

국내에서 운영 중인 국산과 외국산 육상풍력발전기의 발전원가 분석

이건우*·고경남**

Analysis of LCOE for Korean and Foreign Onshore Wind Turbines in Operation in Korea

Keon-Woo Lee* and Kyung-Nam Ko**

Key Words : Onshore wind power (육상풍력), LCOE (균등화 발전원가), LFC (균등화 고정비용), LVC (균등화 변동비용), Monte carlo simulation (몬테카를로 시뮬레이션)

ABSTRACT

In order to reveal the levelized cost of energy (LCOE) of Korean and foreign wind turbines, a study was conducted for Korean onshore wind farms. Actual CapEx and OpEx data were obtained from audit reports for 26 onshore wind farms corresponding to 53.87 percent of the total onshore wind farms in Korea in the Data Analysis, Retrieval Transfer (DART) system. In addition, capacity factor (CF) data were calculated from data provided by Statistics Korea. Random numbers were generated from distributions that were fitted by the datasets, which were used as input data to perform a Monte Carlo simulation (MCS). The levelized fixed cost (LFC) and the levelized variable cost (LVC) were calculated from distributions of the CapEx, the OpEx and the CF. As a result, the LCOEs of the analyzed total Korean wind farms, and Korean and foreign wind turbines were 147, 148, and 146 USD/MWh, respectively. The averaged LCOE of Korea was estimated to be 4 USD/MWh lower than that of Japan, while it was much higher than German and global averages.

기호설명

<i>LCOE</i>	: 균등화 발전원가 [USD/MWh]
<i>LFC</i>	: 균등화 고정비용 [USD/MWh]
<i>LVC</i>	: 균등화 변동비용 [USD/MWh]
<i>CapEx</i>	: 총공사비 [USD/MW]

<i>OpEx</i>	: 연간 운영비용 [USD/MW]
<i>L</i>	: 풍력발전단지 운영수명 [years]
<i>AEP</i>	: 연간발전량 [MWh/y]
<i>i</i>	: <i>i</i> 년째 운영기간 [years]
<i>r</i>	: 할인율 [%]

1. 서론

국내 최초의 상업용 풍력발전단지인 행원 풍력발전

단지와 대단위 상업용 풍력발전단지인 영덕 풍력발전 단지가 각각 2002년과 2004년에 준공된 이후, 2021년까지 설치·운영 중인 국내 풍력발전단지의 누적 설비용량은 1.71 GW[1]이다. 그리고 2017년에 발표된 신재생에너지 3020이행계획[2]에 따르면 2030년까지 풍력발전 설비용량을 17.7 GW까지 확대할 계획이고 이에 따른 해상풍력 신규설비 설치목표는 12 GW이다[3]. 남은 신규설비 설치목표 5.7 GW는 육상풍력발전 설비의 확충으로 해결해야 한다. 2022년 4분기까지 건설계

* 제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정 박사과정
** 제주대학교 전기에너지공학과 교수 (교신저자)
E-mail : leekw2015@jejunu.ac.kr
DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.3.006>
Received : May 18, 2023, Revised : August 29, 2023
Accepted : August 30, 2023

획 중에 있거나 건설 중인 육상풍력발전단지들의 설비용량은 약 4.7 GW로[4] 신규 개발 사업 수요가 증가하고 있다. 더욱이 기존에 설치된 풍력발전단지 운영기간이 점차 설계수명인 20년에 도달하게 되면서 기존 발전단지를 재개발하는 리파워링의 수요 또한 증가하고 있다. 따라서 신규 개발과 리파워링 사업을 고려한다면 앞으로 육상풍력발전단지 개발에 대한 사업수요는 계속될 것으로 전망된다. 지속적인 육상풍력사업의 개발을 위해서는 면밀한 사업성 검토가 이루어져야 할 것이고 이에 따라 경제성 분석의 중요성도 커지고 있다.

경제성 분석은 순현재가치(Net present value, NPV), 내부수익률(Internal rate of return, IRR) 등의 방법으로 분석되며 풍력발전단지의 발전 수익은 계통한계가격(System marginal price, SMP)과 신재생에너지 공급인증서(Renewable energy certificate, REC)의 거래가의 합으로 산정된다. 2022년부터 풍력분야에 고정가격계약 경쟁입찰제도가 도입됨에 따라 풍력발전단지들은 사전에 발전 수익을 20년 고정으로 계약할 수 있게 되었다. 이러한 발전 수익의 적정성을 사전에 판별하기 위해서는 발전원가인 LCOE(Levelized cost of energy)를 분석해야 한다.

해외에서는 미국 국립재생에너지연구소(National renewable energy laboratory, NREL)와 국제재생에너지기구(International renewable energy agency, IRENA) 등에서 풍력발전에 대한 경제성 분석 보고서 [5, 6]를 주기적으로 발간하고 있으나 국내에서는 아직까지 정기적으로 발간되는 보고서나 통계 자료가 없으며 경제성 분석에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있지 않다. 최근 국내 연구가 육상풍력 연구보다는 해상풍력 연구로 무게중심이 이동하고 있는 실정으므로 경제성 분석 연구 또한 국내 육상풍력보다 해상풍력사업의 경제성 분석 연구[7-9]가 주를 이루고 있다.

국내 육상풍력사업 경제성 분석과 관련하여 다음과 같은 연구들이 수행되었다. 먼저 재무적 가정을 이용하여 운영비용인 OpEx(Operational expenditure)를 총 공사비인 CapEx(Capital expenditure) 대비 약 1.5 ~ 2.5 %의 비율로 산정하고 LCOE를 추정한 연구[10]가 있었으나 다른 연구[11]에서는 이를 과소추정된 것으로 판단하고 실제 데이터를 활용하여 OpEx를 추정하는 연구를 수행하였다. 또 다른 연구[12]에서는 실제 OpEx 데이터를 활용하여 국내 육상풍력발전단지의 LCOE 추정하고 사회적 할인율 인하 효과에 대하여 분석하였다. 최근 중장기 발전원가 전망 시스템 구축

및 운영에 대한 연구[13]가 수행되고 있는데, 해당 연구에서는 CapEx와 OpEx의 비용조사 결과를 바탕으로 LCOE를 추정하고 있다. 이러한 연구들은 모두 국내 육상풍력사업 전체의 LCOE를 추정하는 연구를 수행한 것이다. 하지만 아직까지 국산 풍력발전기를 설치한 육상풍력발전단지(국산발전단지)와 외국인 풍력발전기를 설치한 육상풍력발전단지(외산발전단지)를 구분하여 LCOE를 추정하고 이들의 경제성을 비교하는 연구는 이루어지지 않았다. 최근 들어 발전설비의 국산화가 중요한 이슈로 대두되고 있으므로 이러한 비교 연구의 중요성은 커지고 있다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 실제 CapEx와 OpEx를 활용하여 국내 육상풍력발전단지의 LCOE를 추정하고 국산발전단지와 외산발전단지의 LCOE를 비교 분석하는데 있다. 이를 위하여 금융감독원의 전자공시시스템(Data Analysis, Retrieval and Transfer system, DART)[14]의 감사보고서에서 실제 풍력발전단지의 CapEx와 OpEx 데이터를 수집하고 이들을 분석 데이터로 활용한다. CapEx는 풍력발전시스템의 감가상각액과 매진비용의 발생 여부 등에 관한 감사보고서의 정보와 언론에 알려진 공사비 정보 등을 종합하여 추정하고, OpEx는 매출원가, 판매비와 관리비 등 구성요소들을 감사보고서로부터 도출하였다. 또한 지역별 실제 이용률(Capacity factor, CF) 데이터를 수집하여 분석에 사용한다. 분석에 사용된 데이터를 국산발전단지와 외산발전단지의 데이터로 분류하고 이를 기반으로 몬테카를로 시뮬레이션(Monte carlo simulation, MCS)을 수행한 다음, 이들의 LCOE를 비교 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 LCOE

이 연구에서는 LCOE를 고정비용인 LFC(Levelized fixed cost)와 변동비용인 LVC(Levelized variable cost)의 합으로 산출하였고 그 식은 다음과 같다.

$$LCOE (USD/MWh) = LFC + LVC \quad (1)$$

$$LFC = \frac{CapEx}{\left(\sum_{i=1}^L \frac{AEP(i)}{(1+r)^i} \right)} \quad (2)$$

$$LVC = \frac{\left(\sum_{i=1}^L \frac{OpEx(i)}{(1+r)^i} \right)}{\left(\sum_{i=1}^L \frac{AEP(i)}{(1+r)^i} \right)} \quad (3)$$

2.2 데이터 선정

국내 육상풍력발전단지의 LCOE 추정을 위하여 DART에 공개된 발전단지 설비용량이 10 MW이상이면서 육상풍력발전기만을 운영 중인 상업용 풍력발전 단지를 선정하였다. Table 1은 선정된 풍력단지의 용량과 그 비율을 나타낸다. 분석된 발전단지의 설비용량은 854 MW였고 이는 2021년 기준 육상풍력발전 누적설비용량 1,585 MW의 53.87 %에 해당한다.

또한 국내 육상풍력발전단지의 LCOE를 국내 풍력발전기 제조사(Korean manufacturer, KM), 즉, 국산인 풍력발전기를 사용한 발전단지와 외국산인 해외 풍력발전기 제조사(Foreign manufacturer, FM)의 제품을 사용한 발전단지로 나누어 분석하였고 Table 2에 이를 나타낸다. 국산발전단지와 외산발전단지의 수는 각각 11 개소와 15 개소이고 그들의 설비용량은 각각 약 289 MW와 565 MW였다. 또한 설치된 국산과 외국산 풍력발전기들의 정격출력 평균은 각각 약 2.0 MW와 2.9 MW였다. 현재까지 외국산 풍력발전기는 국산 풍력발전기보다 약 1.96배 더 많이 설치되어 있고 정격출력 또한 약 1.45배 더 높다.

Table 1 Wind turbine capacity and the ratio of analyzed wind farms

Description	Value
Capacity of accumulated onshore wind farms in 2021 [MW]	1,585
Capacity of analyzed wind farms [MW]	854
Ratio of analyzed wind farms [%]	53.87

Table 2 Capacity and number of wind turbines by manufacturers

Description	KM	FM
No. of analyzed wind farms [unit]	11	15
Installed capacity [MW]	289	565
No. of wind turbines [unit]	153	233
Average capacity of installed wind turbines [MW]	2.0	2.9

2.3 몬테카를로 시뮬레이션

기존 연구들[12, 15]에서 부족한 데이터를 보완하기 위한 방법으로 활용된 MCS를 본 연구에도 적용하여 LCOE를 추정하였다. MCS는 변수 데이터의 분포를 활용하여 난수를 생성하고, 생성된 난수를 활용하여 무수히 많은 반복실험을 수행하는 분석방법이다. MCS를 사용하는 절차는 기존 연구[12]의 절차를 따랐으며 난수 생성을 위하여 CapEx, OpEx, CF를 분포 추정하였다. 또한 반복 실험의 횟수는 1,000,000 번을 설정하였다.

3. 데이터 분석

3.1 투입 변수 분석

Table 3은 투입 변수 데이터의 정보와 추정 분포에 대한 샤피로-윌크 검정(Shapiro-Wilk test, S-W test) 결과를 보여준다. MCS에 활용하기 위하여 CapEx, OpEx, CF를 분포화하였다. CF는 국가통계포털[1]에서 제공되는 데이터와 기존 연구[12]에서 사용된 자료를 바탕으로 데이터가 없는 2015년을 제외한 2011년부터 2021년까지의 지역별 데이터를 취합하여 분석에 사용하였다. 또한 국산발전단지와 외산발전단지들의 LCOE 추정 시, 동일한 조건을 부여하기 위하여 지역별 CF 데이터를 분리하지 않고 전국 CF 데이터로 분포화하여 시뮬레이션에 적용하였다. CapEx와 OpEx 데이터는 연도별 원달러 환율의 평균값을 적용하였다.

이 Table에서 분석된 전체 육상풍력발전단지(All), 국산발전단지와 외산발전단지들의 CapEx는 각각 2,506 USD/kW, 2,515 USD/kW와 2,499 USD/kW였고 OpEx는 각각 71 USD/kW, 72 USD/kW와 71 USD/kW였다. 그리고 CF의 지역별 데이터의 평균값은 21.8 %였다. 이 데이터들을 이용하여 MCS의 데이터인 난수를 생성하기 위한 분포를 추정하였다. 우선 정규 분포(Normal distribution)에 대한 분포 적합도 검정을 수행하고 정규 분포에 적합하지 않는 데이터는 매개변수에 따라 분포 형태가 자유로운 와이블 분포(Weibull distribution)로 설정하였다.

정규 분포의 적합도 검정을 위하여 샤피로-윌크 검정을 수행하였고 이에 대한 유의수준은 0.1로 선정하였다. 그 결과, 분석된 전체 육상풍력발전단지, 국산발전단지와 외산발전단지들의 CapEx의 추정 분포는 각

Table 3 Input data and fitted distribution after Shapiro-Wilk test

Category	Parameters	No. of data	Mean	Min	Max	SD	S-W test [P-value]	Distribution
All	CapEx [USD/kW]	26	2,506	1,572	3,655	527	0.900	Weibull
	OpEx [USD/kW]	165	71	13	200	31	0.000	Normal
	CF [%]	56	21.8	11.8	32.0	4.4	0.672	Weibull
KM	CapEx [USD/kW]	11	2,515	1,867	3,655	580	0.062	Normal
	OpEx [USD/kW]	65	72	27	152	25	0.008	Normal
FM	CapEx [USD/kW]	15	2,499	1,572	3,222	506	0.218	Weibull
	OpEx [USD/kW]	100	71	13	200	34	0.000	Normal

각 와이블 분포, 정규 분포, 와이블 분포였고 OpEx의 분포는 모두 정규 분포였다. 그리고 CF는 와이블 분포였다.

MCS에서 LCOE를 추정하기 위해 필요한 요소들을 추가적으로 투입하였다. 추가적인 투입변수인 할인율, 물가상승율, 발전단지 운영기간 데이터를 상수로 정의하였고 그들의 값은 각각 4.5 %, 2.0 %, 20 년이었다.

Fig. 1은 연도별 국산발전단지와 외산발전단지들의 CapEx를 보여준다. 그림에서 실선은 IRENA[6]에 보고된 세계 CapEx 데이터의 평균을 나타낸다. 국산발전단지들의 CapEx는 2012년부터 데이터가 수집되어 편차가 크지만 일정 수준을 유지하는 추세를 보이고 있고, 외산발전단지들의 CapEx는 2005년부터 데이터가 수집되어 상승하다가 일정해지는 추세를 보이고 있다. 국산과 외산발전단지에 관계없이 한국의 CapEx는 세계추세에 비해 상당히 높음을 알 수 있다. 한국의 CapEx가 세계추세에 비해 높은 원인은 환경규제와 입지제약으로 인한 비용의 증가, 민원 비용의 증가, 그리고 세계적인 에너지 가격 상승 여파로 인한 운임비용의 상승 등으로 판단된다.

Fig. 2는 국산발전단지와 외산발전단지들의 OpEx를 연도별로 보여준다. 2012년부터 국산발전단지들의 데이터가 수집되었고 2017년까지 국산과 외산발전단지들의 OpEx는 비슷하였으나 2018년부터 외산발전단지들의 OpEx가 크게 상승하였음을 확인할 수 있다. 이들 중 150 USD/kW를 초과하는 데이터는 총 6개였다. 감사보고서 분석 결과, 국산 데이터는 1개로 수수료의 상승이 그 원인이었다. 외국산 데이터는 5개로 수선료의 증가가 급격한 운영비용 상승의 원인이었다. OpEx가 급격히 증가한 외국산 발전단지의 입지조건은 지형복잡도를 나타내는 RIX (Ruggedness index)를 이용하여 확인하였고 그 값은 복잡지형에 해당하는 10

%이상이었다. 따라서 수선료의 증가는 복잡지형에 따른 풍력발전기들의 잦은 고장 등으로 인한 유지보수 비용의 상승이 원인으로 판단된다.

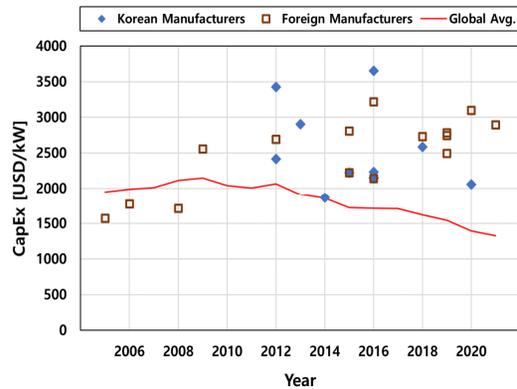


Fig. 1 Comparison between Korean and foreign CapExs with year

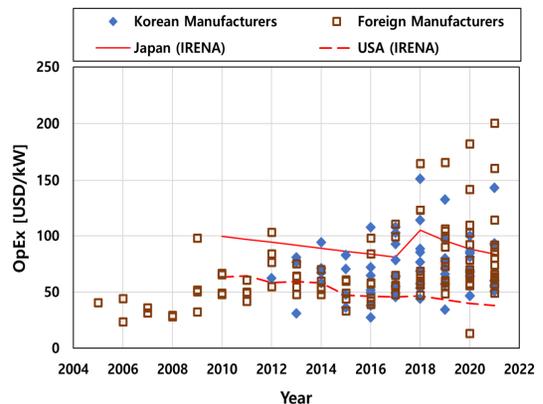


Fig. 2 Comparison between Korean and foreign OpExs with year

3.2 LCOE 추정

Table 4는 LCOE 구성요소인 CapEx, OpEx, CF에 대한 MCS 난수 생성의 결과를 보여준다. 분석된 한국 전체 육상풍력발전단지의 CapEx와 OpEx의 평균값(Mean)은 각각 2,560,122 USD/MW와 73,220 USD/MW였다. CapEx는 소스 데이터와 마찬가지로 국산발전단지가 외산발전단지보다 높았고 OpEx는 소스 데이터와 다르게 국산발전단지가 외산발전단지보다 낮게 나타났다. 그 이유는 국산발전단지와 외산발전단지의 OpEx의 평균값은 비슷하였으나 외산발전단지의 표준편차가 국산보다 9 USD/kW 높은 것이 시뮬레이션에 영향을 미쳤기 때문이다. 국산과 외산발전단지의 LCOE 추정 시, CF는 동일한 조건을 부여하기 위하여

지역별 데이터를 분리하지 않고 전국 데이터로 분포화하여 시뮬레이션에 적용하였으므로 한국 전체 육상풍력발전단지, 국산과 외산발전단지의 평균값은 모두 22.0 %였다.

Fig. 3은 LFC와 LVC 추정 결과를 비교하여 보여준다. 분석된 한국 전체 육상풍력발전단지, 국산과 외산발전단지의 LFC의 평균값은 각각 102.41 USD/MWh, 104.54 USD/MWh와 100.29 USD/MWh로 나타났고 국산발전단지의 LFC가 외산발전단지보다 4.25 USD/MWh 높았다. LVC의 평균값은 각각 45.87 USD/MWh, 46.19 USD/MWh와 46.40 USD/MWh였고 국산발전단지의 LVC가 외산발전단지보다 0.21 USD/MWh 낮았다. LFC와 LVC는 식 (2), (3)과 MCS의 난수 생성과정에 의하여 소스 데이터인 CapEx와 OpEx 분포의 영향을 받는다. 국산과 외산발전단지의 LFC와 LVC의 표준편차(SD)의 크기의 순서는 소스 데이터인 CapEx와 OpEx의 크기의 순서와 같았다.

MCS 수행 결과, LCOE의 구성요소인 LFC와 LVC는 난수 생성을 위한 변수 분포의 영향으로 인해 분포의 형태가 다양하게 나타남을 확인할 수 있다. 평균값, 중앙값(Median)과 최빈값(Mode)의 차이의 크기가 투입 변수의 편차에 따라 다르게 나타나므로 평균값이 시뮬레이션 결과의 분포에 따라 분석 결과를 온전히 대표하지 못할 수도 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 최빈값을 LCOE 추정의 대푯값으로 선정하였다.

Fig. 4는 분석된 한국 전체 육상풍력발전단지, 국산과 외산발전단지의 LCOE 추정 결과를 보여준다. 분석된 한국 전체 육상풍력발전단지, 국산과 외산발전단지

Table 4 LCOE components results by MCS

Category	Stat.	CapEx [USD/MW]	OpEx [USD/MW]	CF [%]
All	Mean	2,560,122	73,220	22.0
	Median	2,567,394	72,248	22.0
	SD	465,489	28,379	0.9
KM	Mean	2,613,357	73,731	22.0
	Median	2,584,624	72,820	22.0
	SD	420,575	22,878	0.9
FM	Mean	2,507,225	74,071	22.0
	Median	2,536,676	72,681	22.0
	SD	382,849	30,488	1.0

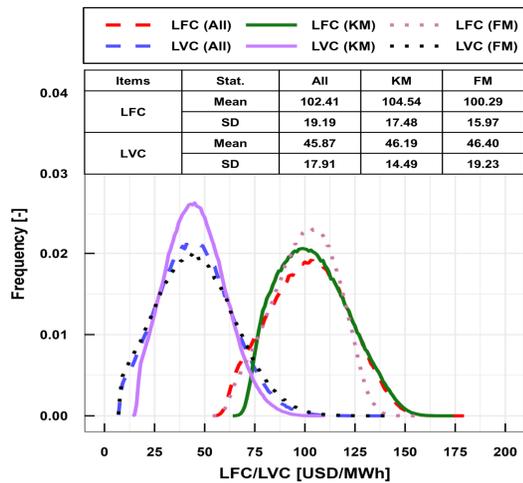


Fig. 3 Comparison between LFC and LVC results by MCS

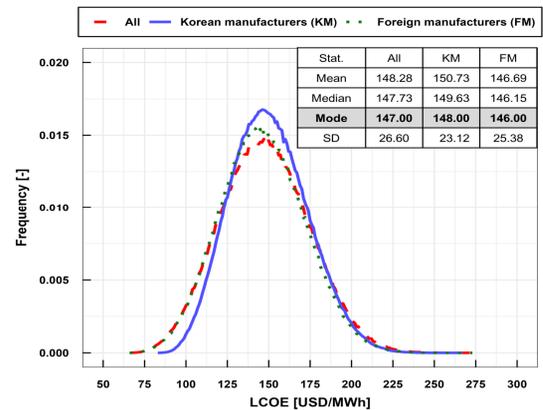


Fig. 4 Comparison between LCOE results by MCS

의 LCOE는 각각 147 USD/MWh, 148 USD/MWh와 146 USD/MWh로 추정되었다. 국산발전단지의 표준편차는 외산발전단지보다 작은 것으로 나타났고 분석된 한국 전체 육상풍력발전단지와 외산발전단지의 분포의 형태는 유사하였다. LCOE는 식 (1)에 의하여 LFC와 LVC의 합으로 이루어지므로 LCOE의 분포는 국산과 외산발전단지의 LFC와 LVC의 분포의 형태에 영향을 받는다. 즉, 소스 데이터인 CapEx와 OpEx의 표준편차가 LCOE에 영향을 주는 것이다. LFC와 LVC의 표준편차가 복합적으로 작용하여 LCOE에 반영되었고, 그 결과 국산발전단지의 표준편차가 외산발전단지의 표준편차보다 작게 나타났다.

한국과 세계의 LCOE 수준을 비교하기 위해서는 동일한 풍력단지 운영수명을 적용하여야 한다. 본 연구에서는 20년의 운영수명을 사용하였으나 IRENA[6]의 LCOE 값들은 본 연구와는 다르게 25년의 운영수명을 적용하였다. 따라서 세계의 LCOE와의 비교를 위해서는 운영수명 25년에 해당하는 LCOE를 재계산하여야 한다. 한국의 LCOE를 재계산하기 위하여 Table 4에 나타난 CapEx, OpEx와 CF의 평균값과 함께 25년의 운영수명을 사용하였고, 그 결과를 세계 LCOE와 함께 Table 5에 나타낸다. 한국 전체 육상풍력발전단지와 국산·외산발전단지의 LCOE는 각각 137 USD/MWh, 139 USD/MWh와 136 USD/MWh로 나타났고, 일본과 독일, 그리고 세계의 2021년 LCOE의 평균값은 각각 141 USD/MWh, 51 USD/MWh와 33 USD/MWh였다. 일본의 2021년 평균값은 한국 전체의 LCOE보다 4 USD/MWh 높았고 독일과 세계의 2021년 평균값은 모두 한국보다 상당히 낮았다.

Table 5 Comparison between LCOEs of Korea and other countries

Items	CapEx [USD/kW]	OpEx [USD/kW]	CF [%]	Life time [yrs]	LCOE [USD/MWh]	
Korea	All	2,560	73.2	22	25	137
	KM	2,613	73.7	22	25	139
	FM	2,507	74.1	22	25	136
Japan [6] (2021 avg.)	3,131	83.9	24	25	141	
Germany [6] (2021 avg.)	1,712	44.3	28	25	51	
Global [6] (2021 avg.)	1,325	37.3	39	25	33	

4. 결론

국내 육상풍력발전단지의 실제 LCOE를 추정하기 위하여 상업용 육상풍력발전단지의 실제 CapEx와 OpEx 데이터를 수집하였고 설치된 풍력발전기의 제조사를 국산과 외국산으로 분류하여 LCOE를 추정하였다. CF는 우리나라 전체 평균 데이터를 사용하였다. 선정된 데이터를 기반으로 우리나라 전체 육상풍력발전단지의 LCOE를 대표하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)을 수행하였다.

MCS 수행결과, 분석된 전체 육상풍력발전단지, 국산과 외산발전단지의 LCOE는 각각 147 USD/MWh, 148 USD/MWh와 146 USD/MWh로 비슷하게 나타났다. 국산발전단지와 외산발전단지의 고정비용인 LFC는 각각 104.54 USD/MWh와 100.29 USD/MWh로 국산이 외산보다 높았으나, 변동비용인 LVC는 각각 46.19 USD/MWh와 46.40 USD/MWh로 외산이 국산보다 약간 높았다. LCOE는 LFC와 LVC로부터 산출되므로 이러한 결과는 소스 데이터인 CapEx와 OpEx의 평균값과 표준편차가 복합적으로 작용한 것이다. 한국 육상풍력발전단지의 LCOE를 세계와 비교하기 위하여 25년 운영수명에 대한 한국의 LCOE 평균값을 재계산한 결과, 한국 육상풍력발전, 국산발전단지와 외산발전단지의 LCOE 평균값은 각각 137 USD/MWh, 139 USD/MWh와 136 USD/MWh로 나타났다. 한국의 LCOE는 일본보다 4 USD/MWh 낮았으나 독일과 세계의 평균값보다는 상당히 높았다.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2021R1A2C2009315).

참고문헌

- [1] Statistics Korea, Korean Statistical Information Service, Available online: <https://kosis.kr/>.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, Renewable energy 3020 implementation plan.
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, Status and Progress of Offshore Wind Energy Policy,

- International Forum of Floating Offshore Wind Farm 2021, Ulsan, Korea, 10/6~10/7, 2021.
- [4] Korea power exchange, 2022, 4th Quarter Power Plant Construction Status.
- [5] Stehly, T. and Duffy, P., 2021, “2020 Cost of Wind Energy Review”, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [6] IRENA, 2022, “Renewable Power Generation Costs in 2021”, International Renewable Energy Agency.
- [7] Lee. J. Y., Choi. S. Y., Ha. K. T., and Jeong, J. H., 2022, “Preliminary Economic Analysis of 20 MW Super-Capacity Wind Turbine Generator in the East Sea of Korea”, Journal of Wind Energy, Vol. 13, No. 4, pp. 50-57.
- [8] Lee. D. H. and Lim. H. C., 2023, “Evaluation Study of LCOE for 8 MW Offshore Floating Wind Turbine in Ulsan Region”, Journal of Wind Energy, Vol. 14, No. 1, pp. 5-13.
- [9] Kim. M. J., Song. Y., and Paek. I. S., 2020, “Development of an In-house Code to Predict Annual Energy Production and Economic Analysis of Wind Farms Using CFD Results”, Journal of Wind Energy, Vol. 11, No. 3, pp. 23-30.
- [10] Korea Energy Economics Institute, 2018, Study on Estimation of Levelized Cost of Energy by power sources, Korea Power Exchange [KPX], Korea.
- [11] Lee, K. W. and Ko, K. N., 2018, “Analysis of LCOE for Korean Onshore Wind Farms using Monte Carlo Simulation”, The 2018 Fall Conference of Korea Wind Energy Association, Busan, Korea, pp. 27-30.
- [12] Lee, K. W. and Ko, K. N., 2020, “Analysis of LCOE for Korean Onshore Wind Farm Considering Social Discount Rate”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 40, No. 1, pp. 1-13.
- [13] Korea Energy Economics Institute, 2022, Establishment and Operation of Mid- to Long-term Levelized Cost of Energy (LCOE) Forecast System to Expand Renewable Energy Supply (3/5).
- [14] Financial Supervisory Service, Data Analysis, Retrieval and Transfer system, Available online: <http://dart.fss.or.kr/>.
- [15] Heck, N., Smith, C., and Hittinger, E., 2016, “A Monte Carlo approach to integrating uncertainty into the levelized cost of electricity”, The Electricity Journal, Vol. 29, No. 3, pp. 21-30.