.knrec.or.kr/pds/statistics.aspx>
3. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), Renewable Energy 3020 Plan, pp. 13, 2017.
4. Ministry of Trade, 3rd Basic Energy Plan, pp. 117, 2019.
5. KEEI(Korea Energy Economics Institute), International Renewable Energy Policy Change and Market Analysis, pp.194, 2018.
6. Koh, J. and Kwon, O., A Study on Gyeonggi-Do's Community Energy Potential and Policy Implications, GRI review, Vol 21, No. 2, pp. 231-258, 2018.
7. KEA(Korea Energy Agency), <http://recloud.energy.or.kr/main/main.do>
8. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), New-Renewable Energy Resource map Upgrade and Market Potential Analysis-Appendix, pp.660, 2017.
9. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), 2018 New & Renewable Energy White Paper, pp.824, 2018.
10. Lee, J. and Park, S., Estimation of Geographical & Technical Potential for Biomass Resources, New & Renewable Energy, Vol. 12, No. S2, pp. 53-58, 2016.
11. Kang, Y.-H., Kim, J.-Y., Yun, C., and Kim, H.-G., Hydropower Potential for Renewable Energy Basic Plan, Water and Future, Vol. 52, No. 3, pp. 6-9, 2019.
12. Jo, C., Lee, K., Cho, B., and Hwang, S., Tidal Current Resource Assesment Using a Numerical Simulation of Water Circulation in Korea, New & Renewable Energy, Vol. 12, No. S2, pp. 71-76, 2016.
13. Kim, J.-g., Sun, H., Kim, J., Yun, C., Kim, H.-g., Kang, Y., and Kang, B., Estimation of Nationwide Mid-sized

- Basin Unit Small Hydropower Potential Using Grid-based Surface Runoff model, *New & Renewable Energy*, Vol. 14, No. 3, pp. 12-19, 2018.
14. Song, Y., Baek, S.-G., Kim, H. C., and Lee, T. J., Estimation of Theoretical and Technical Potentials of Geothermal Power Generation using Enhanced Geothermal System, *Economic and environmental geology*, Vol. 44, No. 6, pp. 513-523, 2011.
 15. Kim, H., Kim, H.-J., Choi, S.-M., Kang, H.-M., and Lee, S.-H., GIS-RS-based Estimation of Carbon Dioxide Absorption and Bioenergy Supply Potential of Frest, -Focused on Muju County, Jeonbuk-, *Journal of Agriculture & Life Science*, Vol. 45, No. 1, pp. 21-32, 2011.
 16. Kim, J., Suh, J., Park, H., Kang, Y., and Yun, C., Assessment of Photovoltaic Potential for Constructing Ulleung-do as a Sustainable Energy Island, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, Vol. 51, No. 4, pp. 513-524, 2014.
 17. Jung, S.-E., Kim, J.-Y., Kang, Y.-H., and Kim, H.-S, Case Study: Assessment of Small Hydropower Potential Using Runoff Measurements, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 38, No. 4, pp. 43-54, 2018.
 18. Kim, S. Y., Kim, C., Paek, I., and Kim, H., Evaluation of Implementation Potential of Offshore Wind Farm Capacity in Korea Using National Wind Map and Commercial Wind Farm Design Tool, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 36, No. 4, pp. 21-29, 2016.
 19. Oh, M., Kim, S.-M, Koo, Y.-H., and Park, H.-D., Analysis of Photovoltaic Potential and Selection of Optimal Site near Gumdeok Mine, North Korea, *New & Renewable Energy*, Vol. 14, No. 3, pp. 44-53, 2018.
 20. Shin, M.-S. and Lee, K.-S., A Study on the Installation Potential of Photovoltaic System Based on Regional Architectural Data, North Korea, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 39, No. 3, pp. 29-45, 2019.
 21. Kim, H.-G., Hwang, H.-J., and Kang, Y.-H., Evaluation of Onshore Wind Resource Potential According to Environmental Conservation Value Assessment, *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 6, pp. 717-721, 2013.
 22. Kim, H.-G., Hwang, H.-J., Kang, Y.-H., and Yun, C.-Y., Evaluation of Onshore Wind Resource Potential According to the Road proximity, *New & Renewable Energy*, Vol. 9, No. 4, pp. 13-18, 2013.
 23. Min, K., Park, C.-K, Kim, J.-K., and Na, B.-K., Study on Potential Feedstock Amount Analysis of Biodiesel in Korea, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 447-461, 2016.
 24. Kim, J.-Y., Kim, C. K., Yun, C.-Y., Kim, H.-G., and Kang, Y.-H., Assessment of Techno-economic Potentials for Solar Thermal Energy in South Korea, *AIP Conference Proceeding*, Vol. 2126, pp. 190008, 2019.
 25. KEEI(Korea Energy Economics Institute), Estimation of PV Market Potential Considering Regional Economics and Cost Analysis, pp. 149, 2018.
 26. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), Implementation of Renewable Energy 3020 Inspection of domestic issues and measures to resolve side effects, pp. 5, 2018.
 27. Min, Y.-J., An Energy Efficiency Analysis of Korea based on the Energy Dependence and Independence rate, *International Commerce and Information Review*, Vol. 16, No. 2, pp. 199-218, 2014
 28. IEA(International Energy Agency), <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-297203538/1>
 29. Kim, H.-G., Kang, Y.-H., and Kim, C. K., Analysis of Wind Energy Status and Capacity Factor of South Kroea by EPSIS Wind Power Generation Data, *Journal of Wind Energy*, Vol. 8, No. 2, pp. 21-27, 2017.
 30. Kim, H.-G., Kang, Y.-H., and Kim, J.-Y., Calculation of Wind Turbine Capacity Density and Spacing of Wind Farms in South Korea, *Journal of Wind Energy*, Vol. 7, No. 2, pp. 35-44, 2016.
 31. Kim, C. K., Kim, H.-G., Kang, Y.-H., and Yun, C.-Y., Toward improved Solar Irradiance Forecasts: Comparison of the Global Horizontal Irradiance Derived from the COMS Satellite Imagery Over the Korean

- Peninsula, Pure. Appl. Geophys, Vol. 174, pp. 2773-2792, 2017.
32. Kim, J.-Y., Yun, C.-Y., Kim, C. K., Kang, Y.-H., Kim, H.-G., Lee, S.-N., and Kim, S.-Y., Evaluation of WRF Model-derived Direct Irradiance for Solar Thermal Resource Assessment over South Korea, AIP Conference Proceedings, Vol. 1850, pp. 140013, 2017.
 33. Bae, S., Nam, Y., and Hwang, S.-H., Sensitivity Analysis of Design Factor for the Suitable Map of Ground Source Heat Pump System, New & Renewable Energy, Vol. 12, No. S2, pp. 66-70, 2016.
 34. Nam, Y.-J. and Oh, J.-H., Study on the characteristic of heat exchange for vertical geothermal system using the numerical simulation, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 2, pp. 66-72, 2014.
 35. KPX(Korea Power Exchange), <https://kpx.or.kr/www/contents.do?key=414>
 36. KEA(Korea Energy Agency), <http://onerec.kmos.kr>
 37. Aslani, A., Naaranoja, M., Helo, P., Feng, B., Antil, E., and Hiltunen, E., Energy diversification in Finland: achievements and potential of renewable energy development, International Journal of Sustainable Energy, Vol. 32, pp. 504-514, 2013.
 38. Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, C.-C., Scarlet, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J.-F., and Parra, R., Renewable energy research progress in Mexico: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 32, pp. 104-153, 2014.
 39. Aslani, A. and W. K.-F., Analysis of renewable energy development to power generation in the United States, Renewable Energy, Vol. 63, pp. 153-161, 2014.
 40. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), Guideline of Renewable Energy Plan for 2019, pp. 24, 2019.
 41. Seoul Metropolitan Government, Seoul Regional Energy Plan(4th), pp. 389, 2015.
 42. Busan Metropolitan City, Busan 5th Regional Energy Plan, pp. 544, 2018.
 43. Incheon Development Institute, Incheon 4th Regional Energy Plan, pp. 413, 2014.
 44. Gwangju Metropolitan City, Gwangju Regional Energy Plan(4th), pp. 377, 2014.
 45. Daejeon Development Institute, Daejeon 4th Regional Energy Plan, pp. 294, 2012.
 46. Ulsan Metropolitan City, Usan 5th Regional Energy Plan, pp. 409, 2017.
 47. Sejong Metropolitan Government, 1th Regional Energy Plan, pp. 378, 2015.
 48. Daegu Metropolitan City, Daegu 4th Regional Energy Plan, pp. 336, 2015.
 49. KEEI(Korea Energy Economics Institute), 4th Gyeonggi Regional Energy Plan, pp.396, 2015.
 50. Gwangju Metropolitan City, Gwangju Regional Energy Plan(4th), pp. 377, 2014.
 51. Chungcheongbuk-do, Chungcheongbuk-do 5th Regional Energy Plan, pp. 381, 2017.
 52. Jellabuk-do, Jellabuk-do 3rd Regional Energy Plan, pp. 24, 2017.
 53. Chungcheongnam-do, Chungcheongnam-do 5th Regional Energy Plan, pp. 345, 2016.
 54. Gyeongsangbuk-do, 4th Gyeongsangbuk-do Regional Energy Plan, pp. 445, 2015.
 55. Gyeongsangnam-do, 5th Gyeongsangnam-do Regional Energy Plan, pp. 365, 2015.
 56. Gwangwon-do, Gwangwon-do 4th Regional Energy Plan, pp. 344, 2015.
 57. Jellanam-do, Establishment of Jellanam-do Energy Industry Development Plan, pp. 442, 2017.
 58. Jeju Special Self-Governing Province, 4th Jeju Special Self-Governing Province Regional Energy Plan, pp. 297, 2017.