

확률론적 방법론을 이용한 제주 육상풍력 사업의 경제적 타당성 분석*

김용원* · 오시덕** · 문용범*** · 양성준**** · 이철용*****†

*부산대학교 대학원 박사 과정, **㈜블루이코노미전략연구원 대표, ***지방공기업평가원 연구위원

****제주에너지공사 그린뉴딜사업차장, *****부산대학교 경영학과 부교수

Economic feasibility analysis of a Jeju onshore wind power project using a stochastic methodology

Kim, Yong Won* · Oh, Si Doek** · Moon, Yong Beom*** · Yang, Sung Jun**** and Lee, Chul-Yong*****†

*Ph.D candidate, School of Business, Pusan National University

**CEO, Blue Economy Strategy Institute Co., Ltd.

***Research Fellow, Evaluation Institute of Regional Public Corporation

****General Manager, Green New deal Business Department Clean Energy Development Team, New Jeju Energy Corporation

*****Associate Professor, School of Business, Pusan National University

ABSTRACT

Jeju Island introduced the CFI 2030 (Carbon Free Island 2030) policy in 2013, actively promoting the expansion of renewable energy such as solar and wind power. The primary objective is to achieve energy independence by establishing a clean energy system. This study analyzes the economic feasibility of the Jeju onshore wind farm expansion project, which is being promoted as part of CFI 2030 policy, from a national economic perspective. Utilizing the deterministic analysis method, we calculated B/C, NPV, and IRR values to assess the economic feasibility of the project. Simultaneously, we examined the sensitivity of key factors influencing economic feasibility, including discount rates, benefits, and costs. Recognizing the inherent uncertainties associated with renewable energy projects, we performed a stochastic analysis through the application of Monte Carlo simulation, obtaining essential information for informed project implementation decisions. Deterministic analysis confirmed that the proposed project was economically feasible. Sensitivity analysis indicates that economic feasibility can be maintained unless costs increase by more than 10.55% or SMP values decrease by more than 9.15%. Stochastic analysis results using Monte Carlo simulation revealed slightly lower values compared to deterministic analysis; however, the ranges and trends were similar. The methodology and results of this study can be used for policy decisions and to conduct further research on implementation of the project.

Key words: Carbon Neutral, Economic Feasibility, Onshore Wind Power, Stochastic Methodology, Monte Carlo Simulation

†Corresponding author : cylee7@pusan.ac.kr (2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea. Tel. +82-51-510-2568) ORCID 김용원 0000-0001-5370-1044 양성준 0009-0004-1605-2072
오시덕 0009-0009-3486-3764 이철용 0000-0003-0870-0039
문용범 0009-0000-0813-508X

Received: December 12, 2023 / Revised: January 26, 2024 / Accepted: March 25, 2024

* 본 논문은 지방공기업평가원(2022), “제주 A 풍력발전단지 확장 조성사업 타당성검토” 중 일부를 발전시킨 연구입니다.

1. 서론

제주도는 2013년에 CFI 2030 (Carbon Free Island 2030) 정책을 발표하며 오염물질 배출없는 청정에너지 시스템 구축을 통한 에너지 자립화를 목표로 태양광, 풍력 발전 등 신재생에너지 보급 확대 사업을 적극 추진해왔다. 특히, 2030년까지의 신재생에너지 목표량 4,085 MW 중 57%에 해당하는 2,345 MW를 풍력발전을 통해 공급하여 온실가스 배출량을 4,203천ton에서 2,779천ton으로 33.9% 감축하는 계획에 따라 풍력발전단지 조성사업을 활발하게 추진 중이다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021).

대규모 재원이 투입되는 풍력발전 등 신재생에너지 사업은 다양한 불확실성 요인을 가지고 있어 경제성 분석을 수행하여 사업의 타당성을 미리 가늠해 볼 필요가 있다. 이에, 본 연구에서는 제주도에서 추진 예정인 13.2~16.8 MW 규모의 A지역(구좌읍 동북리 산56번지 일원) 풍력발전단지 확장조성사업에 대한 경제성을 살펴보고, 사업에 도입될 최적의 풍력발전기 선정 근거를 마련하여 정책적 의사결정을 지원하고자 한다.

이를 위해 해당 사업에 대한 국민경제적 관점에서의 사회적 편익 및 비용 분석을 통하여 경제적 타당성을 평가한다. 사업을 수행함으로써 발생할 것으로 예상되는 비용과 편익 항목을 도출하고, 사업에서 도입을 검토 중인 풍력발전기에 대하여 총사업비(CAPEX), 운영비용(O&M), 이용률(Capacity Factor) 등을 바탕으로 해당 기종에 대한 경제성 분석을 수행한다. 「공기업·준정부기관 사업 예비타당성조사 운용지침, Lee et al. (2018)」의 경제성 부문에 비추어 보편적으로 사용되는 평가 방법인 편익비용비율(B/C Ratio)과 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR)을 결정론적 방법론으로 산정하고, 경제성에 영향을 미치는 요소들에 대한 민감도를 함께 분석한다. 아울러, 사업 경제성에 영향을 미치는 입력변수들의 불확실성을 고려하고자 확률론적 방법론을 통해 B/C, NPV 값을 추가 산출하여 결정론적 방법론 결과값과 비교하고, B/C 값에 대한 기여도 및 변수별 영향도 분석을 통해 시사점을 도출하고자 한다.

본 연구와 유사연구로, 제주지역 풍력발전사업 경제성 분석과 관련하여 Moon et al. (2011)에서는 당시 건설을 추진하고 있던 제주도 S, I 풍력단지의 분석 예비 자료를 바탕으로 재무적 관점에서 풍력사업의 경제성을 분석하였다. 풍력발전 사업 경제성에 영향을 미치는 요소를 고

려하여 Lee et al. (2012)에서는 WindPRO와 제주 연안 실측 풍황 데이터를 이용하여 발전량을 산출하였고, Kim et al. (2013)에서는 계통한계가격(SMP) 변화에 따른 경제성 분석 연구를 수행하였다.

풍력발전 사업은 내륙지역 육상이나 해상에서도 추진되는데, Ha and Kim (2005)에서는 대관령 풍력발전 단지의 풍속 분포 및 발전량을 바탕으로 대관령 풍력발전 사업의 경제성을 분석하였고, Lee and Ahn (2020)에서는 국내 육상풍력 발전단지 대상으로 LCOE를 추정하는 연구를 수행하였다. Moon and Kim (2021)에서는 400 MW와 480 MW 급 부유식 해상풍력 발전단지를 대상으로 경제적 타당성 여부를 추정하였으며, Kim et al. (2005)에서는 태양광, 풍력 및 소수력 발전에 대한 할인율, 설비 단가, 이용률, 정부지원비용 등을 시나리오별로 제시하고 각 발전단가를 생산원가 방식으로 산정하여 경제성을 분석하였다.

대부분의 신재생에너지 사업은 예측이 어려운 자연 자원을 에너지원으로 활용하기 때문에 다양한 불확실성 요인을 갖는다. 변동성이 큰 요인들의 불확실성을 반영하기 위해 확률론적(Stochastic) 관점의 경제성 분석도 수행되는데, Kim and Kim (2019)에서는 해수온도차에너지 활용 사업의 경제성을 분석하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 확률론적 순현재가치(NPV)와 내부수익률(IRR)을 추정하였다. 마찬가지로 Moon et al. (2018)에서는 셰일가스 개발사업 추진에 대한 판단 근거자료를 마련하고자 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 경제성 평가를 수행하였으며, Lee (2021)에서는 정부의 수소 로드맵에 따라 수소 가스터빈 발전이 2035년에 상용화되는 상황을 가정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 경제적 타당성을 분석하였다.

본 연구는 기존연구 대비 다음과 같은 두 가지 기여점을 가지고 있다. 첫째, 육상풍력 사업 경제성 결과에 영향을 미치는 변수들의 불확실성을 반영하기 위해 확률론적 접근을 이용하며, 육상풍력 사업에 이를 적용하는 것은 국내에서 최초로 시도된다. 둘째, 경제성 분석 입력변수들의 상대적 중요도를 파악하기 위해 기여도 분석을 함으로써 추가적인 시사점을 도출하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 분석 방법론을 소개하고, 3장에서는 경제성 평가를 위한 주요 전제조건과 분석자료를 나타낸다. 4장에서는 추정된 분석 결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론과 함께 시사점을 도출한다.

2. 경제적 타당성 분석 방법론

제주 A 풍력발전단지 확장조성사업은 제주도에 정적으로 추진하는 공공사업으로서 국민경제적 관점에서의 경제적 타당성을 평가하기 위해 공공기관 사업 예비타당성조사 일반지침(Lee et al., 2018)에 따라 편익비용비율(B/C)과 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR) 분석기법을 적용한다. 각 분석기법별 개념은 다음과 같다.

편익비용비율(B/C)은 분석기간 동안 미래에 발생될 총 편익과 총비용을 현재가치로 각각 할인하여 식 (1)과 같이 나누어 비율로 계산하는 것이다. 편익비용비율(B/C) 값이 1.0 이상이면 편익이 비용보다 크다고 볼 수 있으므로 분석대상 사업은 경제성이 있다고 판단한다. (1)식에서 B_t 는 t년도 편익, C_t 는 t년도 비용, r 은 사회적 할인율, n 은 분석기간을 의미한다(Gu, 2008).

$$B/C\ ratio = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

순현재가치(NPV)는 분석기간 동안 미래에 발생되는 총 편익과 총비용을 현재가치로 각각 할인하여 식 (2)와 같이 뺀 것으로 순수한 편익의 값을 의미한다. 순현재가치(NPV)가 양수(0 이상)이면 편익이 비용보다 크다고 할 수 있으므로 분석대상 사업은 경제성 타당성이 확보되는 것으로 평가한다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

내부수익률(IRR)은 분석기간에 대한 편익비용비율(B/C)이 1이 되거나 순현재가치(NPV) 값이 0이 될 때의 할인율이다. 편익이 발생될 수 있는 최소수익률이라 할 수 있으며, 공공사업의 경우 내부수익률(IRR)이 사회적 할인율보다 크다면 경제성 타당성이 확보되는 것으로 평가한다. 식 (3)에서 R이 내부수익률을 의미한다.

$$IRR: \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+R)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+R)^t} \quad (3)$$

일반적으로 B/C, NPV, IRR은 대부분 비슷한 결론을 나타내지만, 사업의 규모나 수익구조 등 분석기법에 따라 상이한 결과를 나타낼 수 있는 요인이 있다. 따라서, 정확

한 경제성 평가를 위해서는 세 가지 분석기법의 장단점을 고려하여 종합적으로 검토하는 것이 적절하다.

한편, 결정론적 방법론은 편익, 비용 및 할인율 등 분석 모형에 사용되는 입력변수들의 값을 확정적(Deterministic)으로 가정하므로 미래의 다양한 불확실성을 고려하기에는 어려움이 있다. 민감도 분석을 수행하여 보완할 수 있으나, 일부 변수에 부분적인 변화만을 고려하는 시나리오의 경직성에 따라 다양한 불확실성을 충분히 반영한다고 보기에는 어려움이 있다. 이에, 확정적 가정을 통해 결론을 하나로 제시하는 결정론적 방법론 대신 분석 결과를 신뢰 구간으로 보여주는 확률론적(Stochastic) 방법론 모형을 이용할 수 있다.

확률론적 시뮬레이션 기법 중 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션은 불확실성을 갖는 변수들을 하나 혹은 여러 개의 특정 확률분포로 설정하여 각 분포에서 무작위 표본을 추출하는 방법이다(Kim et al., 2022; Koo and Kim, 2004). 수많은 반복 시행을 통해 결과값의 확률 분포를 추정하는 계산 알고리즘으로, 입력변수가 확률 변수라고 가정하여 적절한 확률분포를 선택하고 해당 분포를 따르는 난수를 발생시켜 결과를 추정한다(Alla et al., 2020; Månberger and Stenqvist, 2020). 몬테카를로 시뮬레이션에서 확률 변수 X 는 확률 밀도 함수 $f(x)$ 를 따르며 추정하고자 하는 임의의 모형 $g(x)$ 를 가정한다. 이때 $g(x)$ 의 기댓값은 다음과 같다(Lee, 2021).

$$E(g(X)) = \int_{x \in X} g(x)f(x)dx \quad (4)$$

$g(x)$ 의 기댓값 추정을 위해 확률함수 X 의 분포에서 n 개를 샘플링(x_1, \dots, x_n)하여 다음과 같이 $g(x)$ 의 평균을 계산한다.

$$\bar{g}_n(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (5)$$

$E(g(X))$ 는 몬테카를로 추정량으로, 대수의 법칙에 기반하여 추정한다. 대수의 법칙을 아래의 공식으로 표현하면 샘플 개수(n)가 무한대일 때 샘플링에 따른 $g(x)$ 의 평균은 $g(x)$ 의 기대치에 근사한다고 해석할 수 있다(Spooner, 1974).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\bar{g}_n(X) - E(g(X))| \geq \epsilon) = 0 \quad (6)$$

결과적으로 다음의 식을 만족하고, $E(g(X))$ 의 불편추정량 도출이 가능하다.

$$E(\bar{g}_n(X)) = E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i)\right) = \frac{1}{n} E\left(\sum_{i=1}^n g(x_i)\right) = E(g(X)) \quad (7)$$

식 (7)에서 $g(x)$ 가 복잡한 함수로 주어지면 적분계산과 해를 찾는 것이 문제가 되지만 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하면 복잡한 계산 프로세스를 수행하지 않고도 함수의 기댓값을 추정할 수 있다(Winston, 1996).

몬테카를로 시뮬레이션을 통해 추출된 샘플값과 크기는 결과에 절대적인 영향을 미치지므로 주어진 확률 분포를 따르는 난수를 생성하는데 사용되는 방법이 매우 중요하다(Barreto and Howland, 2006). 몬테카를로 시뮬레이션 분석 절차는 Fig.1과 같다. 연구자는 사용가능한 데이터, 전문가의 판단 또는 데이터와 판단의 조합에 따라 적절한 분포를 선택할 수 있는데 판단 요인은 이산적(discrete)이거나 연속적(continuous)이며, 경계여부, 모드 수, 대칭 또는 치우침 등이 있다(Lee and Ahn, 2020). 추출된 표본의 크기는 추정된 표준 편차, 원하는 오차 한계 및 유의 수준에 대한 정규 분포의 임계값에 따라 달라진다(Winston, 1996).

본 연구에서 사업의 경제성을 결정하는 주요 변수는 이용률, CAPEX, 할인율, O&M, SMP, 온실가스 및 대기오염물질 배출 저감 편익 등이다. 이들 변수는 많은 미래의 불확실한 요소를 내포하고 있다. 때문에, 결정론적 기법을 사업 경제성 분석에 적용하면 미래의 다양한 불확실 요인이 단순화되어 각 변수의 특성을 분석하기 어려워진다. 이러한 한계점을 고려하여 특정 입력변수 값에 변화를 주는 형태의 민감도 분석을 수행할 수 있지만, 입력변수가 다수이고 각 변수의 특성이 다양하며 범위가 큰 경우 분석에 상당한 시간이 소요될 뿐 아니라 결과 제시도 복잡해진다. 따라서 입력변수를 특성에 따라 확률분포로 정의함으로써 미래 불확실성이 고려된 결과를 도출하는 확률론적 시뮬레이션 방법이 더 효과적이라고 할 수 있다.

3. 전제조건 및 분석자료

2022년부터 추진된 제주 A 풍력발전단지 확장조성사업은 2024년 착공하여 2025년에 완공하고, 2026년부터 2045년까지 20년간 운영 계획에 따라 총 22년을 경제성 분석 기간으로 설정하였다. 사업추진 시기에 따라 경제성 분석의 기준연도를 2021년 말로 설정하고, 2022년 이후 가격지표에는 물가상승률이 반영되지 않은 2021년 기준 불변가격지표를 적용함으로써 연도별 비용과 편익의 불변가격 가치로 추정하였다. 현재가치로 환산하기 위한 사회적 할인율은 「KDI, 공기업·준정부기관 사업 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(제2판), p192」에 따라 4.5%를 적용하였다.

수량적 지표를 통하여 비용과 편익에 미치는 실질적인 변화만을 추정하고자 분석 기준연도 이후 가격지표에는 물가상승률이 반영되지 않은 불변가격 지표를 적용하여 연도별 비용과 편익의 불변가격 가치를 추정하였다. 비용과 편익은 발생 시점에 따라서 시간가치가 다르므로 비용과 편익을 발생 시점과 관계없이 동일한 가치 척도로 비교하고자 불변가격 가치로 계산한 비용과 편익을 기준연도의 현재가치로 환산하여 합산 비교하였다.

육상풍력 발전사업의 편익비용 분석에서 편익 항목은 일반적으로 해당 사업을 통해 발생하는 외부적 효과를 포함하는 사회적 편익까지 고려하여 분석한다. 비용은 크게 공사 및 철거, 설계 및 감리, 토지보상, 시설운영 유지관리 등에 대해 부담하는 금액이며, 편익은 전력공급에 따라 발생하는 수효 편익과 신재생에너지 발전량이 계통에 추가됨으로써 기존 전통발전기의 회피에 따른 온실가스 배출 및 대기오염비용 저감 대체 편익으로 산정될 수 있다. 본 사업에 의해 유발되는 혜택과 부담 요소들 중 측정상의 어려움이 있거나 이전적(transfer) 성격의 항목들은 제외하였으며, 사업기간 동안 발생하는 교통혼잡 유발, 환경 부담 가중 등의 비용과 안전 강화, 지역경제 활성화 등의 편익도 마찬가지로 추정하지 않았다. 국민경제 측면에서의 경제성 분석과 사업자 측면에서의 재무성 분석은 비용과 편익 항목이



Fig. 1. Flow diagram of analysis

구별될 수 있으므로 일부를 조정하여 추정하였다. 신재생 에너지 공급의무화 제도(RPS) 하에서 사업자는 발전비용이 발생하는 대신 REC 판매 수익이 생기고, 공급의무자의 경우 발전비용을 줄이는 대신 신재생에너지 공급인증서(REC) 발급 비용이 발생하므로 사업자 입장에서는 수익이지만 사회 전체적인 관점에서는 실질적인 수입이 발생하지 않으므로 경제적 수입에서 제외하였다. 아울러, 각종 세금 및 이전지출 성격의 부담금은 사업자 입장에서는 비용이나 국민경제 측면에서는 이전지출이므로 실질적인 부담이 발생하지 않는 것으로 보아 경제적 비용에서 제외하였다. 다만, 이전지출성 부담금이 아닌 경우에 대해서는 경제적 비용에 포함하였다. 사업의 경제적 비용은 총사업비, 운영비, 철거복구비 및 토지보상비로 구성된다.

Table 1. Cost factors of the project

	Detailed components
Total Costs (①+②+③+④)	① CAPEX
	② O&M
	③ Demolition and restoration costs
	④ land compensation costs

경제적 비용은 도입 대상 풍력발전기에 대한 불변가격 기준과 현재가치 기준으로 추정하였으며, 풍력발전기 제작사에서 제공한 자료를 활용하였다. 구체적인 비용자료는 기업 기밀에 해당하여 본 논문에서 공개하기 어려우나 세부 항목은 다음과 같다. 600여억원 규모의 총사업비는 공사비, 시설부대비비용, 보상비, 예비비로 구성되는데, 공사비는 풍력발전기 기차재비 및 구조물 공사 등으로 발생하는 비용이며, 시설부대비비용은 설계, 감리, 인허가 및 보험료로 구성된다. 운영비는 풍력발전기를 20년 동안 운영함으로써 해마다 발생하는 설비 유지보수 비용의 합이며, 철거복구비는 사용 완료된 발전기를 해체하고 원상 복구하는 비용으로 운영이 2045년에 종료되는 것으로 가정하므로 복구비는 2045년 한 해에만 발생하는 것으로 반영하였다. 토지보상비는 모두 동일하게 발생하며 마지막 해에 회수된다.

풍력사업이 신규 전력수요를 창출하는 것으로 가정하기 위해서는 사업 미시행시 전기 공급중단으로 일부 세대에서 정전 등의 현상이 발생해야 하는데, 사업의 규모나 전력수급기본계획에 기초하여 판단할 때 신규 전력수요

가 창출된다고 보기는 어려움이 있다. 따라서, 기존 천연가스 발전소를 통한 공급 전력을 풍력사업이 대체하는 회피편익으로 산정하였다(「KDI, 공기업·준정부기관 사업예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보안 연구(제2판), p111」 일부 인용).

신재생 발전 설비를 보유한 사업자는 RPS에 따라 신재생 발전설비를 통해 공급한 전력량에 대하여 REC를 발급받아 판매할 수 있으므로 REC 판매를 수입으로 인식할 수 있다. 하지만, REC 판매 사업자와 RPS 공급 의무자 중 신재생에너지를 누가 공급하는지는 사회의 총 후생에는 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있으므로 REC 판매 수익을 사회적 편익으로써 고려하지 않았다.

신재생에너지 발전사업을 통해 전력 생산량이 계통에 추가됨에 따라 LNG복합 발전기의 발전량이 감소하게 된다. 이에 따라 온실가스 배출저감 효과에 대한 편익을 산정할 수 있다. 대기오염 저감 편익은 천연가스를 사용하여 전력을 생산할 때 발생하는 SOx(황산화물)를 비롯한 NOx(질소산화물), PM2.5(미세먼지) 등의 대기오염물질이 신재생에너지 발전사업을 통한 천연가스 발전 중단에 따라 발생되지 않으므로 이에 따른 사회적 편익으로 고려할 수 있다. CO₂(이산화탄소)는 온실가스로서 온실가스 감축 편익을 추정하였으며, 비 CO₂ 대기오염물질인 SOx(황산화물), NOx(질소산화물), PM2.5(미세먼지)의 저감 편익을 추정하였다.

이를 바탕으로 풍력사업을 통한 예상 편익을 아래 표와 같이 전력공급 편익과 온실가스 감축 및 대기오염 저감에 따른 환경개선 편익으로 구분하였다.

Table 2. Benefit factors of the project

Category	Estimation
Electricity Supply Benefit	Annual SMP (KRW/kWh) × Annual power generation (MWh) ¹⁾
Environmental improvement benefit	GHG reduction Annual power generation (MWh) × LNG CCGT Greenhouse gas Environmental cost (KRW/kWh) ²⁾
	Air pollutant reduction Annual power generation (MWh) × LNG CCGT Air pollutant Environmental cost (KRW/kWh) ³⁾

note : 1) Sending end basis

2) Greenhouse Gas (CO₂)

3) SOx (oxides of sulphur), NOx (oxides of nitrogen), PM2.5 (particulate matter)

전력공급 편익은 풍력발전단지에서 생산한 전력을 전력시장을 통해 거래된 금액으로 평가되며, 이러한 편익은 연도별 SMP(계통한계가격)에 연간 발전량(MWh)을 이용하여 추정한다. 연도별 SMP의 경우 「KDI, 공기업·준정부 기관 사업 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보안 연구(제2판), p127」에 따라 최근 과거 3개년 제주 SMP 평균값인 127.39를 사용하였다.

Table 3. Jeju SMP over the past 3 years

Average	Jeju SMP		
	2019	2020	2021
127.39	152.78	101.54	127.85

source : EPSIS (Electric Power Statistics Information System), <https://epsis.kpx.or.kr>

연간 발전량(MWh)은 발전기가 대상기간 동안 최대 출력으로 연속 운전하는 경우 생산가능한 전력량, 설비의 추정 이용률(생산가능 전력량에 대한 실제 전력 생산량 비율, 효율, 출력제한 고려), 소내 소비율 및 발전가능 시간 등을 고려하여 추정하였다.

전력공급 연간 편익은 풍력발전소의 전력생산에 따른 기존 전통발전 회피비용으로 추정하였다. 전력공급 연간 편익은 연도별 SMP(원/kWh)와 연간 발전량(MWh)의 곱으로 산정되는데, 연간 발전량(MWh)은 풍력발전기 제작사에서 제공한 연간 발전량 및 이용률 추정 자료에서 초과확률 P75에 해당하는 값을 이용하였다.

신재생에너지 발전소 설립으로 기존의 첨두부하 발전이 대체됨에 따라 화석연료 사용량이 감소하여 온실가스 및 대기오염물질 배출이 저감되므로 이에 따른 환경개선 편익을 산정할 수 있다. 제주의 경우 2019년까지 유류발전이 첨두부하로 활용되었으나 2020년부터 LNG 복합발전이 기존 유류발전의 대부분을 대체하였으므로 육상풍력 발전이 LNG 복합 발전을 회피한다고 가정하였다.

Table 4. Generation by fuel type in Jeju

Category	Petroleum	LNG	Renewable	Total
2019	1,705	35	1,984	3,725
2020	181	1,389	2,259	3,829
2021	295	1,505	2,274	4,074

source : EPSIS (Electric Power Statistics Information System), <https://epsis.kpx.or.kr>

온실가스 감축 편익은 CO₂(이산화탄소)를 이용하였으며 대기오염물질 저감 편익은 SO_x(황산화물), NO_x(질소산화물), PM_{2.5}(미세먼지)를 대상으로 각각 산출하였다. 온실가스 감축 및 대기오염 저감 편익은 연간 발전량(MWh)에 각 물질에 해당하는 발전원별 환경비용(원/kWh)을 곱하여 아래와 같이 추정하였다.

Table 5. Environmental cost (2016)

Power generation source	SO _x	NO _x	PM _{2.5}	CO ₂	Total environmental cost
LNG CCGT	0.32	4.77	0.33	15.72	21.13

source : KIPF (2018, p. 58)

다만, 상기 환경비용은 2016년 기준으로 산정된 값이므로 Lee (2017)에서 환산한 바와 같이 소비자물가지수(CPI)를 이용하여 식 (8)처럼 경제성 분석 기준연도인 2021년 값으로 환산하였다.

$$\text{환경비용('21년)} = \text{환경비용('16년)} \times \frac{\text{CPI('21년)}}{\text{CPI('16년)}} \quad (8)$$

Table 6. Environmental cost conversion value with CPI

Year	2016	2017	2018	2019	2020	2021
CPI	95.783	97.645	99.086	99.466	100	102.5
Greenhouse gas Environmental cost	15.72	16.03	16.26	16.32	16.41	16.82
Air pollutant Environmental cost	5.42	5.53	5.61	5.63	5.66	5.80

source : ECOS (Economic Statistics System), <https://ecos.bok.or.kr>

환산 값을 이용하여 온실가스 및 대기오염 저감 효과의 총 편익을 산출할 수 있으며, 이와 같이 도출된 항목별 편익을 종합하면 도입 대상 풍력발전기에 대한 총 편익을 추정할 수 있다.

4. 분석결과

추정된 경제적 비용과 편익을 바탕으로 제주 A 풍력단지 확장조성 사업의 도입 대상 풍력발전기에 대한 경제적 타당성을 결정론적 방법론으로 분석한 결과, NPV는 양, B/C는 1 이상, IRR은 사회적 할인율 4.5% 이상인 5.4%를 나타내어 경제적 타당성이 확보되는 것으로 나타났다.

Table 7. The result of economic feasibility analysis (NPV unit : 100 million KRW)

	NPV	B/C	IRR
Result	4,571	1.08	5.4%

비용이나 SMP 값이 변화하는 조건을 고려하여 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 수행하였으며, 이를 통해 비용이 10.55% 이상 증가하거나 SMP 값이 9.15% 이상 하락하지 않는 조건에서는 경제적 타당성이 확보되는 것으로 분석되었다. 사회적 할인율은 Choi and Park (2015)에서 2001년 최대 7.5%를 보인 바 있고, 저금리 상황에서는 3.5%까지 낮아지는 등 사회적 상황에 따라 변화할 수 있으므로 확률론적 시뮬레이션을 통해 민감도 분석을 수행하여 보다 정교한 결과를 도출하고자 하였다.

Table 8. Ensuring economic feasibility conditions

Condition	NPV = 0	
	Rate of cost change	Rate of SMP change
	More than 10.55% ↑	More than 9.15% ↓

결정론적 방법론은 분석모형에 사용되는 편익, 비용, 할인율 등 입력변수들이 각각 특정 값들로 확정되어 분석됨에 따라 모형의 결과도 변동성 없이 하나의 숫자로 확정적으로 나타난다. 이러한 단점을 보완하기 위해 민감도 분석을 수행하고 있으나, 입력변수에 대한 불확실성을 반영하는데 한계가 있어 확률론적 분석 방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행을 위해 입력변수의 특성에 따른 확률분포를 정의해야 하는데, 확보가 가능한 자료 수가 충분한 경우 정규분포 또는 로그정규분포를 사용하고, 충분하지 못한 경우는 균등분포나 삼각분포를 주로 사용한다(Moon et al., 2018).

시뮬레이션의 입력변수는 결정론적 방법론 분석 모형

의 편익과 비용 항목과 동일하게 설정하였다. 이용률, CAPEX, O&M, SMP, 온실가스 감축 및 대기오염물질 배출 저감 편익의 경우 결정론적 방법론을 통해 추정된 값을 기준값으로 정규분포를 적용하였다. 분산은 평균에 대한 불확실성을 의미하는데, Lee and Ahn (2020)에서 가정한 바와 같이 실적치가 없는 경우 평균의 10%로 가정하였다. 사회적 할인율은 현재 예비타당성조사에 적용되는 4.5%를 최빈값으로 두고, 지금까지 변화되어 온 할인율 범위를 고려하여 3.5%를 최소값, 7.5%를 최대값으로 하는 삼각함수 분포를 적용하였다. 분석을 위해 정의한 입력변수와 변수에 대한 확률분포는 다음과 같다.

Table 9. Input variables and probability distributions

Input variable	Probability distribution	Value
Capacity Factor (%)	Normal Distribution	Each model's mean, Variance = 10% of the mean
CAPEX (100 million KRW)		
Discount Rate (%)	Triangular Distribution	Min.=3.5, Max.=7.5 Most likely=4.5
O&M	Normal Distribution	Each model's mean, Variance = 10% of the mean
SMP		
Greenhouse gas reduction benefit		
Air pollutant reduction benefit		

시뮬레이션은 Crystal Ball (ver. 11) 소프트웨어를 이용하였고, 충분한 신뢰구간 확보를 위해 10,000회 시뮬레이션을 수행하였으며 신뢰구간 95%의 값을 해석하였다.

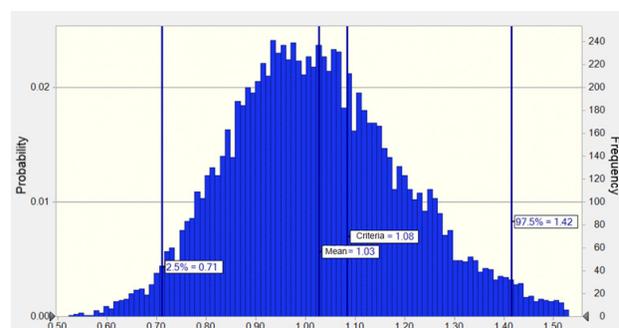


Fig. 2. B/C probability distribution

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 확률론적 분석 결과, 결정론적 분석 결과에 비해 다소 낮은 값을 보였으나 범위 및 추세는 거의 유사한 것으로 확인되었다.

Table 10. B/C statistics

Statistic	Value	Statistic	Value
Criteria	1.0842	Kurtosis	3.2531
Mean	1.0265	CV	0.1755
Median	1.0143	Min.	0.4844
Std. Deviation	0.1802	Max.	1.8328
Variance	0.0325	Range	1.3484
Skewness	0.4202	Standard Error	0.0018

입력변수의 영향력을 나타내는 기여도 분석 결과, 이윤률, SMP, CAPEX, 할인율, O&M, 온실가스 감축 및 대기 오염물질 배출 저감 편익 순으로 기여도가 높은 것을 확인할 수 있었으며, 예측값에 대한 각 입력변수의 효과를 개별적으로 알아보기와 토네이도 차트를 이용하여 확인한 결과, 분산 기여도와 마찬가지로 모델별 세부 비율은 다소 차이가 있으나 유사한 패턴을 보이는 것으로 분석되었다.

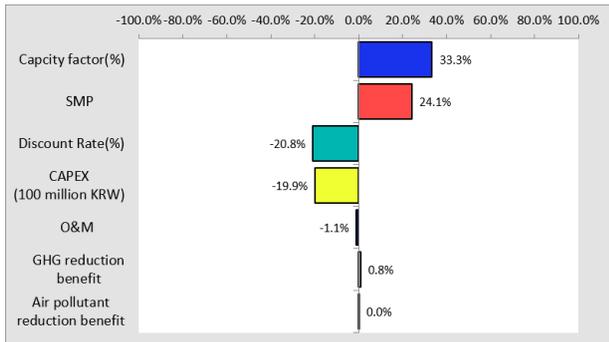


Fig. 3. B/C variance contribution

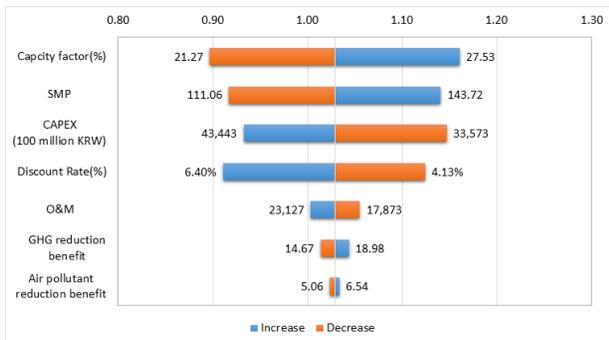


Fig. 4. B/C sensitivity analysis

5. 결론 및 시사점

본 연구는 제주도 CFI 2030 정책의 일환으로 추진 중인 제주 A 풍력발전단지 확장조성 사업에 대하여 국민경제적 관점에서의 경제적 타당성을 분석하였다. 결정론적 분석 방법을 통해 B/C, NPV, IRR 값을 도출하여 사업의 경제적 타당성 여부를 확인함과 동시에 할인율, 편익, 비용 등 경제성에 영향을 미치는 요소들에 대한 민감도를 함께 분석하였다. 아울러, 신재생에너지 사업이 갖는 불확실성을 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 확률론적 분석을 수행하여 사업추진 의사결정을 위한 필요 정보를 도출하였다.

결정론적 분석 결과, 도입 대상 풍력발전기는 경제적 타당성을 확보하는 것으로 확인되었고, 민감도 분석을 통해 비용이 10.55% 이상 증가하거나 SMP 값이 9.15% 이상 감소하는 경우가 아니라면 경제적 타당성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 분석 결과, 결정론적 분석 결과에 비해 다소 낮은 값을 보였으나 범위 및 추세는 거의 유사한 결과를 나타내는 것으로 확인되었다. 평균적인 상황에서의 B/C는 1.0265로 나타났으며, 조건 변화에 따라 0.71 ~ 1.42의 값을 보이는 것으로 분석되었다. 예측값에 대해 입력변수들이 미치는 영향력을 알아보기와 수행한 기여도 분석 결과, 모델별 세부 비율은 차이가 있으나 이윤률, SMP, CAPEX, 할인율, O&M, 온실가스 감축 및 대기오염물질 배출 저감 편익 순으로 기여도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 예측값에 대한 각 입력변수의 효과를 개별적으로 알아보기 위해 토네이도 차트를 통해 확인한 결과, 약간의 차이는 있으나 분산 기여도와 거의 유사한 패턴을 보이는 것으로 분석되었다.

본 연구는 제주 A 풍력발전단지 확장조성 사업에 도입이 검토되고 있는 풍력발전기 도입에 대해 사업 실정에 더욱 부합하는 분석 결과를 도출하고자 제작사가 제공한 데이터를 활용하여 경제적 타당성을 분석함으로써 정책적 의사결정에 필요한 정보를 제공하는데 의의가 있다. 신재생에너지 사업이 갖는 다양한 불확실성을 고려하고자 확률론적 분석 기법인 몬테카를로 시뮬레이션으로 경제성 평가를 수행하여 결정론적 분석 결과와 함께 제시하였고, 기여도 및 민감도 분석을 통해 경제성에 영향을 미치는 주요 요소들을 파악한 점에서 본 연구의 결과가 정책적 의사결정을 하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 다음과 같은 한계점을 가진다. 먼저, 여러 불확실성을 고려하고자 확률론적 분석과 민감도 분석 등을 수행하였음에도 불구하고, 불안정한 에너지시장 상황에 따라 편익이 예측 범위를 벗어나는 수준으로 영향을 받을 수 있다. 또한, 전력공급 편익은 제주 SMP를 예비타당성 조사 지침에 근거하여 최근 3개년의 평균값으로 가정하였고, 환경개선 편익은 기존 연구자료를 물가상승률에 따라 환산하여 추정했다는 점에서 마찬가지로의 미래 불확실성이 내재되어 있다고 볼 수 있다. 아울러, 국민경제적 관점에서 수행된 경제성 분석으로, REC 판매수익이나 세금지출 등은 고려되지 않았다. 이에, 종합적인 의사결정을 위해 사업자 측면에서의 경제성 분석 결과가 함께 검토되어야 한다면 추가적인 분석을 수행할 필요가 있다.

사사

본 연구는 지방공기업평가원과 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

References

Alla SA, Bianco V, Tagliafico LA, Scarpa F. 2020. Life-cycle approach to the estimation of energy efficiency measures in the buildings sector. *Appl Energy* 264: 114745. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114745

Barreto H, Howland FM. 2006. *Introductory econometrics: Using Monte Carlo simulation with microsoft excel*. Cambridge: Cambridge University Press.

Choi JE, Park TK. 2015. Estimation of the social discount rate for the public investment projects (in Korean with English abstract). *J Soc Sci* 41(3): 145-167. doi: 10.15820/khjss.2015.41.3.007

Gu CM. 2008. Cost-benefit analysis using STATA. *Korean J STATA* 1(1): 39-51.

Ha JW, Kim SD. 2005. A study on the wind power generation and its economic feasibility at Daekwanryung (in Korean with English abstract). *J Energy Eng* 14(2): 123-132.

Jeju Special Self-Governing Province. 2021. Jeju CFI 2030 implementation plan and current issues. Jeju, Korea: Jeju Special Self-Governing Province.

Kim HJ, Jeong DH, Koh YE, Oh SD, Lee CY. 2022. An economic feasibility analysis of hydrogen refueling stations project considering uncertainty (in Korean with English abstract). *Innov Stud* 17(4): 47-67.

Kim HJ, Ko KN, Huh JC. 2013. Reassessment of economic feasibility for a wind farm on Jeju island considering variable Jeju SMP (in Korean with English abstract). *J Korean Sol Energy Soc* 33(5): 41-50.

Kim JY, Kim HJ. 2019. Probabilistic feasibility of ocean thermal energy use for air-conditioning and heating systems (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Miner Energy Resour Eng* 56(1): 62-72.

Kim ZO, Kim JW, Boo KJ. 2005. Analysis of economic feasibility of new & renewable energies -Photo voltaics, wind power and small hydro- (in Korean with English abstract). *New Renew Energy* 1(1): 79-86.

KIPF (Korea Institute of Public Finance). 2018. *A study on rational adjustment approaches for the tax rate on energy for power generation*. Sejong, Korea: KIPF.

Koo SM, Kim JH. 2004. An analysis of economic feasibility for agricultural investments considering uncertain factors: Using Monte Carlo simulation technique (in Korean with English abstract). *Korean J Agric Manag Policy* 31(1): 18-36.

Lee CY, Ahn JK. 2020. Stochastic modeling of the levelized cost of electricity for solar PV. *Energies* 13(11): 3017. <https://doi.org/10.3390/en13113017>

Lee CY. 2021. Economic feasibility analysis of hydrogen gas turbine power generation project (in Korean with English abstract). *Innov Stud* 16(1): 35-59

Lee DG. 2017. *A study on the rational adjustment approaches for the relative prices of transportation energy*. Sejong, Korea: KIPF.

Lee JK, Jung DH, Cho MH, Kim YK. 2018. *A study on the revision and enhancement of general guidelines for preliminary feasibility studies in public enterprises and quasi-governmental organizations, 2nd edn*. Sejong, Korea: Korea Development Institute.

Lee KH, Park JH, Jin JW, Kwon KR, Choi KH. 2012. *Economic analysis of Jeju offshore pilot run wind*

- farm by sensitivity analysis (in Korean with English abstract). *J Power Syst Eng* 16(5): p.13-19. doi: 10.9726/kspse.2012.16.5.013
- Månberger A, Stenqvist B. 2018. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. *Energy Policy* 119: 226-241. doi: 10.1016/j.enpol.2018.04.056
- Moon SJ, Yang SK, Lee DC, Shon PD. 2011. A study on economic analysis of wind power project: In case S and I wind farm under construction of Jeju special self-governing province (in Korean with English abstract). *J Ind Econ Bus* 24(6): 3695-3712.
- Moon WS, Kim MY. 2021. Economic analysis of large-scale floating offshore wind farm considering transmission line distance to shore (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Illum Electr Install Eng* 35(12): 55-62.
- Moon YJ, Moon SY, Gil SM, Shin HJ, Lim JS. 2018. Probabilistic analysis using economical evaluation for shale gas development (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Gas* 22(2): 21-28. doi: 10.7842/KIGAS.2018.22.2.21
- Spooner JE. 1974. Probabilistic estimating. *J Construct Div* 100(1): 65-77. doi: 10.1061/JCCEAZ.0000411
- Winston WL. 1996. *Simulation modeling using @RISK*. Belmont, CA: Wadsworth.