

신재생에너지 발전 출력 예측과 경제성 종합평가 기술개발

전대성* · 김진영** · 김현구*** · 김종현**** · 염기웅***** · 신기열*****†

*주식회사에이원엔지니어링 기술연구소장
**한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 선임기술원
***한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 책임연구원
****대명지이씨(주) 발전서비스사업부, 상무
*****㈜팀데이터이십일, 대표이사
*****영남대학교 기계공학부, 조교수

Development of Economic Evaluation Solution and Power Prediction of Renewable Energy System

Jeoune Dae-Seong* · Kim Jin-Young** · Kim Hyun-Goo*** · Kim Jonghyun**** · Youm Carl***** · Shin Ki-Yeol*****†

*Director of Technology Research Center, A1 Engineering Inc.
**Senior Engineer, New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research
***Principal Researcher, New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research
****Director, DaeMyoung GEC Co., LTD.
*****CEO, TeamData21 Co., LTD.
*****Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

†Corresponding author: shinky@ynu.ac.kr



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.6, pp.93-112, December 2019
<https://doi.org/10.7836/kSES.2019.39.6.093>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 10 October 2019

Revised: 20 December 2019

Accepted: 23 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

In this paper, a very new web-based software for renewable energy system (RES) design and economic evaluation was introduced. This solution would provide the precise RES estimation service including not only photovoltaic (PV), wind turbine (WT) and fuel cell (FC) individually but also energy storage system (ESS) as combined forms with PV or WT. The three reasons why we ought to develop it are: First, the standardized tool suitable to the domestic environment for estimating power generation from RES facilities and economic evaluation is required. Secondly, the standardized tool is needed to spread domestic RES supply policy and to promote the new industry in the micro-grid field. The last, the reliability of economic evaluation should be enhanced more for new facilities. To achieve those aims, the weather database of one hundred locations have established and the RES facility database has also constructed. For the energy management, mathematical models for PV, WT, ESS and FC were developed. As a final phase, the analytical process to evaluate economics has performed with field data verification.

Keywords: 신재생에너지(Renewable energy), 경제성 평가(Economic evaluation), 발전 출력 예측(Power prediction), 태양광(Photovoltaic), 풍력(Wind power), 에너지저장장치(Energy storage system), 연료전지(Fuel cell)

1. 서론

국내외에서 보급이 급속히 확산되고 있는 신재생에너지 설비의 초기투자과 설비 운영의 효율을 향상하기 위해서는 다양한 발전설비에서의 전력생산량을 예측하고 장단기 운영수익을 통한 경제성 평가에 대한 연구가 필요하다. 기존의 화석연료 기반의 전력공급체계를 대체하고 이산화탄소(CO₂) 배출을 줄이기 위해서 전력공급 시스템의 신재생 에너지 공급 비율이 전 세계적으로 크게 증가하고 있다. 태양광 및 풍력 발전과 같은 재생에너지원(RES)은 시간 및 환경적 변동성으로 인해 출력의 불안정성이 높으며 발전출력을 예측하기도 어렵다¹⁾. 특정 부하 특성에 맞는 신재생에너지 공급 시스템의 최적 용량을 설계하는 것이 중요하다. 또한 투자설비의 발전량, 초기 투자비용과 운영비용을 기반으로 한 장단기 경제성 분석 또한 사업성 검토에 매우 중요한 요소이다²⁾.

이러한 요구에 대처하고 효율적으로 분석을 수행하기 위해 응용분야에 적합하도록 그 동안 많은 프로그램이 개발되었다. 각각의 개별 프로그램은 응용분야, 제공 데이터의 종류, 제공하는 기능, 결과로 주어지는 분석결과 및 보고서 내용 등에 따라 구분되는 특징을 가지고 있으며 현재 개발되어 가장 널리 사용되는 프로그램의 특징을 살펴보면 Table 1과 같다.

Table 1 Functional characteristics of various RES solutions

RES software tool	Supporting functionality								
	Economical Analysis	Technical Analysis	PV System	Wind System	Generator set	Storage device	Bio-energy	Hydro energy	Thermal System
HOMER	○	○	○	○	○	○	○	○	-
HYBRID2	-	○	○	○	○	○	-	-	○
iHOGA	○	○	○	○	○	○	-	○	-
RETScreen	○	○	○	-	-	○	-	-	-
HYBRIDS	-	○	○	-	-	○	-	-	-
SOMES	○	○	○	○	-	○	-	-	-
RAPSIM	-	○	○	○	○	○	○	-	-
SOLSIM	○	○	○	○	○	○	○	-	-
ARES-1 &11	-	○	○	○	○	○	-	-	-
HYSYS	○	○	○	-	○	○	-	-	-
INSEL	-	○	○	○	○	○	-	-	○
HybSim	○	○	○	-	○	○	-	-	-
Dymola/Mdelica	○	-	○	○	-	○	-	-	-
SOLSTOR	○	○	○	○	○	-	-	-	-
HySim	○	○	○	-	○	○	-	-	-
IPSYS	-	○	○	○	○	○	-	○	-
Hybrid Designer	○	-	○	○	○	○	-	-	-
TRNSYS	○	○	○	○	○	○	-	-	○
iGRHYSO	○	○	○	○	-	○	-	○	-

이와 같이 현재 다양한 신재생에너지 설비 해석과 경제성평가 평가 전용 프로그램들이 사용되고 있지만 국내 기상자료와 전력거래제도의 반영에는 한계가 있고 다양한 설비 종류별 조합과 용량의 최적설계나 장단기 경제성 평가를 위한 사용자 요구기능을 구현하는 데는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 기후와 전력산업의 정책과 제도적 환경을 적용할 수 있도록 신재생에너지 발전 설비의 해석과 운영수익을 통해 경제성 평가가 가능한 소프트웨어를 개발하고자 한다. Fig. 1은 목표로 하는 신재생에너지 경제성 평가 솔루션 툴의 개념을 나타낸 것이다. 새로운 프로그램을 개발에는 다양한 신재생에너지 설비의 해석 및 설계 툴의 개발경험이 필요하며 다양한 설비의 이론과 수학적 모델을 개발하고 종류별 설비의 다양한 용량의 조합에 따른 전력에너지 생산량 및 초기투자비 등을 비교하여 최적의 경제성을 도출하기 위한 최적화 모듈을 포함한다. 또한, 개별 사용자 설치 프로그램의 번거로움을 해소하고 다양한 사용자가 동시에 접속하여 사용할 수 있도록 표준화된 프로그램의 인터넷을 통한 웹기반 서비스 운영시스템으로 구축하고자 한다.

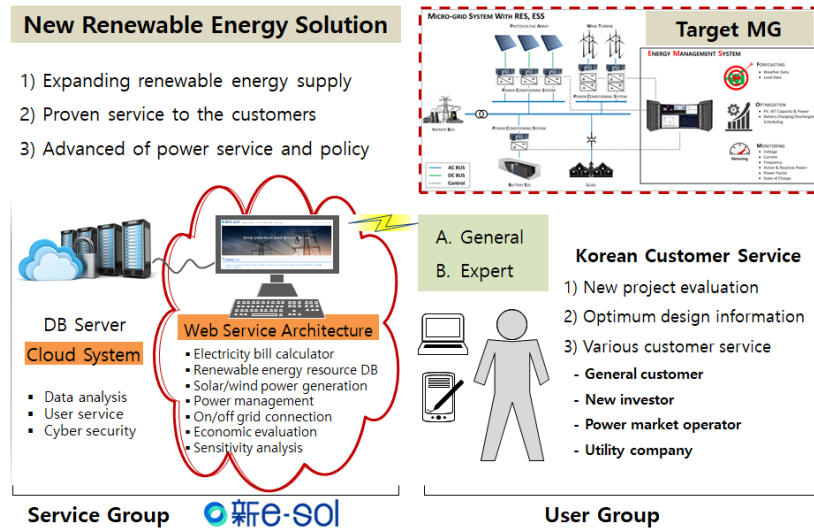


Fig. 1 Concept of new software service platform of the renewable energy solution

본 연구를 통해 표준화된 신재생에너지설비의 평가 툴을 개발하고 웹기반 서비스로 객관화된 경제성 평가결과를 제공하게 되며 시스템운영을 통해 확보된 다양한 고객의 요구사항은 별도의 서버를 통한 자료화가 가능하며 지역별, 용량별 사용자별 요구사항을 분석할 수 있어 향후 전력거래 시장의 제도개선안을 도출하는데 활용할 수 있다. 또한, 프로그램의 성능과 경제성 평가의 타당성을 확보하면 평가에 필요한 다양한 설비의 성능지표는 각 설비의 제조사가 제공하고 품질을 보장하도록 제도화하고 사용자 고객은 적절한 성능대비 가격의 제품을 비교 후 선택하여 설비시장의 품질을 향상하고 투명한 거래시장을 유도하기 위한 부가적인 기능도 지원 가능할 것이다.

2. 관련 연구 현황

신재생에너지 발전 해석과 경제성평가 관련 기술 및 과 프로그램 개발 관련하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 먼저 Sinha과 Chandel³⁾ 그리고 Connolly 등⁴⁾의 연구에서 하이브리드 재생에너지 시스템의 전기적, 경제적 및 환경적 성능을 분석하기 위해 여러 소프트웨어가 소개되었다. Mendes 등⁵⁾과 Markovic 등⁶⁾은 CES (Community Energy Systems)의 효율적인 계획을 위한 도구에 대한 조사를 수행하였다. 현재 국내에서 널리 사용되는 도구로는 TRNSYS⁷⁾ 및 HOMER⁸⁾ 프로그램이 있다. TRNSYS를 이용하여 신재생에너지 시스템에 대한 수많은 연구사례가 있다. 예를 들어, De Luca et al.⁹⁾은 이탈리아의 거의 제로 온실 도시의 재생에너지 시스템을 연구했으며 Venkataramani와 Ramalingam¹⁰⁾은 압축공기의 타당성에 대한 분석을 수행했다. Behzadi와 Niasati¹¹⁾은 태양광(PV)-연료전지(FC)-배터리(ESS) 하이브리드 시스템의 성능을 비교 연구하였다. HOMER를 이용한 다양한 연구수행사례도 있다. 예를 들어 Kalinci¹²⁾에 의한 터키 섬의 대체 에너지 시나리오 연구, Ngan 및 Tan¹³⁾에 의한 말레이시아의 태양광, 풍력, 디젤 하이브리드 에너지 시스템에 대한 경제성 실현, Amutha와 Rajini¹⁴⁾에 의한 농촌 통신을 위한 다양한 하이브리드 전력 시스템의 기술적 경제적 평가와 Demiroren과 Yilmaz¹⁵⁾에 의한 터키의 전기 에너지 비용 변화 등이 있다. Ghasemi 등¹⁶⁾과 Asrari 등¹⁷⁾은 이란의 농촌 전력 공급(Rural electrification)을 위한 하이브리드 재생 가능 에너지 시스템을 평가했다. Sen과 Bhattacharyya¹⁸⁾은 인도의 재생에너지 기술을 이용한 독립계통에서의 발전을 연구했다. Ramli 등은 플라이휠 에너지 저장 장치를 갖춘 태양광, 디젤 하이브리드 시스템의 경제 분석과 사우디아라비아에서 계통연계 태양광 발전시스템의 최적 용량설계 연구를 수행했다¹⁹⁻²⁰⁾. Shaahid 등²¹⁾은 같은 국가의 주거용 부하에 대한 태양광-디젤-배터리 하이브리드 전력 시스템의 경제성 평가를 검토했다. 한국의 Kim 등²²⁾과 Chung²³⁾를 포함하여 에티오피아의 Bekele와 Palm²⁴⁾, 중국의 Ma 등²⁵⁾, 그리스의 Giannoulis와 Haralambopoulos²⁶⁾ 그리고 스코틀랜드의 Chmiel와 Bhattacharyya²⁷⁾와 같이 다른 많은 국가에서도 비슷한 연구를 수행하였다. 마이크로 그리드 시스템은 Hafez와 Bhattacharyya²⁸⁾와 Abdilahi 등²⁹⁾의 연구에서 볼 수 있듯이 HOMER에 의해 쉽게 모델링 될 수 있는 인기 있는 연구주제 중 하나이다. Chade 등³⁰⁾에 의한 북극 원격 지역을 위한 바람-수소 시스템과 Mudasser³¹⁾등의 풍력-바이오-가스 하이브리드 에너지 생산에 대한 흥미로운 연구도 보고되었다.

최근, 재생에너지의 보급과 사용자 참여의 확대에 의해 전력 시스템의 지능형 관리기술이 인기 있는 연구주제 중 하나가 되었다. Pop 등³²⁾은 분산 에너지 프로슈머의 에너지 수요 프로파일의 적용 형태로 실시간 에너지 유연성을 제공하기 위한 분산형 블록체인 메커니즘의 사용을 연구했다. 그들은 블록체인 기반 분산 수요측 관리가 스마트 그리드 수준에서 에너지 수요와 생산을 일치시키는 데 사용될 수 있음을 확인하였다. Brusco 등³³⁾은 프로슈머의 자율적 수요반응을 위한 클라우드 기반 아키텍처에 적합한 저비용 에너지 박스(Energy box)의 한 쌍의 실험실 프로토타입을 제안했다. 그들은 실험실 테스트를 통해 제안된 프로토타입의 타당성과 수요-반응 문제의 해를 통해 고객의 부하 변동 반응을 실행하는 능력을 입증했다.

3. 핵심 요소기술 개발

개발 소프트웨어 플랫폼의 프로세스 순서대로 필요한 핵심 요소기술에 대한 개발내용을 기술한다. 먼저 입력 항목으로 국내 기후정보와 RES 설비에 대한 DB 구축 방법과 내용을 설명한다. 그리고 이를 바탕으로 신재생에너지 발전량 해석을 위한 발전 설비 해석방법을 수학적 모델로 제시한다. 대상이 되는 재생에너지원은 태양광 (photovoltaic, PV)과 풍력(wind turbine, WT)이며, 추가적으로 연료전지(fuel cell, FC)와 에너지저장장치 (energy storage system, ESS)의 성능해석 모델을 함께 포함하고 있다. 마지막으로 발전원으로부터 생산량과 저장 및 계통과의 전력거래량을 기반으로 보유설비의 운영수익을 계산하고 입력조건에 따른 장단기 경제성평가를 비교분석하는 절차와 방법을 기술한다.

3.1 국내 기후정보 및 지리정보

(1) 국내 기후정보

신재생에너지 발전 설비해석과 경제성 평가를 위해서 정확한 기후 데이터가 필요하며, 본 연구에서는 시간대별 정밀 기후 데이터를 제공하는데 목적을 둔다. 기초 데이터는 1982년부터 2017년까지 ASOS 측정 데이터와 2017년 천리안 위성을 통한 일사량 자료를 사용하였으며 자료의 신뢰성 향상을 위해 장기간 변동성 보정을 적용하여 Fig. 2와 같은 절차를 통해 Table 2와 같은 시계열 기후정보(MET meta data)를 생산한다. 그리고 국내

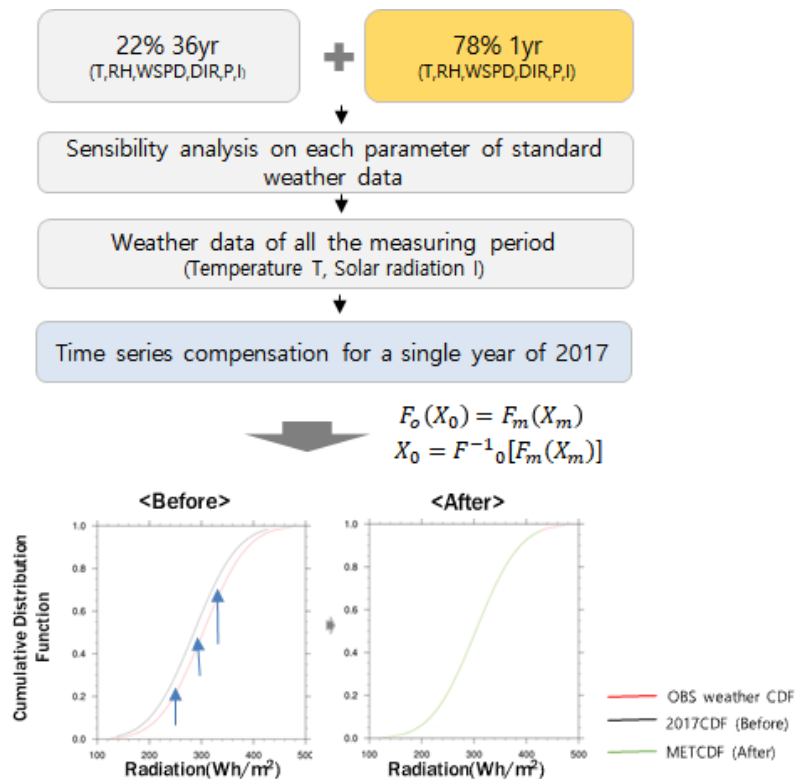


Fig. 2 Weather data generation with time series compensation

Table 2 MET meta data

Category	Contents
Data name	Long term compensation data of the year 2017 (MET data)
Measuring items	Temperature, Relative humidity, Atmosphere pressure, Wind speed, Wind direction, Horizontal radiation
Data source	Weather data measured at the 78 locations in Korea (Provided by KMA from Feb. 1, 2017 till Dec. 2017)
Measuring procedure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Representativeness analysis for a weather data of the year 2017 2. Selection of weather measuring places 3. Long term analysis of weather data 4. Time series compensation

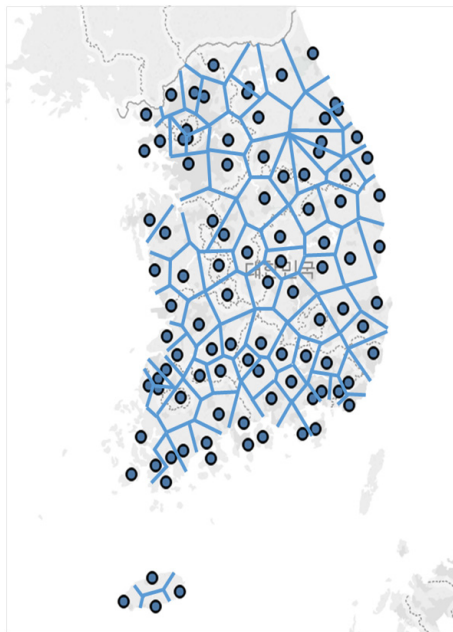


Fig. 3 Regional distribution of 100 locations in weather database

기후정보 참조 지점의 경우 기존 22개 국가참조표준 TMY를 포함하여 총 100개 지점에 대한 시계열 데이터베이스(Semi-TMY database)를 구축하였으며, 국내 지역적 분도는 Fig. 3과 같다.

이때 보정 변수는 Table 3에서 제시된 22지점 TMY 데이터에 대한 측정 불확도(Uncertainty in measurement)와 기후대표성을 모두 고려 선정하였다. 기상측정요소의 불확도는 풍속이 제일 크나, 문헌³⁴⁾에서 제시된 장기간의 기후변동 측면에서는 주성분이 일사량과 기온임을 감안하여 MET 보정변수로 선택하였다. Semi-TMY 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 기상측정요소가 아닌 2017년도 단일해 기후정보(MET)에 대해 UASIBS/KIER 위성영상기반 일사량 모델을 이용한 수평면 전일사량에 대한 신뢰성 분석을 수행하고 기상청 일사량과 비교하였다. 이러한 비교결과는 Fig. 4와 같이 약 97%의 정확도로 최고 수준을 나타내었다. 36년간의 일사량 측정 자료에 비해 2017년은 일사량이 높은 해로 과대 추정될 수 있는 단일해의 자료보다 기후보정을 수행했을 때 일사량이 약 16% 감소되었으며 이로 인해 결과적으로 발전량은 8~15%가 적게 예측되었다.

Table 3 Uncertainty in measurement of TMY

Parameter	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (m/s)	Wind direction (DegN)	Pressure (Pa)	Horizontal radiation (Wh/m ²)
Uncertainty in measurement (compared to mean value)	2.28%	3.00%	21.92%	-	0.05%	6.87%
Weather representativeness (main component analysis)	High	-	-	-	-	High

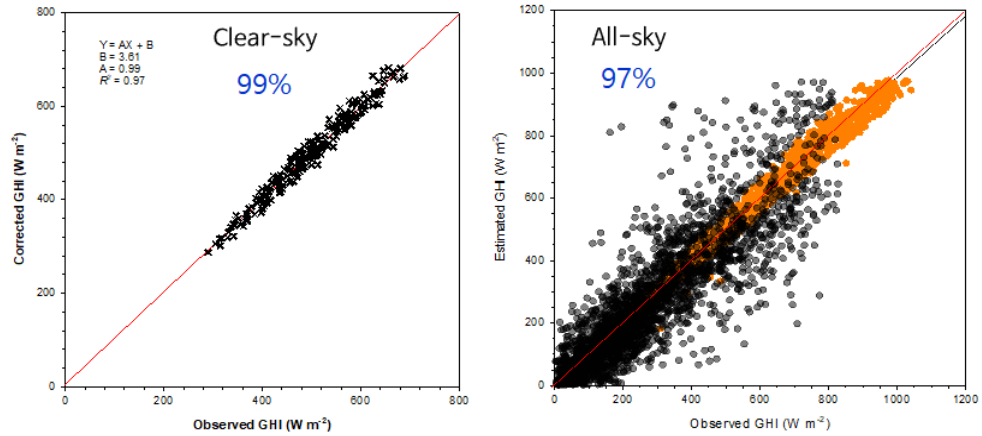


Fig. 4 Radiation distribution of MET compared with KMA data (black dots)

(2) 국내 지리정보 및 지역별 입지분석

신재생에너지 경제성 평가에 필요한 설비의 입지여부를 판단하기 위해 전국 지역별 입지환경을 분석할 수 있도록 지리정보 DB를 별도로 구축하였다. 국내 지리정보는 전국을 포함하는 WGS (World Geodetic System)84, UTM (Universal Transverse Mercator)52 좌표계로 표준화한 한국에너지기술연구원의 지리정보 데이터를 활용하여 공개데이터로 분류된 항목에 대해 GIS 데이터베이스를 구축하고 지리정보 각 레이어에 대한 메타데이터를 제시하였다. 지리정보 레이어는 모두 11종으로 지형고도, 토지피복도, 경사도, 생태자연도 1등급, 산사태 1등급, 백두대간 보호구역, 산림유전보호구역, 야생동식물 보호구역, 공원, 상수도 보호구역 등에 대한 공간 분석을 수행하였다.

지역별 입지정보는 행정구역별로 태양광 및 풍력 발전 설비가 위치할 수 없는 자연적 지리환경인 경사도 15도, 표고 100 m 이상, 산사태 1등급 지역을 배제하고 주변 지역의 특성을 분석하였다. 그리고 풍력은 추가적으로 습지를 배제한 통계량을 산정하였다. 이러한 정보들과 함께 정부부처 및 지자체의 발전설비 관련 지침을 토대로 솔루션 틀에서 위치 설정에 따른 입지분석 가이드라인을 제시하는데 활용하였다.

3.2 운영현황 DB 및 RES 설비정보

신재생 발전설비 국내 설치 운영현황 DB는 분산형 전원설비 네트워크 시스템의 발전소 현황을 기초로 웹 크

롤링 기술을 활용한 자동수집 프로그램을 사용하여 수집한 데이터로 구축되었다. 운영현황 DB는 태양광 159,716개소, 풍력 40개소의 데이터로 구성되어 있으며 각 발전설비 운영정보에는 총설비 용량과 연간 발전량 데이터를 포함하고 있다.

발전 설비해석에 필요한 주요 항목으로 기후정보와 함께 신재생 설비 데이터가 필수적으로 필요하다. 본 연구에서는 태양광 모듈과 풍력 발전기 그리고 ESS의 배터리에 대한 데이터를 수집하여 DB를 구축하였다. 태양광 모듈과 풍력 발전기는 국내외 제조사 제품 중 에너지관리공단에서 제공하는 데이터를 참조하여 KS 인증 획득 이력이 있는 제품을 대상으로 하였다. 또한 태양광 모듈은 제조사의 카탈로그를 획득하고 STC에서 전기적 사양을 조사하여 정리하였고 풍력 발전기는 제조사 카탈로그에서 기계적 사양과 출력특성곡선을 바탕으로 성능데이터를 정리하였다. 그리고 ESS 배터리는 KBIA의 인증을 받은 제품을 대상으로 선정하였고 카탈로그에 제공되지 않은 데이터는 충방전 특성곡선과 단위용량을 기준으로 단순화하여 계산에 사용하였다.

태양광 모듈과 풍력 발전기에 대한 필수 설비정보는 각각 22개와 25개 필드이며, ESS 배터리의 필수 정보는 22개의 필드를 가진다. 최종적으로 구축한 신재생 설비 DB는 국내외 주요 제조사의 태양광 모듈 3,352개, 풍력 발전기 116개 및 ESS 배터리 127개 제품에 대한 정보를 포함하고 있다.

3.3 RES 발전 설비 해석

태양광과 풍력발전 해석은 설치위치와 기상조건과 함께 제품의 물리적 특성을 해석해야만 정확한 발전량을 계산할 수 있다. 다양한 종류의 제품특성을 고려한 발전출력해석을 위해서 본 연구에서는 수학적 해석모델을 최대한 단순화하고

일반적인 이론을 적용하였다. Fig. 5에서는 태양광과 풍력발전해석의 절차를 도식화 한 것이다. 사용자 입력

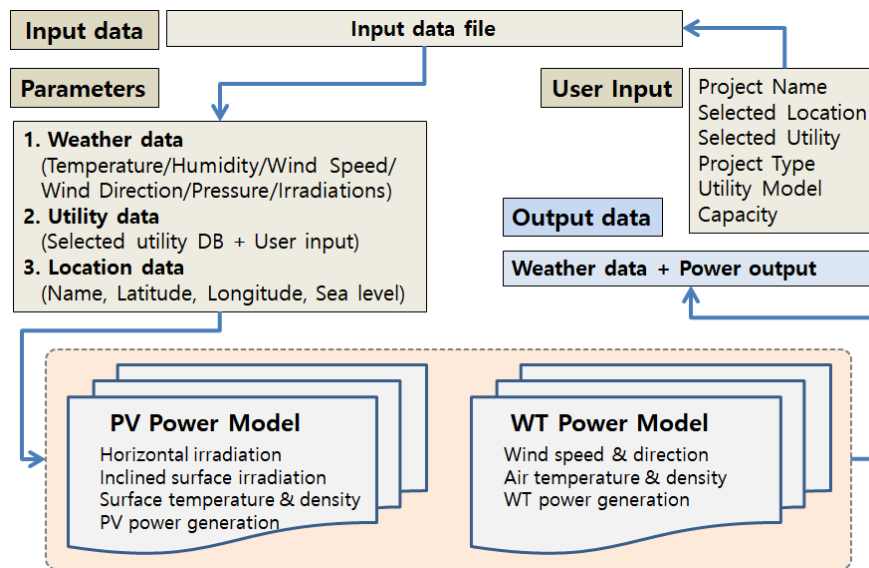


Fig. 5 Calculation process of physical analysis model for PV and WT power generation

조건에서 선택된 위치와 제품정보와 용량을 바탕으로 입력데이터가 생성되고 추가적인 사용자 선택정보를 이용하여 수학적인 모델을 이용하여 선택설비에서의 발전량이 계산된다.

(1) 태양광 발전 해석

본 연구에서는 태양광 발전량 출력을 예측하기 위해서 일사량 해석은 HDKR 모델을 사용하고 발전량 해석은 온도 영향을 고려한 성능 모델을 사용한다³⁵⁾. Table 4는 널리 사용되는 재생에너지 소프트웨어의 태양광 일사량 해석이론을 비교한 것이다.

Table 4 Comparison of solar radiation model of popular softwares for renewable energy analysis

RES software tool	Total radiation on the tilted surface	Irradiance of solar constant (I_{sc})	Input parameter of radiation
TRNSYS	Isotropic model	1.353 kW/m ² (= 4,871 kJ/hr·m ²)	Total Horizontal Radiation
	HD model		
	HDKR model		
	Perez model		
HOMER	HDKR model	1.367 kW/m ² (= 4,921.2 kJ/hr·m ²)	Global Horizontal Irradiance (GHI)
AIREGen*	HDKR model	1.367 kW/m ² (= 4,921.2 kJ/hr·m ²)	Total Horizontal Radiation

*AIREGen: Renewable Energy Generation module in this project.

태양광 발전 해석은 사용자 입력정보에 따라 선택된 지역 날씨와 설비정보를 이용하여 발전출력을 계산하며 다음과 같이 네 단계의 계산절차를 거쳐 수행된다.

- (1) 먼저 위치정보와 설치 경사각을 이용하여 태양에너지 입사각(Incidence angle)을 계산한다.
- (2) 두 번째는 해당 지점의 기상정보를 이용하여 수평면 일사량을 계산한다. 이때 외기온도, 습도의 영향을 고려한다.
- (3) 수평면 일사량을 HDKR 모델에 적용하여 설치 경사면으로 유입되는 총 일사량을 계산한다.
- (4) 마지막 네 번째 단계는 실제 발전량 출력 단계로 제품의 표준시험조건에서의 출력성능을 바탕으로 외기 온도에 의한 모듈표면온도와 사용기간에 따른 노화정도를 고려하여 최종 발전량을 계산한다.

(2) 풍력 발전 해석

풍력 발전해석은 풍속 해석이론으로 풍력 터빈 모델(wind turbine model)을 사용하고 발전량 해석에는 밀도(density)와 속도(velocity)의 영향을 고려한 성능 모델을 사용하여 다음과 같이 3단계의 계산절차를 거쳐 수행된다.

- (1) 먼저 첫 번째 단계로 제품 카탈로그의 풍속에 따른 발전량 출력을 공기 밀도에 따른 발전량 출력으로 보정한다. 여기에는 풍력 발전기 설치 고도에 따른 온도와 대기압의 영향을 고려한다.
- (2) 두 번째 단계는 높이에 따른 풍속 보정계산식으로 허브높이에서의 풍속을 계산한다.
- (3) 마지막 세 번째 단계는 실제 발전량 출력 단계로 연간 발전량은 시간 단위로 주어지는 기후정보에 따라 밀도와 높이에 따라 보정된 풍속에 대한 발전량 출력을 누적해서 합산함으로써 구할 수 있다.

(3) 에너지저장장치 해석 모델

본 연구에서 포함하고 있는 에너지 저장장치는 동적 전압 모델(dynamic voltage model)과 운동량 배터리 모델(kinetic battery model)에 의해 해석할 수 있다. 그리고 배터리 에너지 저장장치의 동적특성의 해석을 위해서는 충방전과정에서 온도상승과 장기간 사용에 따른 노화효과를 함께 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 배터리 에너지 저장장치의 연간 운전특성과 장기적 경제성평가를 목적으로 하여 비교적 간단한 비가역적 충방전 해석모델을 적용하였다. 충방전과정에 발열을 고려하지 않고 충방전 효율을 고려하여 충전상태량(state of charge, SOC)에 따라 충전량과 방전량을 계산한다.

(4) 연료전지 해석 모델

발전용 연료전지의 제품의 성능표에는 정격용량, 부분부하율(partial load), 연료 소비량, 배열 발생량 등의 운전성능 정보가 나타나 있다. 여기에서 발전용 연료전지의 전기에 대한 부분부하율은 발전용량에 대한 발전량의 비율로 나타나며, 열 부분부하율은 열회수용량에 대한 열회수량의 비율로 표시된다. 발전 효율(e-power efficiency)과 열회수 효율(heat recovery)은 부분부하율에 대한 함수로서 나타낼 수 있다. 발전 효율은 투입된 열에너지에 대한 생산된 전기 즉, 발전량의 비율로 계산되며, 마찬가지로 열회수 효율은 투입된 열에너지에 대한 회수된 열량의 비율로 계산된다.

3.4 경제성 평가

이상의 과정에서 신재생에너지 설비를 투자하여 발전 사업할 지역과 설비용량이 결정되면, 기상정보와 설비 정보를 바탕으로 계산된 연간 발전량과 설비에 따른 초기투자비를 근거로 수익과 지출에 대한 분석을 수행한다. 수익분석에는 계약방식에 따라 향후 20년간 SMP와 REC 단가 예측치를 반영하여 연간 수익을 계산한다. 이때 계약방식과 계약금액 그리고 향후 20년간 SMP와 REC 가격 변동 예측치는 선행연구의 결과를 바탕으로 기본값을 적용하였으며 사용자가 모든 항목에 대한 값을 변경할 수 있도록 경제성 평가 및 분석 프로그램을 설계하였다. Fig. 6은 경제성 평가를 위한 계산 절차를 나타낸 것이다.

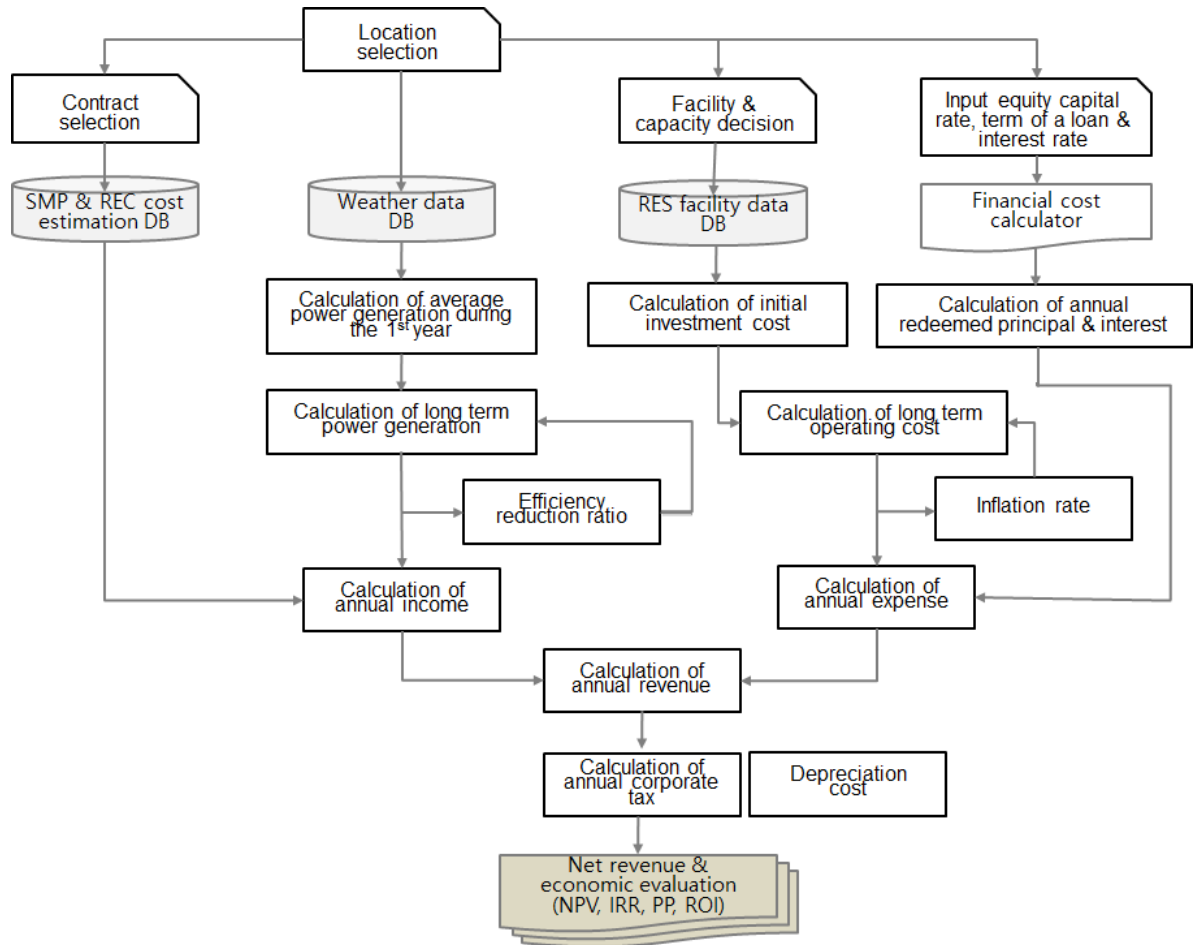


Fig. 6 Flow chart of economic evaluation process

3.5 솔루션 구현 및 차별화 특징

이상에서 기후정보 DB, 설비정보 DB, 발전설비 해석 및 전문가/실무자의 기능적 요구사항을 바탕으로 웹 기반 신재생에너지 경제성평가 소프트웨어 플랫폼을 구현하였다. 개발된 신재생에너지 경제성평가 솔루션은 다음과 같이 기존 상용 소프트웨어와 차별화되는 특징을 가지고 있다.

- (1) 국내 22개 지점의 국가참조표준 TMY를 포함한 100개 지점의 semi-TMY를 생산하여 DB를 구축하여 솔루션에서 활용함으로써 가장 정밀하고 신뢰성 있는 기후정보를 반영하고 있다.
- (2) 국내 지리정보 및 지역별 입지분석 DB를 통해 사용자가 선택한 지역에 대해 11종의 지역특성 정보를 쉽게 확인할 수 있다.
- (3) 표준 부하모델과 함께 사용자 정의 부하모델 등록 기능을 지원하고 사용자 설비등록도 가능하며 모든 변수에 대해 사용자가 변경 가능하기 때문에 일반인부터 전문가에 이르기까지 용도에 맞춰 사용이 가능하다.
- (4) 신재생에너지 설비에 대한 다양한 조합에 대한 발전량 산출 및 경제성 평가가 가능하다. 자가소비형과

사업자형에 따라 제공되는 설비 조합이 구별되며, Fig. 7에 나타난 것과 같이 PV, PV+ESS, 기보유 PV+ESS, WT, WT+ESS, 기보유 WT+ESS, ESS에 대한 다양한 설비조합에 대한 시뮬레이션 기능을 제공한다.

- (5) 입력변수의 값들을 가변 설정하여 여러 가지 경우에 대한 계산결과를 비교할 수 있는 민감도 분석 기능을 제공한다. 이 기능은 프로젝트의 계산조건의 입력변수 값이 경제성평가 분석 결과에 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있도록 해준다. Fig. 8은 민감도 분석의 한 예를 나타낸 것이다.



Fig. 7 Possible combination of renewable energy facilities according to user types

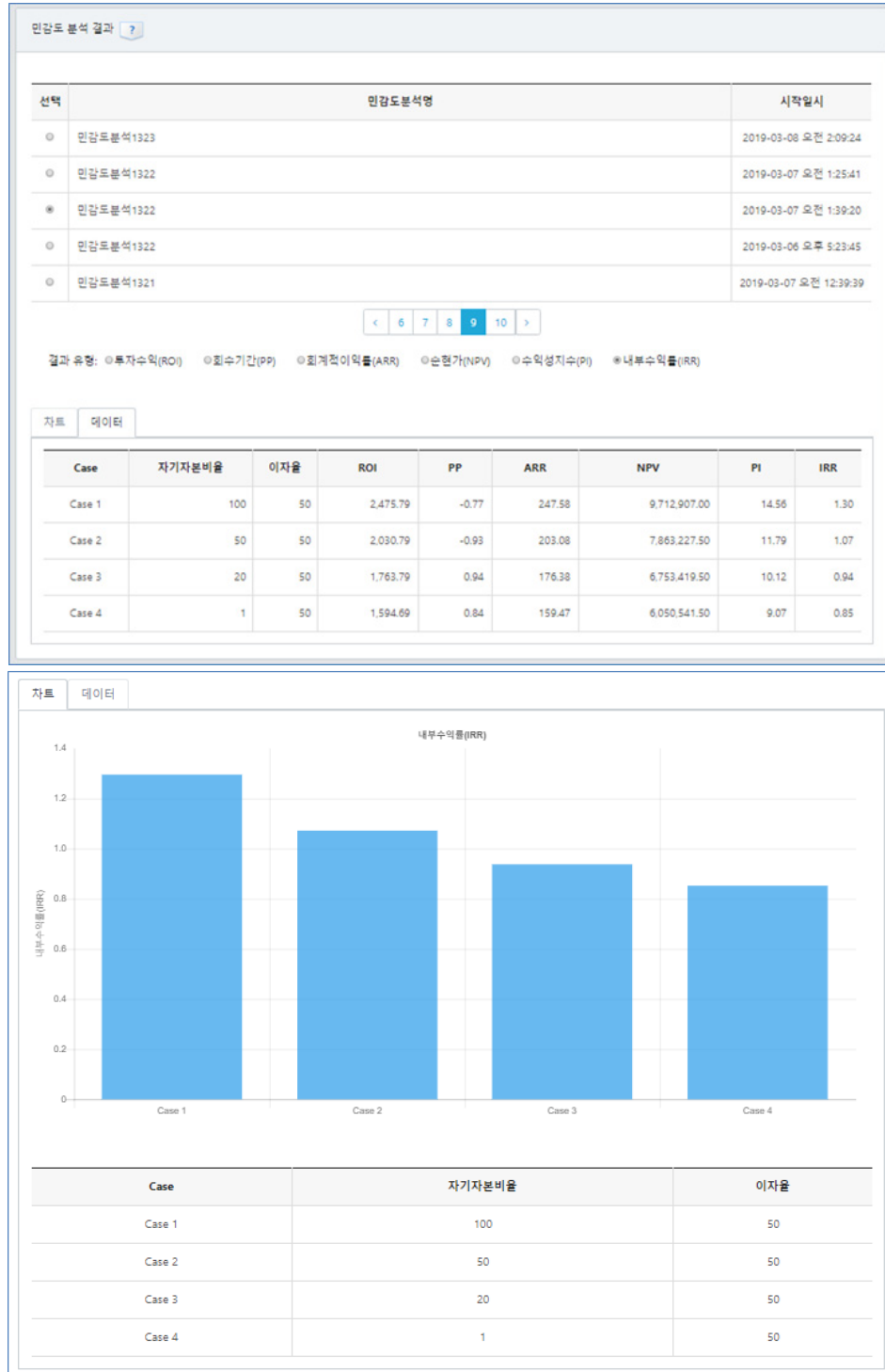


Fig. 8 An example of parametric sensitivity analysis result

(6) 여러 개의 개별 프로젝트에 대한 시뮬레이션 결과를 비교할 수 있는 비교 분석 기능을 제공함으로써 하나의 화면에서 비교가 용이한 장점이 있다. 프로젝트 간 비교 가능한 항목은 투자수익(ROI), 회수기간(PP),

회계적 이익률(ARR), 순현재가(NPV), 수익성 지수(PI) 그리고 내부 수익률(IRR)이 해당된다. Fig. 9는 비교 분석의 한 예를 나타낸 것이다.

- (7) 관리자 측면에서 솔루션 툴의 화면에 제공되는 모든 도움말을 관리자 모드에서 별도의 소스코드의 변경 없이 직접 텍스트를 수정하여 바로 적용될 수 있다는 관리상의 큰 장점이 있다.



Fig. 9 An example of comparative analysis result across multiple projects

4. 사례연구와 비교검증

해석 대상인 설비와 운전조건을 바탕으로 연간 설비운전해석을 위해서는 대상 설비를 통해 부하요구조건에 필요한 에너지를 공급하기 위한 일련의 프로세스가 필요하다. 반복 계산을 통해 발전량과 에너지 사용량을 정기적으로 요약하여 발전설비의 운전성능을 평가하고 에너지 거래량에 대한 요금을 정산할 수 있다. 예를 들어, 한 가지 유형의 태양광 발전으로 전력을 공급하는 경우에 한 달 동안 공급된 총 에너지량은 시간에 따라 발전량을 순차적으로 더하는 방법이 있지만, 한 달 동안의 발전량에 대한 분포표가 있더라도 결과는 동일하다. 다음은 각 해석모델별 사례연구를 통해 비교 기준데이터와 오차율을 검증해 보았다.

4.1 태양광 발전 설비해석 결과 검증

태양광 발전 설비해석을 검증하기 위해 개발 프로그램의 계산결과를 유사프로그램(HOMER)의 계산결과와 시간 단위, 월간 및 연간 발전량을 비교하였다. 또한, 실제 운영 중인 발전소의 발전량 측정치와 비교도 수행하였다. 먼저 태양광 발전 설비해석의 경우 두 가지 기후정보(KIER, Meteornorm)를 두 지점(인천, 광주)의 일사량과 발전량을 HOMER와 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 여기에서 일사량의 평균 제곱근 오차는 (RMSE)는 0.68~4.07%로 나타났고 전력량은 HOMER의 92%를 보였고 변동계수(CV-RMSE)는 0.68~4.07%로 나타나 우수한 결과를 보여준다. Fig. 11는 실제 운영 중인 태양광 발전소의 발전량 측정치와의 상관관계를 나타낸 것이며 3가지 프로그램에서 계산된 발전량과 비교한 결과 본 연구의 선형회귀분석 상관계수 값이 98.84%로 나타나 가장 높은 정확도를 나타내었다.

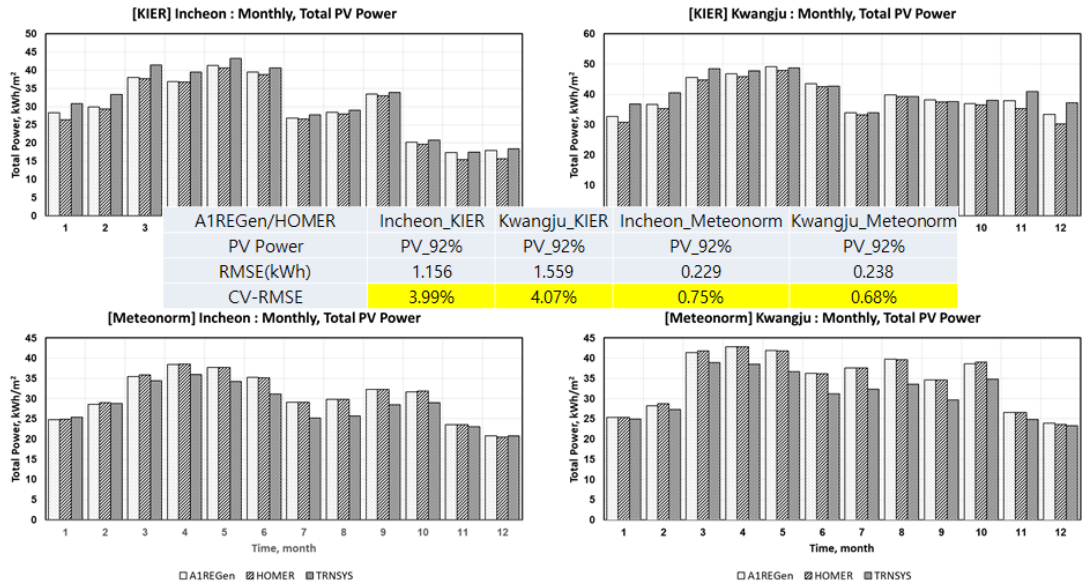


Fig. 10 Computational results of radiation by PV power generation facility analysis

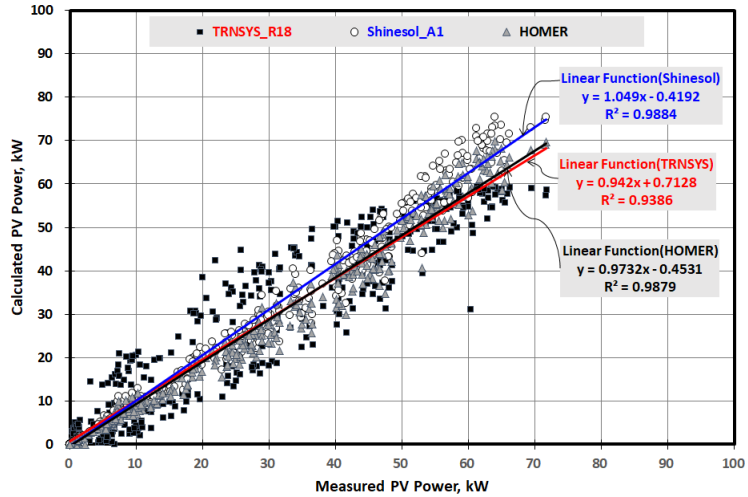


Fig. 11 Result of linear regression analysis with the measured data of actual PV power plants

4.2 풍력 발전 설비해석 결과 검증

풍력 발전 설비해석의 경우 두 지점(인천, 광주)에 대해 두 가지 기상자료를 이용하여 풍력 발전기(WT 500 kW)에 대한 연간 발전출력을 월간 누적 그래프로 Fig. 12에 나타내었다.

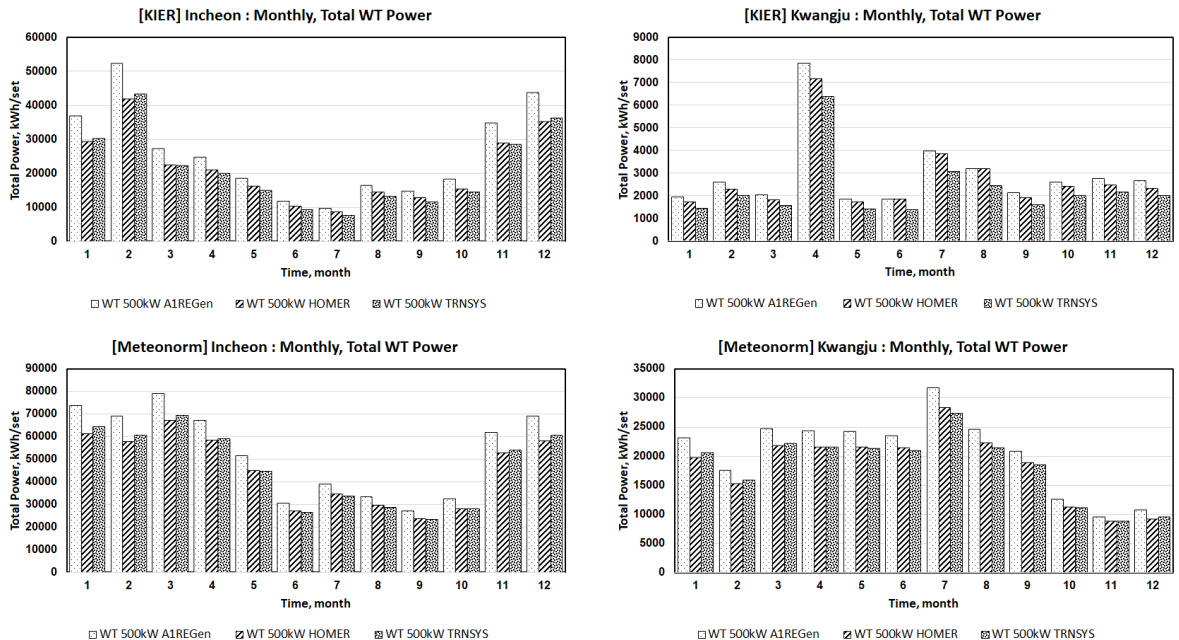


Fig. 12 Comparison of WT power generation results

본 연구의 풍력 발전 설비해석 결과와 HOMER와 TRNSYS의 계산결과가 큰 오차가 없다는 것을 알 수 있다.

그리고 Fig. 13은 실제 운영 중인 풍력 발전소와 월별 누적 발전량을 나타낸 것으로 계측정보가 있는 경우 연간 누적 오차율이 3.4% 이내로 나타남을 확인하였다.

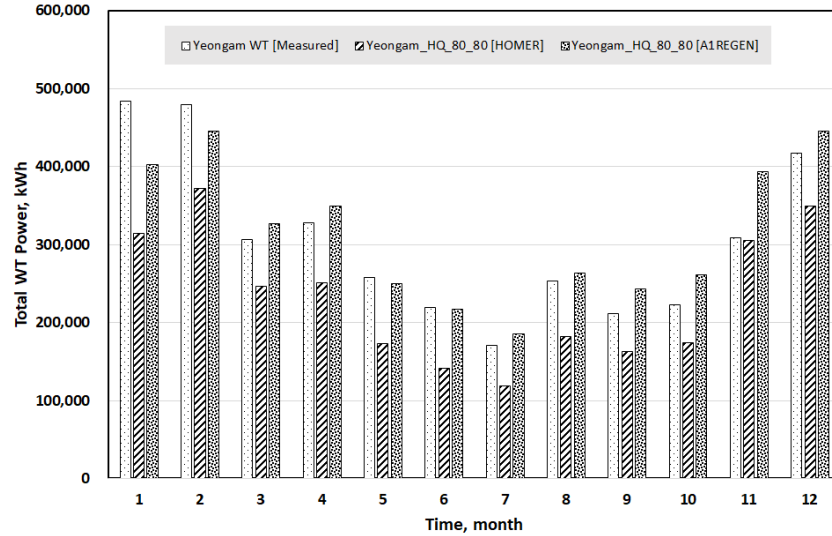


Fig. 13 Comparison with the monthly measured data of actual WT power plants

4.3 경제성 평가 결과 비교검증

마지막으로 본 연구에서 개발된 경제성 평가 및 분석 프로그램의 계산결과와 HOMER의 계산결과를 비교한다. 태양광과 풍력 발전의 경우, 동일한 지역 및 기상정보에 대해 초기투자비, 운영비용 등에 대한 경제성 출력을 검증하기 위해 순현재비용(NPC)과 발전단가비용(COE)을 비교하였다. 태양광 발전에 대해 개발 프로그램과 HOMER의 출력값을 비교한 결과, NPC 오차율은 3.84~51.95%, COE 오차율은 0.17~40.15%로 경우에 따라 큰 차이를 보였다. 그리고 풍력 발전의 경우에는 태양광 발전보다 더 큰 차이를 나타내었다.

본 연구의 개발 프로그램과 HOMER와의 비교를 위해 초기투자비와 수익에 대한 입력조건과 사회적 할인율을 동일하게 반영하였다. 그러나 실제 발전소와 가장 유사하게 적용하기 위해 개발 프로그램에 반영된 소내부 하 소비율, 연간 효율감소율 등은 HOMER에는 적용할 수 없으며 수익성 분석에서도 조건이 다르게 계산된다. 결론적으로 경제성 평가 및 분석은 프로그램마다 고유한 특성이 있으므로 비교 대상이 될 수 없다는 것을 확인하였다.

5. 결론

현재 보급이 급속히 확산되고 있는 신재생에너지 설비의 초기투자과 설비 운영의 효율을 향상하기 위해서는 다양한 발전설비에서의 전력생산량을 예측하고 장단기 운영수익을 통한 경제성 평가에 대한 연구가 필요하다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 기후정보, 설비정보, 신재생에너지 설비해석, 경제성 평가 등 각 분야에 대한 핵

심 요소기술을 개발하여 그 결과를 DB 구축 및 웹 기반 솔루션으로 구현하였다. 본 연구에서 신재생에너지 발전 설비의 해석과 운영수익을 통한 경제성을 평가하기 위한 도구의 개발을 통해 얻은 주요 결과와 시사점은 다음과 같다.

- (1) 개발된 프로그램에서 사용된 기후정보는 국가참조표준 TMY 데이터 22개소를 포함한 우리나라 100개 지역에서의 장단기 기상정보를 이용하였고 해석대상 설비에는 태양광, 풍력, 에너지저장장치, 연료전지를 포함하고 있다.
- (2) 자가소비형과 발전사업자용의 설비소유를 구분하고 사용자 유형별 에너지 부하모델을 적용하였으며 각 설비해석을 통한 발전출력 예측값과 경제성 평가결과는 실제 운영 중인 발전소의 운영자료와 비교 검증하였다.
- (3) 태양광 발전소의 실측값과의 비교검증에서 단위시간당 발전량의 월간 선형회귀분석 결과 결정계수 값이 98.84%로 매우 높은 예측정확도를 확인하였다. 풍력 발전의 경우 실제 기상조건 변동과 설비운영조건 등의 오차로 발전출력 예측값의 차이가 다소 크게 나타났다.
- (4) 개발된 프로그램은 다양한 실증설비들과의 비교검증과 신규투자고객의 요구사항을 반영하여 성능을 개선함으로써 향후 신재생 발전확대에 따른 국내 전력거래 시장의 제도개선안을 도출하는데 활용할 수 있을 것이다. 특히, 신재생에너지설비의 사용자, 신규투자자, 전력사업자, 설비생산자 등이 다양한 전력산업의 종사자들을 위해 에너지 생산수급현황을 분석하고 여러 가지 종류의 설비 설치조건이나 성능에 따른 에너지 생산량을 계산하고 PRS 제도나 전력시장 개방에 따른 다양한 전력거래제도에 대한 타당성을 평가하는데 사용될 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 2018년 한국전력공사 사외공모 연구과제의 지원으로 수행되었음(과제번호: R18EO02).

REFERENCES

1. Obushevs, A., Oleinikova, I., Syed, M., Zaher, A., and Burt, G., Future Electricity Market Structure to ensure large Volume of RES, European Energy Market(EEM), 14th IEEE International Conference, Dresden, Germany, pp. 1-6, 2017.
2. Verzijlbergh, R. A., De Vries, L. J., Dijkema, G. P. J., and Herder, P. M., Institutional Challenges Caused by the Integration of Renewable Energy Sources in the European Electricity Sector, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 75, pp. 660-667, 2017.
3. Sinha, S. and Chandel, S. S., Review of Software Tools for Hybrid Renewable Energy Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 32, pp. 192-205, 2014.
4. Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., and Leahy, M., A Review of Computer Tools for Analysing the Integration of Renewable Energy into Various Energy Systems, Applied Energy, Vol. 87, No. 4, pp. 1059-1082,

2010.

5. Mendes, G., Ioakimidis, C., and Ferrão, P., On the Planning and Analysis of Integrated Community Energy Systems: A Review and Survey of Available Tools, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 9, pp. 4836-4854, 2011.
6. Markovic, D., Cvetkovic, D., and Masic, B., Survey of Software Tools for Energy efficiency in a Community, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 9, pp. 4897-4903, 2011.
7. TRNSYS, www.trnsys.com.
8. HOMER, www.homerenergy.com.
9. De Luca, G., Fabozzi, S., Massarotti, N., and Vanoli, L., A Renewable Energy System for a Nearly Zero Greenhouse City: Case Study of a Small City in Southern Italy, *Energy*, Vol. 143, pp. 347-362, 2018.
10. Venkataramani, G. and Ramalingam, V., Performance Analysis of a Small Capacity Compressed Air Energy Storage System for Renewable Energy Generation using TRNSYS, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 4, p. 044106, 2017.
11. Behzadi, M. S. and Niasati, M., Comparative Performance Analysis of a Hybrid PV/FC/Battery Stand-alone System using Different Power Management Strategies and Sizing Approaches, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 1, pp. 538-548, 2015.
12. Kalinci, Y., Alternative Energy Scenarios for Bozcaada Island, Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 468-480, 2015.
13. Ngan, M. S. and Tan, C. W., Assessment of Economic Viability for PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System in Southern Peninsular Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 634-647, 2012.
14. Amutha, W. M. and Rajini, V., Techno-economic evaluation of various Hybrid Power Systems for Rural Telecom, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp. 553-561, 2015.
15. Demiroren, A. and Yilmaz, U., Analysis of Change in Electric Energy cost with using Renewable Energy Sources in Gökceada, Turkey: An Island Example, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 323-333, 2010.
16. Ghasemi, A., Asrari, A., Zarif, M., and Abdelwahed, S., Techno-economic Analysis of Stand-alone Hybrid Photovoltaic-diesel-battery Systems for Rural Electrification in Eastern Part of Iran – A Step toward Sustainable Rural Development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 456-462, 2013.
17. Asrari, A., Ghasemi, A., and Javidi, M. H., Economic Evaluation of Hybrid Renewable Energy Systems for Rural Electrification in Iran — A Case Study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 3123-3130, 2012.
18. Sen, R. and Bhattacharyya, S. C., Off-grid Electricity Generation with Renewable Energy Technologies in India: An Application of HOMER, *Renewable Energy*, Vol. 62, pp. 388-398, 2014.
19. Ramli, M. A., Hiendro, A., and Twaha, S., Economic Analysis of PV/diesel Hybrid System with Flywheel Energy Storage, *Renewable Energy*, Vol. 78, pp. 398-405, 2015.
20. Ramli, M. A., Hiendro, A., Sedraoui, K., and Twaha, S., Optimal Sizing of Grid-connected Photovoltaic Energy System in Saudi Arabia, *Renewable Energy*, Vol. 75, pp. 489-495, 2015.
21. Shaahid, S. M., Al-Hadhrami, L. M., and Rahman, M. K., Review of Economic Assessment of Hybrid Photovoltaic-diesel-battery Power Systems for Residential Loads for Different Provinces of Saudi Arabia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 174-181, 2014.
22. Kim, H., Baek, S., Park, E., and Chang, H. J., Optimal Green Energy Management in Jeju, South Korea-On-Grid and Off-Grid Electrification, *Renewable Energy*, Vol. 69, pp. 123-133, 2014.

23. Chung, M., Shin, K.-Y., Jeoune, D.-S., Park, S.-Y., Lee, W.-J., and Im, Y.-H., Economic Evaluation of Renewable Energy Systems for the Optimal Planning and Design in Korea – A Case Study, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 725-741, 2018.
24. Bekele, G. and Palm, B., Feasibility Study for a Standalone Solar-wind-based Hybrid Energy System for Application in Ethiopia, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, pp. 487-495, 2010.
25. Ma, T., Yang, H., and Lu, L., A Feasibility Study of a Stand-alone Hybrid Solar-wind-battery System for a Remote Island, *Applied Energy*, Vol. 121, pp. 149-158, 2014.
26. Giannoulis, E. D. and Haralambopoulos, D. A., Distributed Generation in an Isolated Grid: Methodology of Case Study for Lesvos-Greece, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 7, pp. 2530-2540, 2011.
27. Chmiel, Z. and Bhattacharyya, S. C., Analysis of Off-grid Electricity System at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for Developing Countries, *Renewable Energy*, Vol. 81, pp. 578-588, 2015.
28. Hafez, O. and Bhattacharya, K., Optimal Planning and Design of a Renewable Energy based Supply System for Microgrids, *Renewable Energy*, Vol. 45, pp. 7-15, 2012.
29. Abdilahi, A. M., Yatim, A. H. M., Mustafa, M. W., Khalaf, O. T., Shumran, A. F., and Nor, F. M., Feasibility Study of Renewable Energy-based Microgrid System in Somaliland's Urban Centers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, pp. 1048-1059, 2014.
30. Chade, D., Miklis, T., and Dvorak, D., Feasibility Study of Wind-to-hydrogen System for Arctic Remote Locations – Grimsey Island Case Study, *Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 204-211, 2015.
31. Mudasser, M., Yiridoe, E. K., and Corscadden, K., Cost-benefit Analysis of Grid-connected Wind-biogas Hybrid Energy Production, by Turbine Capacity and Site, *Renewable Energy*, Vol. 80, pp. 573-582, 2015.
32. Pop, C., Cioara, T., Antal, M., Anghel, I., Salomie, I., and Bertoncini, M., Blockchain based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids, *Sensors*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-21, 2018.
33. Brusco, G., Burgio, A., Menniti, D., Pinnarelli, A., Sorrentino, N., and Scarcello, L., An Energy Box in a Cloud-based Architecture for Autonomous Demand Response of Prosumers and Prosumages, *Electronics*, Vol. 6, No. 4, pp. 1-16, 2017.
34. Kim, S. Y., Kim, C. K., Kang, Y.-H., Yun, C.-Y., Jang, G. S., and Kim, H.-G., Comparative analysis on the characteristic of Typical Meteorological Year applying Principal Component Analysis, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 39, No. 3, pp. 67-79, 2019.
35. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4thEd., JohnWiley&Sons, pp. 89-96, 2013.