

다목적 최적화 기법을 이용한 신재생에너지 기반 자립 에너지공급 시스템 설계 및 평가

이도현 · 한슬기 · 김지용[†]

인천대학교 에너지화학공학과
22012 인천광역시 연수구 아카데미로 119
(2016년 12월 6일 접수, 2017년 1월 18일 수정본 접수, 2017년 2월 13일 채택)

Economic and Environmental Assessment of a Renewable Stand-Alone Energy Supply System Using Multi-objective Optimization

Dohyun Lee, Seulki Han and Jiyong Kim[†]

Department of Energy and Chemical Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea
(Received in 6 December 2016; Received in revised form 18 January 2017; accepted 13 February 2017)

요 약

본 연구에서는 다목적 최적화 기법을 이용하여 다양한 신재생에너지 자원 기반 통합 에너지 공급 시스템을 설계 및 평가 한다. 본 연구에서는 에너지 공급 시스템의 주요 구성요소로써 태양광 모듈, 풍력터빈 및 화석연료 기반 발전장치 등 에너지 생산 기술을 비롯하여 배터리와 인버터 등의 전력 에너지 저장 및 변환 장치 등도 포함한다. 특히, 6개의 한국 대표 지역을 선별하여 각 지역의 에너지 요구량 및 실제 신재생 에너지 자원 데이터를 기반으로 최적의 독립 통합 에너지 공급 시스템을 설계하였으며, 총 소요비용, 단위에너지비용 및 생애주기 이산화탄소 배출 분석 등, 다양한 지표를 이용하여 시스템의 경제성 및 환경성을 분석한다. 특히 다목적최적화 기법을 이용하여 최소 비용과 최소 이산화탄소 배출 등 두 목적함수를 동시에 만족하는 파레토 솔루션을 규명함으로써 신재생 자원 기반 독립 에너지 공급 시스템 설계의 가능성 및 효과를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 신재생에너지 자원이 좋은 지역일수록 시스템 구축 비용 증가에 따른 이산화탄소 절감 효과가 높은 것으로 나타났다. 또한, 신재생에너지 자원 기반 에너지 공급 시스템의 전력 단가는 현재 기존 단가보다 평균 0.35~0.46 \$/kWh 높게 나타났으며, 이산화탄소 배출량의 경우 기존 배출량보다 470~490 gCO₂/kWh 정도의 저감효과를 보임을 분석하였다.

Abstract – This study aims to propose a new optimization-based approach for design and analysis of the stand-alone hybrid energy supply system using renewable energy sources (RES). In the energy supply system, we include multiple energy production technologies such as Photovoltaics (PV), Wind turbine, and fossil-fuel-based AC generator along with different types of energy storage and conversion technologies such as battery and inverter. We then select six different regions of Korea to represent various characteristics of different RES potentials and demand profiles. We finally designed and analyzed the optimal RES stand-alone energy supply system in the selected regions using multiobjective optimization (MOOP) technique, which includes two objective functions: the minimum cost and the minimum CO₂ emission. In addition, we discussed the feasibility and expecting benefits of the systems by comparing to conventional systems of Korea. As a result, the region of the highest RES potential showed the possibility to remarkably reduce CO₂ emissions compared to the conventional system. Besides, the levelized cost of electricity (LCOE) of the RES-based energy system is identified to be slightly higher than conventional energy system: 0.35 and 0.46 \$/kWh, respectively. However, the total life-cycle emission of CO₂ (LCE_{CO2}) can be reduced up to 470 gCO₂/kWh from 490 gCO₂/kWh of the conventional systems.

Key words: Renewable energy source, Multi-objective optimization, Economic evaluation, CO₂ emission, Korea

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jykim77@inu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 화석연료 고갈 및 온실가스 배출로 인한 기후변화 및 지구 온난화 등의 에너지 관련 문제가 전세계적으로 대두되고 있다[1]. 1992년 UN 주재의 기후변화협약을 시작으로 선진국을 중심으로 범지구적인 온실가스 감축을 위한 노력이 계속되어 오고 있다. 예를 들어, 2005년 발효된 교토의정서에 따라 Annex I에 속한 38개국은 온실가스 배출량을 1990년에 비해 평균 5% 감축하도록 협정되었으며[2], 2015년 파리협정에서는 2021년부터 일부 선진국에 국한된 기존의 온실가스 감축의무를 거의 모든 산업화 국가인 195개국으로 확대하여 참여하기로 협정하였다[3]. 이에 따라 우리나라도 2030년까지 국내 온실가스 배출 전망치(BAU; Business as usual) 대비 약 37% 감축의무를 가지게 되며, 이를 효과적으로 달성하기 위한 “신 기후체제”를 수립하고 있다[3]. 현재 한국은 세계 에너지 소비량 8위, 석유 수입량 4위, 에너지 소비 증가율 9위의 나라로 전체 에너지공급량의 95.8%를 해외수입에 의존하고 있으며, 총 소비 에너지의 약 85%를 화석연료가 차지하고 있다[3]. 한국의 이러한 화석연료 기반 에너지 공급 시스템은 비단 기후 변화 등의 의무감 증가뿐만 아니라, 전세계 화석연료 매장량의 급감 및 주요 에너지 수출국의 정치적 상황에 의한 국제 에너지시장의 가격 불안정성 등에 의해 국내 에너지 구조의 지속가능성 저하 등의 문제를 수반하고 있다.

신재생에너지 자원 기반 에너지 공급 시스템으로의 전환은 기존 화석연료 기반 에너지 생산 시스템의 에너지 수급 불균형 및 낮은 에너지 안보 등의 에너지 관련 문제를 해결할 수 있는 가장 현실적인 대안으로 각광받고 있다[1,3]. 또한 신재생 자원 기반 에너지 공급 시스템은 국내 자원의 활용 가능성, 친환경적 에너지생애 주기 등 국내 에너지 자립도 향상 등의 장점을 가진다. 그러나 신재생 자원 기반 에너지 공급 시스템은 인프라 구축에 관련된 높은 비용이 요구됨에 따라 기존 에너지 시스템에 전환에 따른 막대한 전환 비용이 요구되며, 신재생 자원의 고유의 특징인 계절적 및 지역적 편차와 같은 에너지공급의 낮은 유연성 등 실용화 단계에서 많은 장벽이 존재한다. 따라서, 많은 인프라 구축 비용, 자원의 간헐적 특성 등 신재생 에너지 기반 시스템의 단점을 극복하기 위해 1) 각 지역적으로 에너지 자원과 수요 구조에 적합한 지역 기반 독립적 에너지 생산 전략(Stand-alone energy production) 수립 및 2) 다양한 신재생 자원을 동시에 고려함으로써 간헐적 효과를 줄일 수 있는 통합 에너지 생산 시스템(Hybrid energy production) 구축이 필수적이다.

신재생 에너지를 이용한 에너지 공급 시스템 설계 관련 연구는 국내외에서 활발히 수행되고 있다. Dufo-Lopez 등은 신재생에너지 시스템의 경제성과 환경성 평가가 가능한 수학적 알고리즘 개발 및 다양한 지역 및 국가에서의 신재생 자원 기반 에너지 시스템의 가능성과 효과를 분석하였다[4-6]. Santarelli 등은 신재생에너지를 이용한 독립 수소 에너지 공급 시스템을 설계하여 이탈리아 특정 지역 주거형태의 전기 요구량을 충족시키기 위한 다양한 전략을 수립하였다[7]. Asrari 등은 복합 신재생에너지 시스템을 이용한 경제성 평가를 이란의 특정 지역에 대하여 수행하였다[8]. 김지용 그룹은 육/해상 풍력 발전 단지 설계를 위한 최적화 모델을 개발하여 제주도에서의 풍력 자원 기반 전력 공급 시스템을 평가[9] 및 우리 나라 각 지역 별 및 에너지 수요 부문 별 최적 에너지공급 시스템의 차이

점 및 소요비용 구조 비교 평가 등의 연구를 수행하였다[10].

기존의 다양한 연구에도 불구하고, 실제 국가 또는 지역의 최적 에너지 시스템을 규명하기 위해서는 신재생 자원과 에너지 수요의 지역적 특이성 및 시간적 변동성을 동시에 고려한 새로운 설계 기법이 요구된다. 또한 비단 소요 비용 분석 및 예상 경제적 효과 등 신재생 자원 기반 시스템의 경제적 특성뿐만 아니라 이산화탄소 배출 저감 효과 등 환경적 특성 또한 평가하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 신재생 자원을 동시에 고려한 통합 에너지 공급 시스템을 설계하고 경제성 및 환경성을 함께 평가하기 위한 다목적 최적화 기법(MOOP; multi-objective optimization)을 이용한 평가 전략을 제시하고자 한다. 또한 이러한 설계 및 평가 방법론을 한국의 주요 지역에 적용함으로써 본 연구에서 제시된 방법론의 효용성 입증은 물론 지역 에너지 시스템 설계에 관한 실용적인 해결안을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 신재생 자원 기반 통합 독립 에너지 공급 시스템을 설계하고 다목적 최적화 기법을 이용하여 경제성 및 환경성 평가를 목표로 한다. 설계된 시스템의 경제성은 단위에너지비용(LCOE; levelized cost of energy, \$/kWh)을 이용하여 평가하며, 국내의 실제 에너지 판매단가와 비교하여 신 에너지 시스템의 경쟁력을 분석한다. LCOE는 단위 생산 전력당 발생하는 비용으로 시스템의 수명 동안 발생하는 모든 비용을 포함하며, 일반적인 경제 평가 지표로 사용된다. 설계된 시스템의 환경성은 단위 생산 전력당 발생하는 이산화탄소(CO₂; carbon dioxide) 배출량을 나타내는 생애주기 배출(LCE; life-cycle emission, gCO₂/kWh)을 평가 지표로 한다. 본 연구에서는 LCA (life cycle assessment) 기법을 이용하여 AC generator의 연료소비뿐만 아니라 제조, 운송, 구성요소의 교체 등 시스템 생애 주기 동안 발생하는 모든 CO₂ 배출을 포함하였다.

본 연구에서는 1) 다양한 신재생에너지 자원을 이용한 에너지 공급 시스템의 상부구조 설계, 2) 에너지 자원 정보 및 관련 기술의 기술적/경제적 데이터 분석 등의 세부연구를 포함한다. 본 연구에서 제안한 시스템은 실제 한국 6개 지역의 에너지 요구량 및 실제 자원 데이터를 기반으로 분석된다. 본 연구는 에너지시스템 모델링 및 분석 플랫폼을 제공하는 iHOGA (improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms)를 이용하였다[11].

2-1. 신재생자원 기반 독립 에너지 공급 시스템 개요

본 연구에서 제안한 에너지 공급 시스템의 개괄도가 Fig. 1에 나타나 있다. 본 시스템은 전력망(Grids)과의 연결이 차단된 독립 통합 에너지 공급 시스템(stand-alone hybrid energy supply system)이며, 크게 에너지 생산 시스템, 에너지 저장 시스템, 에너지 변환 시스템 등 세 가지 에너지 기술 시스템으로 구성된다. 에너지 생산 시스템으로써 태양광 발전(PV; Photovoltaic), 풍력발전(Wind turbine), 화석연료 기반 발전장치(AC generator)를 포함하며, 태양광 및 풍력을 이용하여 PV와 Wind turbine을 통해 생산된 전기는 인버터를 거쳐 배터리에 저장된 후 최종 에너지 수요에 공급된다. AC generator는 신재생에너지 자원의 간헐적 특성으로 인한 에너지 공급의 불안정성을 보완하기 위해 사용된다.

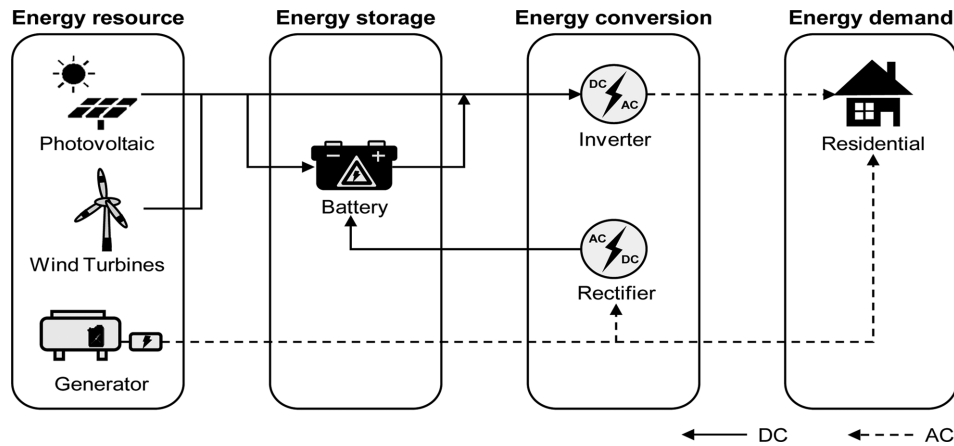


Fig. 1. Stand-alone hybrid energy supply system using renewable energy sources for residential sector.

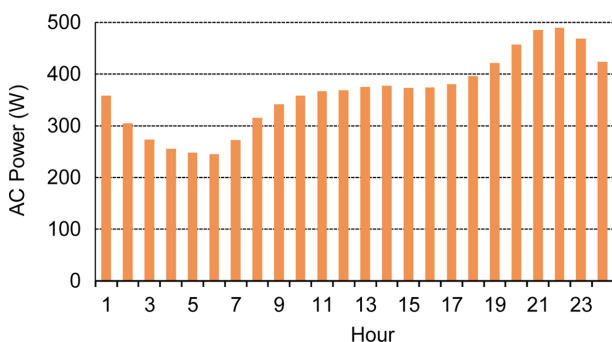


Fig. 2. Daily load profile of residential sector.

2-2. 에너지 수요 분석

본 연구에서는 국내 행정구역별로 6개 대표 지역(서울, 강릉, 대전, 울산, 광주, 제주)을 선정하였으며, 각 지역의 주거부문 전력수요량을 분석하였다. Fig. 2는 주거부문 일 평균 전력수요량을 나타낸다. 이는 한 주거 당 연평균 전력수요량과 주거부문 전력소비계수[12]를 이용하여 계산되며, 각 단위 주거의 연평균 전력수요량 계산을 위하여 주거부문 총 전력수요량 및 각 지역 별 총 주거 수 등의 데이터를 이용하였다[13,14]. 본 연구에서는 6개 지역에서의 에너지 수요량 크기는 실제 데이터를 기반으로 다르게 모형화한 반면, 일 24 시간별 에너지 사용 프로파일은 지역에 무관하게 일정하다고 가정하였다.

Table 1은 6개 지역의 월별 일 평균 전력수요량을 나타낸다. 일년 중 냉방장치를 많이 이용하는 여름과 난방장치를 많이 이용하는 겨울에 상대적으로 높은 전력수요를 보이며, 지역적으로는 R1과 R4가 7.52 kWh/day로 가장 큰 전력수요를 가진다.

2-3. 에너지 자원 및 관련기술 분석

본 절에서는 통합 에너지 공급 시스템 구축에 필요한 풍력 및 태양광 등 신재생 에너지 자원량 과 신재생 자원 기반 에너지 생산 기

술의 기술적, 경제적 데이터를 설명한다.

Fig. 3은 미국항공우주국(NASA)에서 제공하는 데이터를 기반으로 한 6개 지역의 월별 기상 데이터를 보여준다[15]. Fig. 3(a)는 각 지역의 월 평균 태양 복사열을 나타내며, (b)는 월 평균 풍속을 나타낸다. 태양 복사열의 경우, 지역별 차이가 크지 않으며 여름(4-6월)에 약 5 kWh/m²로 높게 나타나며 겨울(11~1월)에는 약 2.5 kWh/m²로 상대적으로 낮게 낮다. 그에 반해 풍속은 지역별로 상이한 값을 나타낸다. 예를 들어, R4(울산)과 R6(제주)은 약 5~6 m/s로 높은 풍속을 보이는 반면 R3(대전)은 약 3 m/s의 낮은 풍속을 보인다. 또한, 여름(5~8월)보다 겨울(11~2월)에 상대적으로 높은 풍속을 보인다.

Table 2에서 보인 바와 같이 본 연구에서는 3가지 타입의 PV 기술, 2가지 타입의 Wind turbine 기술, 3가지 타입의 전기 저장 기술(battery)를 고려한다. AC generator의 경우 그 용량에 따라 각 두 가지의 Diesel 주입 및 Gasoline 주입 발전기를 고려한다.

Table 2은 상기 기술들의 타입 별 용량에 따른 기술적, 경제적 데이터를 나타낸다. 기술 데이터로써 iHOGA에서 제공하는 기술 별 CO₂ 배출량과 생애주기를 포함하였으며, 경제적 데이터로써 기술 별 투자 및 운전비용을 포함하였다. Table 2에서의 CO₂ 배출량은 기술 운전시 발생하는 CO₂ 배출량을 제외한 기술 설치 및 제조 과정 등 기술의 전 과정에서 발생하는 배출량을 나타낸다. 기술 운전시 발생하는 CO₂ 배출량은 PV와 Wind turbine의 경우 0.02~0.04 kg/kWh 정도이며, 화석 연료 기반의 발전기는 상대적으로 높은 3~5 kg/liter를 갖는다[11].

3. 최적화 모델 및 결과

3-1. 최적화 모델

본 절에서는 2절의 에너지 자원 데이터 및 관련 기술들의 기술적, 경제적 데이터들을 iHOGA 플랫폼을 이용하여 실제 한국의 6개 지

Table 1. Monthly average demand of each region [kWh/d]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
R1	8.1	7.9	6.9	7.3	6.9	7.1	7.6	8.7	8.1	6.9	7.2	7.5
R2	7.2	7.2	6.3	6.7	6.1	6.0	5.8	7.0	6.6	6.0	6.5	6.7
R3	7.5	7.4	6.5	6.9	6.4	6.5	6.7	8.0	7.7	6.4	6.8	7.1
R4	8.0	8.0	7.0	7.4	6.9	6.9	7.0	8.6	8.6	6.9	7.6	7.6
R5	7.4	7.3	6.5	6.8	6.4	6.4	6.5	7.6	7.5	6.4	6.7	7.0
R6	7.3	7.1	6.4	6.6	6.0	5.9	6.2	7.9	7.5	5.9	6.4	6.9

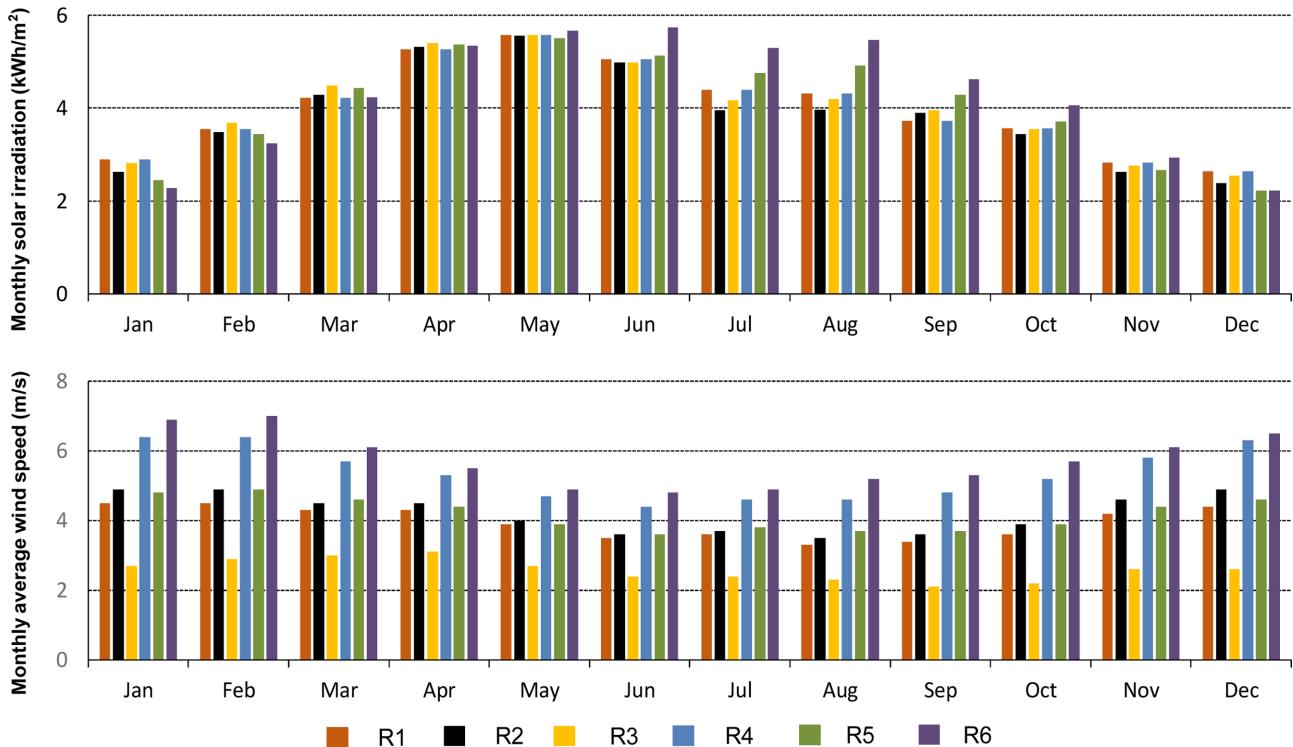


Fig. 3. Monthly average wind speed and solar radiation of each region.

Table 2. Technical and economic parameters of the selected technologies

Technology	Power (kWp)	Capital cost (\$)	O&M cost (\$/yr)	CO ₂ emissions (kgCO ₂ /kWp)	Life time (year)
PV 1	0.1	132	1.32	800	25
PV 2	0.135	230.4	2.3	800	25
PV 3	0.28	420	4.2	800	25
Wind turbine 1	0.66	5,106	102	600	15
Wind turbine 2	1.66	5,850	117.6	900	15
Battery 1	34 ^a	142.8	1.43	55 ^b	18
Battery 2	78 ^a	612	6.12	55 ^b	18
Battery 3	190 ^a	1,348.8	13.46	55 ^b	18
Diesel 1	1.9 ^c	960	0.168	215	10,000 ^d
Diesel 2	3 ^c	1,260	0.2	215	10,000 ^d
Gasoline 1	0.5 ^c	0.5	0.24	215	1,000 ^d
Gasoline 2	1 ^c	1	0.24	215	1,000 ^d

^aUnit: Ah, ^bUnit: kgCO₂/kWh, ^cUnit: Vah, ^dUnit: hour

역에 적용한다. 특히 2절에 제시된 데이터를 기반으로 신재생에너지 공급 시스템의 연간(8,760시간) 최적 운전 전략 수립을 위한 기술적 구조를 규명한다. 즉, 시간기반의 수요를 만족하기 위하여 공급기술을 선별하는 과정에서 지역별 에너지 자원에 따른 공급기술의 에너지 생산량이 시간당 에너지 수요를 만족하는 환경에서 두 가지 설계 전략(비용 및 이산화탄소 배출)을 분석한다. 특히 본 연구에서 사용한 최적화 수행 플랫폼인 iHOGA는 최적 기술 구조 분석을 위하여 Fig. 4에서 보인 바와 같이 일반적인 다목적 평가 알고리즘(MOEAs; Multi-objective Evolutionary Algorithms)을 이용하여 최적화를 수행한다[19].

본 연구에서 사용된 주요 가정 및 제약 조건은 아래와 같다.

· 수요 만족: 본 연구에서 제안된 시스템의 독립 체제로써 외부 에너지 공급 옵션이 포함되지 않는다. 즉 Fig. 1에서 제시된 에너지 공급 시스템으로 각 지역의 에너지 수요량을 만족하여야 한다.

$$\text{Minimize } U \{LCOE, LCE\}_{x,y}$$

Subject to

$$\left. \begin{array}{l} h(x, y) = 0 \\ g(x, y) \leq 0 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{Demand satisfaction} \\ \text{Technology capacity} \\ \text{Energy flow conservation} \\ \text{Available RES potentials} \\ \text{Limit of technology selection} \\ \text{Non-negativity} \end{array} \right\}$$

$$x \in \mathfrak{R}^n, y \in Y = \{0, 1\}^{\text{technology}}$$

Fig. 4. Two objective functions and major constraints of this study in iHOGA platform.

· 기술별 용량제한: 각 기술에서 생산된 에너지의 흐름은 그 해당 기술의 생산 용량을 초과 할 수 없다.

· 에너지 흐름 보존: 기술들 간의 에너지 흐름은 보존 된다.

· 기술별 최대 설치용량 한계: 본 연구에서 제안된 독립 시스템을 구성하는데 있어서 기술의 최대 설치용량을 제한한다. PV의 경우, 12V PV는 4개가 1열을 구성하며 24V PV는 2개가 1열을 구성한다. 최적화 범위는 최소 0열부터 최대 20열로 제한하였다. Wind turbine의 경우, 최대 1개로 최적화 범위를 제한하였다. Battery의 경우 모두 12V 배터리이며 4개가 1열을 구성하고 최소 0열부터 최대 10열까지로 범위를 제한하였다.

· 에너지 흐름 및 기술의 개수 등 주요 변수는 양수이다.

상기의 제약 조건을 만족하는 다양한 기술적 구조 중 두 가지 목적함수, 즉 최소 비용(LCOE) 및 최소 이산화탄소 배출(LCE)을 동시에 만족하는 다양한 기술적 구조들을 규명하는 다목적 최적화를 수행한다. 다목적 최적화 수행의 결과는 다음의 3.2절의 파레토 곡선(Pareto Curve)을 이용하여 분석한다. 특히 파레토 곡선 중 가장 중요한 실제적 의미를 갖는 양 끝 점(최소 LCOE를 갖는 구조 및 최소 LCE를 갖는 구조)에 관하여 각각 3.2.2절과 3.2.3절에 자세히 분석한다.

3-2. 최적화 결과

3-2-1. 파레토 솔루션

최소 LCOE와 LCE 등 독립 통합 에너지 공급 시스템 설계에 관한 다양한 파레토 솔루션을 Fig. 5에 나타내었다. 지역에 상관없이 최소 LCOE를 가질 때 최대 LCE값을 가지며, 최소 LCE를 가질 때 최대 LCOE를 갖는 것을 확인할 수 있다. 즉, 경제성을 높일 경우 환경적으로 손해가 있으며 환경성을 높일 경우 경제적 손해가 존재하게 된다.

6개 지역 중 신재생에너지 자원이 가장 풍부한 R6의 경우 경제적, 환경적 측면 모두 타 지역에 비해 높은 경쟁력을 보인다. 또한, CO₂ 배출량을 감소시키는 데 상대적으로 적은 비용이 드는 것을 볼 수 있다. 반면, 신재생에너지 자원이 가장 부족한 R3의 경우 경제적, 환경적 측면에서 가장 낮은 경쟁력을 보이며, CO₂ 배출량 감소에 있어서 상당히 높은 비용 증가를 보인다. 이러한 결과는 신재생에너지 자원 잠재량이 에너지 시스템의 경제성과 환경성 모두에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. R3와는 반대로, R1 지역은

CO₂ 배출량의 급격한 감소에 비해 비용 증가가 상당히 낮은 것을 볼 수 있다. 즉, 상대적으로 적은 비용 투입으로 얻을 수 있는 이산화탄소 저감 효과는 다른 지역에 비해 높음을 의미한다.

각 지역의 파레토 솔루션을 종합적으로 비교한 결과, 신재생 자원의 잠재량이 높은 지역일수록 신재생 에너지 생산 기술에 관한 비용 증가에 따른 이산화탄소 절감 효과가 높은 것으로 분석되며, 반면 신재생 자원의 잠재량이 낮은 지역일수록 그 비용 대비 저감 효과는 낮아짐을 알 수 있다.

3-2-2. 최소 비용 시스템 구조

6개 각 지역별 최소 LCOE를 갖는 통합 에너지 공급 시스템 설계 결과를 Fig. 6과 Table 3에 나타내었다. Fig. 6(a)는 각 지역별 선택된 기술들의 타입과 필요한 수를 포함한 독립 통합 에너지 시스템의 구조(Configuration)를 나타낸다. 우선 PV 기술의 경우 모든 지역에서 공통적으로 사용된다. R1, R2 및 R5는 큰 용량의 PV (P3) 4개를 이용하여 1.12 kWp를 생산하고, R4와 R6는 작은 용량 PV (P1) 8개를 설치하여 0.8 kWp의 전력을 생산한다. R3는 3.6 kWp (P1 36개)로 가장 많은 양의 전력을 생산하는데 그 이유는 다른 지역과 달리 Wind turbine이 설치되지 않기 때문이다. Fig. 3(b)에서 보듯이, R3의 풍속은 다른 지역에 비해 가장 낮은 값을 갖는다. 또한, Wind turbine의 가격은 다른 기술들보다 가격이 높다(Table 2 참고). 낮은 풍속으로 인한 낮은 전력 생산 효율과 Wind turbine의 높은 설치 비용은 높은 LCOE를 초래하기 때문에 R3는 PV로 전력을 생산하는 것이 경제적인 것으로 분석된다. R3를 제외한 모든 지역에서는 작은 용량의 Wind turbine (W1) 1개로부터 1.66 kWp의 전력을 얻는다. 배터리의 경우 전력수요와 신재생에너지 공급 사이의 시간적 불일치를 해결하기 위해 설치되며, 각 지역별 전력수요와 신재생에너지 기반 에너지 생산을 및 화석 연료 기반 발전기의 사용률 등을 종합적으로 고려하여 설치용량이 결정된다.

Fig. 6(b)는 각 지역별로 Fig. 6(a)의 구성으로 최적 에너지 공급 시스템 구축 시 소요되는 비용을 나타내며, 그 때의 CO₂ 배출량은 Fig. 6(c)에 나타내었다. NPC(순 현재비용; Net present cost)의 경우 R3가 약 \$38,210로 가장 큰 비용을 보이며, 배터리가 53%로 가장 큰 부분을 차지한다. 또한 PV 구성비율이 19%로 타 지역에 비해

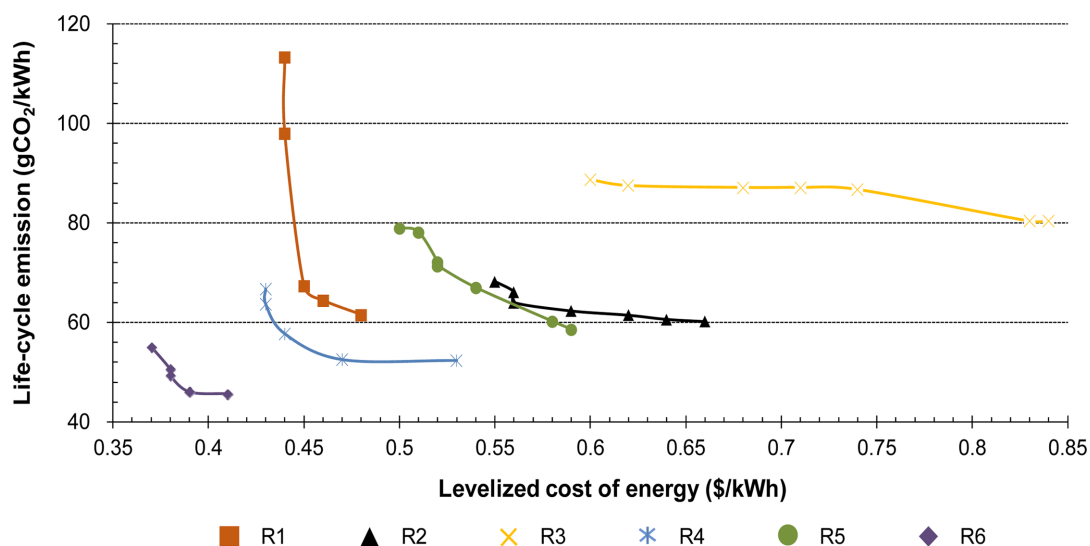


Fig. 5. Pareto curves for levelized cost of energy and life-cycle emission at each region.

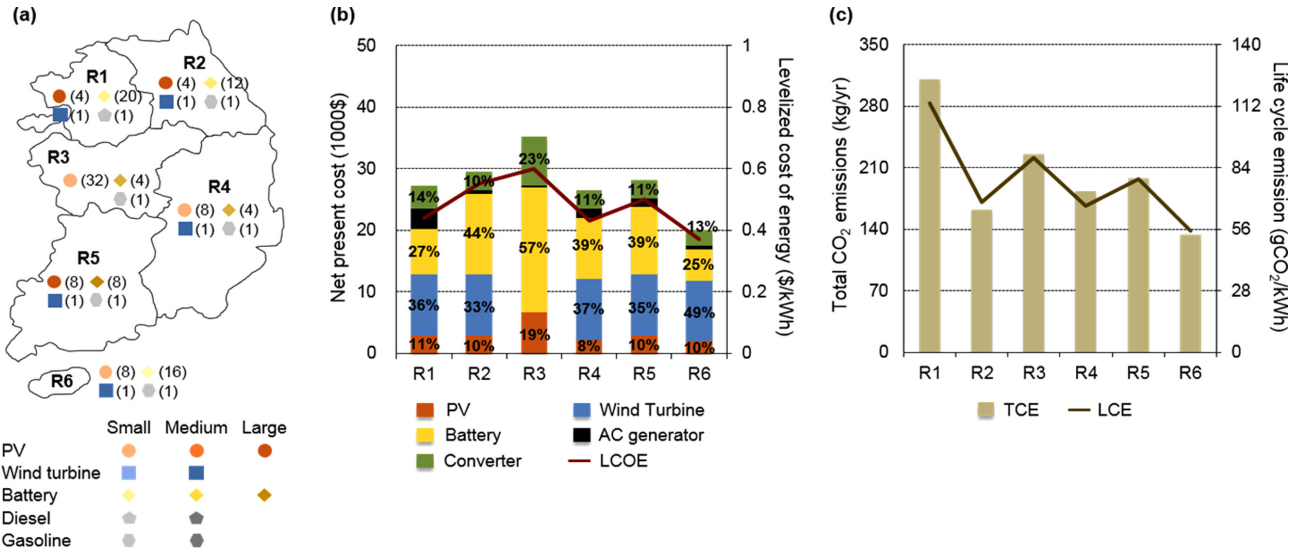


Fig. 6. Optimization results of stand-alone energy supply system for minimum LCOE: (a) optimal configuration, (b) economic analysis and (c) environmental analysis.

높게 나타난다. 이는 현저히 낮은 풍속으로 인해 모든 전력을 PV로 충당해야 하는 지역특성 때문이다. 높은 PV 사용의 경우, 전력수요와 공급 사이의 시간적 불일치가 높아 배터리 사용이 증가한다. 그에 따라, 배터리의 충/방전 양이 증가하여 배터리 수명이 기존보다 감소하게 되며 배터리의 교체가 자주 발생하게 된다. R6의 경우 약 \$22,410로 6개 지역 중 가장 낮은 NPC를 보이며, Wind turbine이 44%로 가장 많은 구성비율을 갖는다.

가장 낮은 전력 수요와 상대적으로 낮은 신재생에너지 자원을 갖는 R2가 높은 NPC 값을 보이는 반면, 가장 높은 전력 수요와 신재생 에너지 자원을 갖는 R4는 낮은 NPC 값을 보인다. 이를 통해 신재생에너지 자원 기반 에너지 공급 시스템 구축 시 소요되는 전체 비용은 전력 수요의 양보다 신재생에너지 자원에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 반면 LCOE는 NPC의 결과와 유사한 경향을 보이며, 따라서 NPC가 가장 높은 R3가 가장 높은 LCOE값을 가진다(0.60\$/kWh).

CO₂ 배출량에 대해서는 총 배출량과 단위 전력 당 배출량(LCE)으로 나누어 표현하였다(Fig. 6(c)). CO₂ 총 배출량의 경우 시스템 총 생애주기 동안의 배출량을 나타내며, AC generator 설치 및 가동 시간에 가장 높은 영향을 받는다. 따라서, AC generator 가동 시간이 81 hr로 가장 높은 R1이 311 kg/yr의 가장 높은 배출량을 보이며 이는 다른 지역에 비해 1.4~2.3배 정도 크다, 18 hr로 가장 적게 generator를

가동하는 R6가 가장 낮은 배출량(134 kg/yr)을 가진다(see Table 3). 이때 지역별 AC generator 가동에 의한 시간당 평균 이산화탄소 배출량은 1.12 kgCO₂/hr이며 지역 별로 크게는 1.95 kgCO₂/hr 적게는 0.90 kgCO₂/hr의 시간당 이산화탄소 배출량을 보였다. 반면, AC generator를 사용하지 않는 R3의 경우 상당히 높은 CO₂ 배출량을 보이는데 이는 배터리의 잦은 교체와 높은 PV 사용에 의해 발생한다.

LCE는 단위 전력 당 배출량으로 CO₂ 총 배출량을 각 지역의 전력수요로 나누어 계산하였다. 대부분의 지역의 LCE는 CO₂ 총 배출량의 경향을 따라가는 반면, R2와 R4의 경우 반대의 경향을 보인다. R4는 R2에 비해 높은 CO₂ 총 배출량을 보이지만, 전력 수요가 높아 LCE에서는 R2보다 낮은 값을 가진다.

3-2-3. 최소 배출 시스템 구조

최소-이산화탄소배출(LCE) 구조의 통합 에너지 공급 시스템 결과를 Fig. 7와 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보듯이, 최소 LCE를 갖는 에너지 시스템은 앞서 분석한 최소-비용 구조와는 달리 화석 연료 기반의 발전기(AC generator)를 거의 사용하지 않는다. 이는 AC generator 설치 여부 및 운전시간이 이산화탄소 배출량의 주요 변수임을 의미한다. AC generator의 미사용으로 인해, 모든 전력 수요를 만족하기 위해 PV와 배터리의 설치용량이 증가하게

Table 3. Regional results on minimum levelized cost of energy

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
PV (kWp)	1.12	1.12	3.6	0.8	1.12	0.8
Wind Turbine (kW)	1.66	1.66	0	1.66	1.66	1.66
Battery (kAh)	0.68	0.936	0.76	0.76	0.76	0.544
Inverter (kW)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Generator (kVA)	1.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Generator operation (hr/yr)	81	21	0	50	51	18
Amount of fossil fuel (liter/yr)	45.4	6.2	0	17.5	16.7	6.1
NPC (1,000\$)	27.22	29.56	35.28	26.48	28.22	20.12
LCOE (\$/kWh)	0.44	0.55	0.60	0.43	0.50	0.37
CO ₂ emissions using fossil fuel (kgCO ₂ /yr)	158	19	0	54	51	18
CO ₂ emissions total (kg/yr)	311	162	226	183	198	134
LCE (gCO ₂ /kWh)	113.30	68.21	88.66	66.71	78.98	55.12

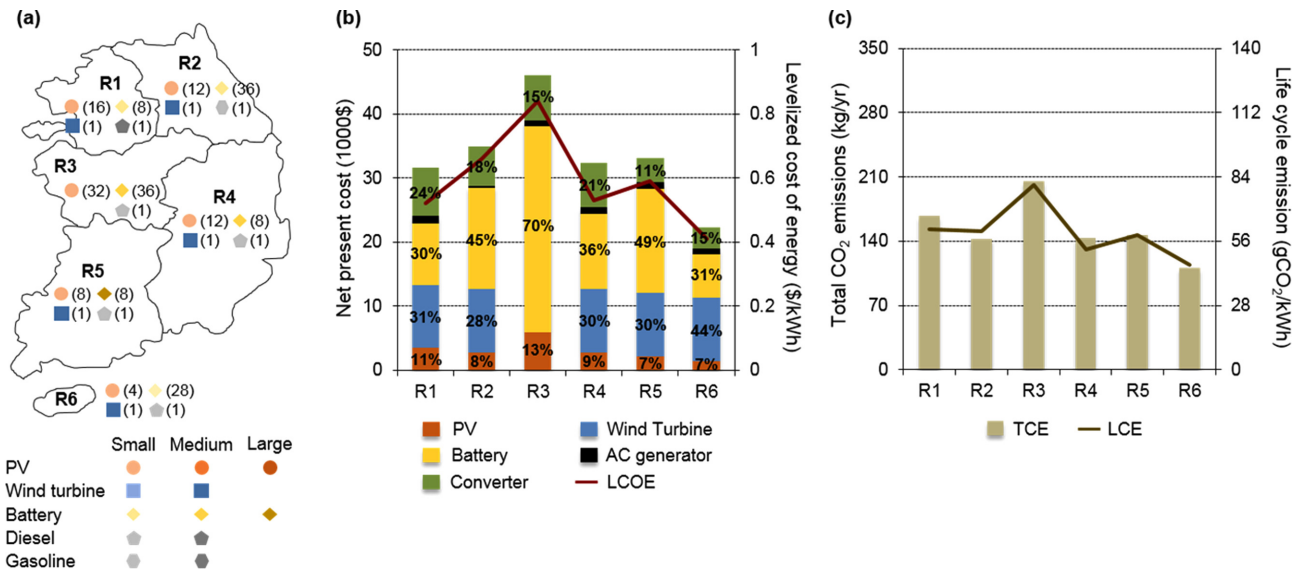


Fig. 7. Optimization results of stand-alone energy supply system for minimum LCE: (a) optimal configuration, (b) economic analysis and (c) environmental analysis.

Table 4. Regional results on minimum life-cycle emission

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
PV (kWp)	0.8	1.2	3.6	1.2	0.8	0.4
Wind Turbine (kW)	1.66	1.66	0	1.66	1.66	1.66
Battery (kAh)	1.36	1.224	2.808	0.936	1.52	0.952
Inverter (kW)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Generator (kVA)	3	0.5	1.9(d)	1.9	1.9	1.9
Generator operation (hr/yr)	1	0	0	5	3	0
Amount of fossil fuel (liter/yr)	1	0	0	2.8	1.6	0
NPC (1,000\$)	31.67	34.99	46.09	32.39	33.13	22.35
LCOE (\$/kWh)	0.52	0.66	0.84	0.53	0.59	0.41
CO ₂ emissions using fossil fuel (kgCO ₂ /yr)	3	0	0	9	5	0
CO ₂ emissions (kg/yr)	168	143	205	143	147	111
LCE (gCO ₂ /kWh)	61.20	60.21	80.42	52.40	58.64	45.66

되며 이는 전반적으로 소요 비용의 증가를 초래하게 된다 (see Fig. 7(a)). 반면, Wind turbine의 설치용량은 앞선 최소-비용 구조에 비해 변화가 없는데 이는 각 가구별 Wind turbine의 최대 설치 개수가 1개로 제한되어 있기 때문이다. 결과적으로 Wind turbine를 통한 전력 생산의 한계치로 인하여 PV 설치용량의 증가를 초래하게 되며, 증가한 PV 사용으로 더욱 높아진 전력수요와 공급 사이의 시간적 불일치를 해결하기 위해 전력 저장 장치인 배터리 사용 또한 증가하게 된다.

수치적으로 NPC와 CO₂ 배출량의 경우, 최소 LCOE를 갖는 시스템에 비해 가구 당 약 \$7,000의 NPC 증가를 보이는 반면 연간 50 kg CO₂ 배출량 감소 효과를 얻을 수 있다. 이는 앞서 설명했듯이, 화석연료 기반 발전기의 미사용 및 신재생 자원 기반 발전 체제 구축으로 인한 비용 증가 및 이산화탄소 감소의 정량적 지표를 나타낸다.

LCOE의 경우, Fig. 6(b)와 비슷하게 높은 NPC를 갖는 지역이 높은 LCOE를 갖는 경향을 보인다. LCE의 경우 R1, R3과 R6은 CO₂ 총 배출량의 경향성을 따르는 반면 다른 세 지역은 CO₂ 총 배출량과 다른 경향을 갖는다. 이는 R2, R4와 R5의 CO₂ 총 배출량은 큰 차이를 보이지 않는 반면, 전력수요량은 R4>R5>R2의 순으로

큰 차이를 갖기 때문이다. 따라서 단위 전력 당 배출량인 LCE의 값은 R2>R5>R4의 순으로 높은 값을 갖는다.

4. 경제적 및 환경적 타당성 분석

본 절에서는 앞 절에서 분석한 단위 소요 비용(LCOE)과 단위 이산화탄소 배출량(LCE) 등을 한국 실제 값과 비교함으로써 본 연구에서 설계한 지역별 독립 복합 에너지 공급 시스템의 경제적 및 환경적 타당성을 분석한다. 한국의 실제 가정용 최종 전력 공급 비용은 0.124 \$/kWh 이다[16]. 실제 단위 전력 당 배출되는 이산화탄소 기준 온실가스 배출량은 한국에서 주로 이용되는 발전원(화력, 원자력, 수력, 열병합)들의 에너지 믹스(Energy mix)의 전력 생산 비용과 각 발전원별 CO₂ 배출량을 이용하여 계산하였으며, 2014년 기준 단위 배출량은 약 548 gCO₂/kWh로 계산되었다[17].

Fig. 8에서 보는 바와 같이, LCOE의 경우 최소 LCOE(즉, 최대 LCE)를 갖는 시스템과 최소 LCE(즉, 최대 LCOE)를 갖는 시스템은 실제 전력 공급단가(0.124 \$/kWh)에 비해 각각 287%, 376% 높은 것으로 분석된다. 이산화탄소 배출량의 경우 최소-비용 시스템과 최소-배출 시스템 모두 현재 한국 에너지 시스템의 기준 배출량

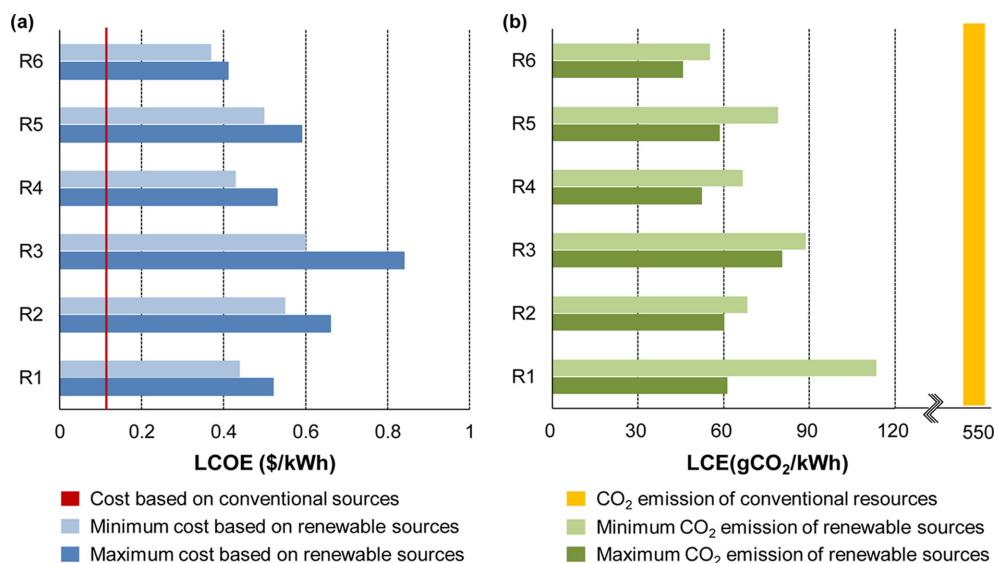


Fig. 8. Comparisons of economic and environmental between conventional and RES.

(548 gCO₂/kWh)에 비해 약 20% 개선된 효과를 보이며 그 값은 각각 약 490, 470 gCO₂/kWh 이다.

지역별 분석 결과, 6개 지역 중 경제성 및 환경성이 모두 높은 지역은 신재생에너지 잠재력이 높은 R6 지역으로 규명되었으며, 실제 전력 공급단가에 비해 약 214% 높은 LCOE 값을 가지며 기존 CO₂ 배출량에 비해 약 91%의 획기적인 이산화탄소 배출량 감소효과를 보인다. 종합적으로 신재생에너지 자원 기반의 독립 통합 에너지 공급 시스템은 기존의 에너지 시스템에 비해 약 3~5배 정도의 높은 소요 비용을 보이는 반면, CO₂ 배출량의 경우 기존 인프라에 비해 약 90% 절감된, 즉 BAU 대비 7~13%의 높은 친환경성을 보임을 분석하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 신재생 자원을 이용한 독립 에너지 공급 시스템을 설계하고 다목적 최적화 기법을 이용하여 구축된 시스템의 경제성 및 환경성 평가를 수행하였다. 또한 우리 나라의 주요 6개 지역을 선별하여 상기의 신재생 자원 기반 전력 공급 시스템의 경제적 및 환경적 타당성과 기대 효과를 정량적으로 분석하였다. 더불어 평가 지표로 단위에너지 비용(LCOE; levelized cost of energy, \$/kWh) 및 생애주기 배출량(LCE; life-cycle emission, gCO₂/kWh) 등을 설정하여 기존 한국의 화석연료 기반 에너지 공급 시스템과 비교분석 연구 또한 수행하였다. 본 연구의 주요 수행 결과는 다음과 같다.

(1) 각 지역별 에너지 공급 시스템의 기술적 구성은 지역별 신재생에너지 자원의 잠재량과 에너지 수요의 크기에 큰 영향을 받는다. 특히 풍력 자원의 잠재량이 가장 중요한 시스템 설계 변수로 작용한다. 예를 들어, 태양광자원보다 높은 에너지 생산 효율을 보이는 Wind turbine은 대부분의 지역에서 핵심 에너지 공급 기술로 선택된 반면, 태양광 기반의 PV 기술은 잔여 수요(unmet demand) 충족을 위하여 추가적으로 그 크기에 맞게 선택되었다. 단, 평균 풍속이 3 m/s 미만인 지역(예, R3)에서는 PV 기술만 설치되는 점에서, 한국에서 Wind turbine 설치의 경제적 한계치는 3 m/s의 풍속임을 알

수 있다.

(2) 지역 별 이산화탄소 배출량은 신재생 에너지 기술의 설치 유무, 타입, 갯수 등 설계 인자 보다는, 신재생에너지 및 화석연료 에너지 간의 공급비율, 즉 운전 인자에 더욱 민감하게 변화한다. 예를 들어, R1 및 R2 지역의 에너지공급 시스템의 형태는 유사한 반면, 두 지역의 신재생에너지 기술의 가동률(Operability)에 따라 8배 이상의 이산화탄소 배출량 차이를 야기한다. 결론적으로, 높은 이산화탄소 저감 효과는 비단 신재생에너지 기술의 설치 유무뿐만 아니라, 설치 기술의 실제 가동률을 극대화하기 위한 전략이 수반되어야 한다.

(3) 에너지 공급 시스템 구축을 위한 소요 비용(LCOE)과 그에 따른 환경적 기대효과(LCE)의 반목 현상은 활용가능한 신재생 자원 전체 잠재량의 크기보다는 핵심 신재생에너지 자원의 잠재량의 크기에 따라 큰 편차를 보인다. 예를 들어 평균 풍속이 5 m/s 이상인 지역(e.g., R6, R4)의 경우 두 지표간의 반목 관계가 뚜렷한 반면, 이보다 낮은 풍속을 가지는 지역들은 두 지표간의 반목 민감도가 낮았다. 따라서, 국가 차원의 높은 신재생에너지 보급 체제를 달성기 위해서는 지역별로 정량적인 자원 잠재량 분석을 통하여 핵심 기술을 중심으로 보급을 확대하는 “선택과 집중”의 국가 전략이 중요하다.

(4) 기존의 화석연료 기반 에너지 시스템과의 경제적 및 환경적 비교 분석 결과, 신재생 자원 기반 독립 에너지 공급시스템은 약 3~5배 높은 공급 비용을 나타내는 반면, 설치 후 예상되는 환경적 측면은 기존의 이산화탄소 배출량을 10% 미만으로 감축할 수 있는 효과가 있음을 규명하였다.

본 연구의 결과 신재생에너지 자원 기반 독립 통합 시스템은 기존의 전력 공급 시스템에 비해 큰 환경적 효과는 기대할 수 있는 반면 가격적 경쟁력은 아직 낮다. 이러한 낮은 가격적 경쟁력은 관련 설비의 대량 생산, 지역간의 통합 또는 국가 주도적 에너지 구조 구축 등의 규모의 경제(Economy of scale) 효과를 이용하여 다소 극복가능 할 것으로 사료된다. 또한 신재생 에너지 자원 활용 기업, 가정 또는 지자체에 대한 보조금, 세금 감면 등 다양한 비용적 인센티브를 이용하여 장려할 수 있으며, 이러한 정책은 또한 다양한 에너지 구조 최적화, 에너지경제 모델링, 환경성 평가 등 주제의 R&D와 함께 함으로써 신재생 에너지의 실용화를 앞당길 수 있다.

References

1. Choe, U. and Song, K., "The Origins and Present Status of Renewable Energy and Fuel Cell," *The World of Electricity*, **55**(8), 38-45 (2006).
2. Cho, Y., "Climate Change Regime and Governance: A Review," *World Peace*, **5**(1), 2-8(2008).
3. Oh, J., "Results of the 2015 Global Climate Change Results in Paris," Korea energy economic institute (2015).
4. Lopez, R., Bernal, J., Yusta, J., Dominguez, J., Ramirez, I., Lujano, J. and Aso, I., "Multi-object Optimization Minimizing Cost and Life Cycle Emissions of Stand-alone PV-wind-diesel Systems with Batteries Storage," *Applied Energy*, **88**, 4033-4041 (2011).
5. Lopez, R. and Bernal, J., "Design and Control Strategies of PV-Diesel Systems Using Genetic Algorithms," *Solar Energy*, **79**, 33-46(2005).
6. Bernal, J. and Lopez, R., "Simulation and Optimization of Stand-alone Hybrid Renewable Energy Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 2111-2118(2009).
7. Santarelli, M., Cali, M. and Macagno, S., "Design and Analysis of Stand-alone Hydrogen Energy Systems with Different Renewable Sources," *International Journal of Hydrogen Energy*, **29**, 1571-1586(2004).
8. Asarari, A., Ghasemi, A. and Hossein, J., "Economic Evaluation of Hybrid Renewable Energy Systems for Rural Electrification in Iran-A Case Study," *Renewable and Sustainable Energy Review*, **16**, 3123-3130(2012).
9. Kim, M. and Kim, J., "Optimal Design and Economic Evaluation of Energy Supply System from On/Off Shore Wind Farms," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(2), 156-163(2015).
10. Kim, K. and Kim, J., "The Optimal Design and Economic Evaluation of a Stand-alone RES Energy System for Residential, Agricultural and Commercial Sectors," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(4), 470-478(2016).
11. HOGA, "Hybrid Optimization by Genetic Algorithms software, <http://www.unizar.es/rdufo>".
12. KEPCO, "Korea Electric Power Corporation, www.kepco.co.kr".
13. KOSIS, "Korean Statistical Information Service, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1JC1001&conn_path=I3".
14. KOSIS, "Korean Statistical Information Service, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=310&tblId=DT_3664N_1&conn_path=I3".
15. NASA Atmospheric Science Data Center <<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi>>.
16. Korea Electric Power Corporation, "Statistics of Electric Power in Korea," KEPCO Report: **No. 85**(2015).
17. Cho, S. and Kim, J., "Feasibility and Impact Analysis of a Renewable Energy Source (RES)-based Energy System in Korea," *Energy*, **85**, 317-328(2015).
18. Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd, "2008 Nuclear Power White Paper," (2008).
19. Kim, J. and Moon, L., "Strategic Design of Hydrogen Infrastructure Considering Cost and Safety Using Multiobjective Optimization," *Hydrogen Energy*, **33**, 5887-5896(2008).