

The Economic Value Analysis of the Potential Wind Farm Site Using the Black-Scholes Model

Jaehun Sim[†]

Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

블랙 솔즈 모델을 이용한 잠재적 풍력발전 위치의 경제적 가치분석

심재훈[†]

창원대학교 산업시스템공학과

To mitigate the environmental impacts of the energy sector, the government of South Korea has made a continuous effort to facilitate the development and commercialization of renewable energy. As a result, the efficiency of renewable energy plants is not a consideration in the potential site selection process. To contribute to the overall sustainability of this increasingly important sector, this study utilizes the Black-Scholes model to evaluate the economic value of potential sites for off-site wind farms, while analyzing the environmental mitigation of these potential sites in terms of carbon emission reduction. In order to incorporate the importance of flexibility and uncertainty factors in the evaluation process, this study has developed a site evaluation model focused on system dynamics and real option approaches that compares the expected revenue and expected cost during the life cycle of off-site wind farm sites. Using sensitivity analysis, this study further investigates two uncertainty factors (namely, investment cost and wind energy production) on the economic value and carbon emission reduction of potential wind farm locations.

Keywords : Black-Scholes Model, Real Option, System Dynamics, and Wind Farm

1. 서론

화석 연료 기반의 에너지 발전으로 인한 기후 변화의 심각성이 국제적 문제로 대두되면서, 신재생에너지 발전을 통한 온실가스 감축의 중요성이 국가 에너지 정책의 중요한 고려 대상이 되어 가고 있다. 온실가스 감축을 위한 국제기구인 국제에너지기구에 의하면 일차 에너지로서 신재생에너지는 2011년의 13%에서 2035년에는 18%로 사용량이 증가할 것으로 예상된다[16]. 이러한 국제적 추세

에 대응하기 위하여, 대한민국 정부도 신재생에너지와 관련된 다양한 기술 개발과 상업화를 위한 R&D 투자와 다양한 신재생에너지 발전소 개발에 많은 투자를 지속해서 진행할 계획이다[23].

하지만 신재생에너지 발전소 개발에 투자할 수 있는 정부 예산과 시간적 제약 때문에 대한민국 정부는 선택과 집중이라는 전략을 통하여 효과적이며 효율적인 신재생에너지 생산이 가능한 신재생에너지 발전소의 개발을 추구하고 있다. 이러한 선택과 집중 전략의 성공을 위하여서는 계획단계에서 잠재적 발전소 위치의 경제적 가치분석이 이루어져야 한다. 또한 경제적 가치분석에서 고려되어야 할 다양한 불확실성을 반영하여 더욱 정확한 경제적 타당성 분석이 이루어져야 한다. 하지만 이러한 입지선정의 중

요성에도 불구하고 불확실성을 고려한 경제적 가치분석과 관련된 연구는 많이 진행되지 않고 있다.

신재생에너지 발전소 위치와 관련된 대다수의 연구에서는 일반적으로 현금흐름할인법을 사용하여 대상 발전소의 경제적 가치분석을 실행하고 있다. 비록 현금흐름할인법은 많은 장점을 가지고 있지만, 현금흐름할인법은 모든 변수들이 확정된 가치평가 방법이기 때문에 분석과정에서 고려되어야 할 불확실성이 반영되지 못하여 부정확한 가치평가를 제공할 수 있는 가능성을 가지고 있다[5]. 이러한 현금흐름할인법의 문제점을 보완하기 위하여 몇몇 연구에서는 실물옵션(Real Option)에 기반한 태양광발전소와 풍력발전소의 경제적 분석이 이루어지고 있다.

실물옵션을 이용한 경제적 가치분석은 현금흐름할인법에 비하여 평가과정에 불확실성과 의사결정의 유연성을 반영할 수 있으므로 불확실성이 큰 해상풍력발전단지 가치평가에 적합하다[24]. 불확실성이 큰 투자개발사업에는 적절한 유연성이 반영되지 못하면 가치평가가 상대적으로 저평가되어 잘못된 결과를 도출할 가능성이 높다. 그러므로 기존 신재생에너지 발전단지의 경제적 가치평가에 주로 사용된 현금흐름할인법의 단점을 보완하기 위하여 기존의 연구와는 다른 새로운 경제적 가치평가 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 평가과정에서의 불확실성을 반영하기 위하여 실물옵션과 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 방법을 사용하여 풍력발전소의 경제적 가치를 평가하였다.

이 연구의 학문적 공헌점은 신재생에너지 가치평가 분야에서 처음으로 옵션가격결정모형에서 가장 기본모델인 블랙-숄츠(Black-Scholes) 모델에 기반한 시스템 다이내믹스 경제적 가치 평가모델을 개발한 것이다. 비록 다른 옵션가격결정모형들도 평가과정의 불확실성을 효과적으로 반영할 수 있지만 시스템 다이내믹스에 옵션가격결정모형을 구현하기 위하여서는 단편 형태의 해를 제공하는 블랙-숄츠 모델이 적합하다. 개발된 모델을 이용하여 잠재적 풍력발전소의 경제적 가치를 평가하였으며 평가과정에서의 불확실성 요소인 운영비용, 매출액, 풍력에너지 생산량이 경제적 가치에 미치는 영향과 풍력에너지 생산량이 이산화탄소 감소에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 분석하였다.

2. 문헌연구

풍력발전소의 경제적 가치평가와 관련한 이전 연구에서 적합한 발전소 위치 선정이 지속적인 풍력발전소 운영의 전제 조건이기 때문에 최근에는 다양한 가치 평가방법을 사용하여 잠재적 발전소의 경제적 가치평가가 이루어

졌다. Angelakoglou 등은 전체론적 평가접근법(Holistic assessment)을 사용하여 터빈 위치가 경제적, 에너지, 환경적, 사회적, 재정적, 그리고 기술적 관점에 미치는 영향을 분석하였다[2]. 이 연구에서는 에너지 생산량과 재정적 관점에서 해상풍력발전단지가 육상풍력발전단지 보다 더욱 더 효율적이라는 것을 보여준 반면 육상풍력발전단지는 해상풍력발전단지에 비하여 환경적 측면에서 더욱 우수하다는 것을 보여주었다. Yeh와 Hung의 연구는 타이완에서의 풍력발전단지 입지 선정에서 환경요소와 안전요소가 가장 중요한 고려요소임을 보여주었다[31].

한편, 포르투갈의 해상풍력발전단지 사례연구에서 Rodrigues 등은 비용-편익 분석을 이용하여 풍력발전단지의 경제적 타당성을 확보하기 위하여서는 풍속이 가장 중요한 요소임을 보여주었다[28]. Chiang 등은 지형공간분석(Spatial analysis)을 사용하여 해상풍력발전단지는 건설 예정지의 수심과 육지까지의 거리에 많은 영향을 받는다는 것을 보여주었다[7]. Wu 등은 다중 기준 의사결정 방법을 사용하여 정보 손실이 중국에서의 해상풍력발전단지 입지선정 문제에 미치는 영향을 분석하였다[29]. 또한, Chaouachi 등도 다중 기준 의사결정 방법을 이용하여 초기투자 비용과 운영비용, 용량성능, 안전 등을 중요요소로 반영하여 네덜란드에서의 해상풍력발전단지 입지선정 문제를 고려하였다[8].

Abdel-Basset 등은 풍력 자원과 잠재적 손실 메커니즘을 고려한 하이브리드 다중 기준 의사결정 방법을 이용하여 이집트에 적합한 해상풍력발전단지 입지를 선택하였다[1]. 한편, Deveci 등은 경제적, 환경적, 사회적, 기술적 측면에서 다중 기준 의사결정 방법과 퍼지이론을 이용한 혼합모형을 사용하여 아일랜드에서의 해상풍력발전단지 입지를 분석하였다[11]. Gao 등은 또한 다중 기준 의사결정 방법과 퍼지이론을 이용하여 중국의 해상풍력발전단지 입지선정 문제를 고려하였다[14]. Xu 등은 다중 기준 의사결정 방법과 지형공간분석을 동시에 이용하여 경제적, 환경적, 사회적 관점에서의 해상풍력발전단지 입지문제를 고려하였다[30].

기술경제분석을 이용하여 Cali 등은 터키에서의 잠재적 해상풍력발전단지 입지선정 문제를 고려하였다[6]. 또한, Cali 등의 연구결과는 연간 에너지 생산량을 기준으로 특정 기술과 경제 조건에서만 잠재적 해상풍력발전단지가 경제적 타당성을 가지는 것을 보여주었다. Mytilinou와 Kolio 역시 기술경제분석을 사용하여 생활 주기, 레이아웃, 입지 관련 제약 등을 고려한 영국에서의 해상풍력발전단지의 입지 문제를 분석하였다[26]. Cranmer 등은 공간적 상호작용을 고려한 포트폴리오 모델을 이용하여 미국 해상풍력발전단지의 잠재적 입지문제를 분석하였다[9].

국내의 경우에는 몇몇 연구에서 경제적, 환경적, 사회적 관점을 고려하여 해상풍력단지의 경제적 타당성을 분석하

였다. Oh 등은 풍력자원을 고려한 해상풍력단지의 입지분석 문제를 고려하였다[27]. Kim 등은 비용-편익 분석을 통하여 해상풍력발전단지의 경제적 타당성에는 해상케이블 설치비용과 터빈용량이 가장 중요한 요소임을 보여주었다 [20]. 또한 Kim 등은 제주도에에서의 해상풍력단지 건설을 위한 다양한 입지선정 전략을 제시하면서 제주도의 경우에는 경제적, 환경적, 사회적 요소에서 사회적 요소가 입지선정에서 가장 중요 요소임을 보여주었다 [19]. 한편 Kim 등은 남서쪽 연안지역에서의 해상풍력발전단지 개발에서는 환경적 요소와 사회적 요소가 중요한 요소임을 보여주었다[17].

신재생에너지의 대표적인 에너지원인 태양광과 풍력 분야에서 실물옵션을 이용하여 경제적 타당성에 대한 연구가 진행되고 있다. 태양광 분야에서는 Assereto와 Byrne은 실물옵션을 사용하여 아일랜드의 에너지 정책에 따라 변화는 에너지 가격의 변동성이 태양광 투자 프로젝트의 경제적 타당성에 미치는 영향을 연구하였다[4]. 또한, Cuervo 등은 콜롬비아의 에너지 가격 변동성을 고려한 지연옵션을 사용하여 최적의 투자시기를 결정하는 연구를 수행하였다[10]. Kozlova는 실물옵션을 이용하여 에너지 가격, 기술 발전, 연료가격, 물가상승률 등의 다양한 불확실성이 에너지 프로젝트의 투자에 미치는 영향을 분석하였다[22]. Jeon 등은 에너지 가격과 생산량의 불확실성을 고려하여 국내의 태양광 투자 프로젝트 활성화에 필요한 정부의 적정 보조금을 계산하는 연구를 수행하였다[15].

최근에는 풍력에너지 분야에서 실물옵션을 이용한 경제적 타당성 연구가 진행되었다. Martinez-Cesena와 Mutale은 풍력 에너지와 관련된 다양한 불확실성을 고려하여 풍력에너지 투자 프로젝트의 최적 시기를 결정하기 위하여 실물옵션을 이용하였다[25]. Fuss와 Szolgayova는 불확실한 연료비와 기술 발전을 고려한 실물옵션을 이용하여 화석연료 기반 에너지에서 풍력발전 기반의 에너지로의 전환 시의 경제적 타당성을 분석하였다[13]. Kim 등은 전통적인 현금흐름할인기법과 이중옵션을 함께 이용하여 풍력발전 기술 R&D 투자의 경제적 가치를 평가하였다[18]. Kim 등은 실물옵션 기반의 의사결정 모형을 이용하여 기후변화의 불확실성이 해상풍력발전단지 개발에 미치는 영향을 분석한 후 이를 바탕으로 대상 풍력발전단지의 경제적 타당성을 분석하였다[17]. 또한, Aquila 등은 실물옵션을 이용하여 에너지 가격의 불확실성이 풍력발전단지의 경제적 타당성에 미치는 영향을 분석하였다[3].

해상풍력발전단지의 경제적 가치평가와 관련된 문헌연구를 통하여, 최근에는 현금흐름할인법 이외에도 실물옵션을 이용한 경제적 가치평가를 통하여 해상풍력단지의 입지를 평가하고 있는 것을 알게 되었다. 하지만 문헌연구를 통하여 불확실한 요인들의 영향을 고려한 실물옵션과

시스템 다이내믹스 방법을 함께 사용한 풍력발전소 가치평가에 관한 연구가 많이 이루어지지 않은 것을 확인하였다. 그러므로 문헌연구를 통하여 옵션가격결정모델인 블랙-숄즈 모델에 기반한 시스템 다이내믹스 경제적가치 평가모델의 개발은 학문적 가치가 있음을 보여준다. 또한, 개발된 경제적 가치모델을 이용하여 풍력발전소의 경제적 가치평가뿐만 아니라 다양한 신재생에너지 발전소의 경제적 가치평가를 실시할 수 있을 것이다.

3. 연구방법

이 연구에서는 해상풍력발전단지 입지의 경제적 가치분석을 위하여 옵션가격결정 모형인 블랙-숄즈 모델에 기반하여 시스템 다이내믹스를 이용한 경제적가치 평가모델을 개발하였다. 불확실한 요소들이 경제적 가치에 미치는 영향을 분석하기 위하여 민감도 분석을 실시하였으며 이를 통하여 불확실한 개발비용과 풍력에너지 생산량이 경제적 가치와 이산화 탄소 감소에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 입지선정

해상풍력발전단지의 경제적 타당성을 분석하기 위하여 이 연구에서는 한반도의 중서부 지역 해안에 위치한 전라북도 부안군에 위치한 네 곳의 대상지역을 고려하였다. 고려 대상지역은 Kim 등의 연구에서 현금흐름할인법에 기반한 비용-편익 분석을 통하여 경제적 타당성이 조사된 지역이다[20]. 하지만 Kim 등의 연구에서는 경제적 가치평가 과정에서 불확실성과 의사결정의 유연성을 고려하지 않는 현금흐름할인법이 사용되었으므로 실물옵션인 블랙-숄즈를 이용하여 경제적 타당성을 재평가한다.

3.1.1 입지 설명

잠재적 해상풍력발전단지는 전라북도 부안군의 해안 지역에 위치한 곳으로 풍향이 우수하며 수심이 얕아 풍력발전단지 건설비용이 다른 지역에 비하여 낮은 편이다. 대상지역은 해안으로부터 평균 12km 떨어져 있으며 수심은 평균적으로 20m보다 낮은 지역이다. 특히, 수심이 10m 이하인 곳이 85%의 분포를 보이고 있으며 약 400cm의 평균 조차와 0.3m/s의 평균 조류속을 보이는 지역이다. 조류의 방향은 북동-동류와 남서-서류가 주를 이루고 있다. 특히, 해안까지의 평균거리가 12km이므로 전력연계 측면에서도 유리한 입지 조건을 가지고 있다. 또한, 잠재적 해상풍력발전단지는 해양공원과 어장으로 사용되지 않는 지역이며 인근에 케이블이나 파이프라인 등과 같은 건설 시 장애물로 작용할 장애물도 존재하지 않는다. 그러므로 잠재적

대상위치는 대단위 해상풍력 발전단지에 적합한 지역으로 고려되고 있다. 대상지역의 바람 특성과 지리학적 특성은 <Table 1>에서 보인다.

<Table 1> The Characteristics of Potential Sites [20]

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
Longitude (°E)	126.29	126.23	126.17	126.17
Latitude (°N)	35.43	35.46	35.50	35.56
Depth of water (m)	10.99	12.91	15.46	19.57
Wind speed (m/s)	6.66	6.71	6.74	6.74
Desity of wind energy (w/m ²)	362.19	370.18	377.62	380.16
Capacity factor of turbines (%)	27.00	27.44	27.75	27.76
Annual energy production (MWh)	7,094.9	7,211.7	7,291.4	7,295.7
Minimum distance from land (km)	11.44	13.69	12.97	11.42
Minimum distance from substation (km)	11.96	18.22	24.55	30.19

3.1.2 투자 비용

해상풍력발전단지의 초기 투자비용과 운영비용은 Dicorato 등의 연구에서 해상풍력단지의 투자비용과 운영비용에 관한 비용계산식을 제공하므로 이 연구에서도 Dicorato 등의 연구에서 제시한 비용계산식을 사용하여 계산되었다[12]. 투자비용은 터빈구입 비용, 기초공사 비용, 전기 시스템 설치비용, 프로젝트 개발비용으로 구성되며 운영비용은 투자지출과 운영 및 유지보수 지출로 구성된다. Dicorato 등의 연구에서 제시한 비용은 유로화를 기준으로 제시되었다. 그러므로, 이 연구에서는 1.07 euro/dollar의 환율을 이용하여 달러 기준으로 비용들이 계산되었다.

터빈비용(P_{WT})은 사용되는 터빈의 종류, 크기, 높이, 설치 위치에 따라서 결정된다. 이 연구에서는 3MW의 터빈을 기준으로 터빈비용이 계산되었으며 이 식에서 P_{WT} 는 단일 터빈 블레이드의 전력용량(MW)을 나타낸다.

$$C_{WT} = 2.95 \cdot 10^3 \cdot \ln(P_{WT}) - 375.2 [k\text{€}]$$

기초공사 비용(P_F)은 구조물 제작비용, 운반비용, 설치비용으로 구성되며 기초공사 비용은 타워 높이, 발전기 어셈블리 무게, 로터 무게 설치 장소 토양 상태에 따라서 변화한다. 기초공사 비용 계산식에서 D 는 수심(m)이며, h 는 허브 높이(m), d 는 로터 지름(m)을 각각 나타낸다. 기초공사 관련 운반비용과 설치비용은 기초공사 구조물의 50%라고 가정한다.

$$C_F = 320 \cdot P_{WT}(1 + 0.02(D - 8))$$

$$\left(1 + 0.8 \cdot 10^{-6} \left(h \left(\frac{d}{2}\right)^2 - 10^5\right)\right) [k\text{€}/\text{turbine}]$$

전기 시스템 설치비용은 수집 시스템 비용, 통합 시스템 비용, 전송 시스템 비용으로 구성된다. 전기 시스템은 해상풍력발전단지에서 생산되는 풍력전기를 수집하여 육상 그리드를 이용하여 전송하는 시스템이다. 수집 시스템 비용은 km당 396k€의 케이블 생산비용과 365k€의 운송 및 설치 비용의 합으로 계산된다.

통합 시스템 비용은 MV/HV 변압기, MV 개폐기, 버스바 시스템, HV 개폐기, 디젤 발전기, 해상 변전소 플랫폼 등의 비용으로 구성된다. MV/HV 변압기 비용 (C_{TR})은 아래 식을 이용하여 계산되며 이 식에서 ATR는 변압기의 정격 전류 (MVA)이다. 한편으로는, 70k€의 MV 개폐기 비용, 2,650k€의 바 시스템 비용, 920k€의 HV 개폐기 비용이 사용되었다. 또한, 디젤 발전기 비용 (C_{DS})은 아래 두 번째 식을 이용하여 계산되었으며 이 식에서 n_{WT} 는 해상풍력발전기의 터빈 수를 나타낸다. 그리고 해상 변전소 플랫폼 비용 (C_{SP})은 아래 세 번째 식을 이용하여 계산되며, 해상 변전소 플랫폼은 상부 구조물, 하부 구조물, 기초구조물로 구성된다.

$$C_{TR} = 42.688 \cdot 10^3 \cdot A_{TR}^{0.7513} [k\text{€}]$$

$$C_{DS} = 21.242 + 2.069 \cdot n_{WT} \cdot P_{WT} [k\text{€}]$$

$$C_{SP} = 2,534 + 88.7 \cdot n_{WT} \cdot P_{WT} [k\text{€}]$$

전송 시스템 비용은 해상 변전소와 육상 변전소 사이의 연결 케이블로서 풍력발전소에서 생산된 전기를 전송하는 역할을 수행한다. 전송 시스템 비용은 km당 670k€의 케이블 생산비용과 720k€의 해상 케이블 설치비용의 합으로 계산된다. 또한, 프로젝트 개발비용은 MV당 46.8 k€으로 계산된다고 가정하였다.

3.1.3 운영 비용

해상풍력발전단지의 운영 비용은 투자 비용이 계산된 것처럼 Dicorato 등의 연구에서 제시한 운영비용 계산식을 참고하여 계산되었다. 운영 비용은 크게 투자지출과 운영 및 유지보수 지출로 나누어진다. Dicorato 등의 연구에서 투자지출 비용은 해상풍력발전단지의 건설 후 10년 동안만 발생한다고 가정하였으므로 이 연구 역시 투자지출 비용은 건설 후 10년 동안 발생하였다고 가정하였다. 투자지출 비용(I_t)은 아래 식을 이용하여 계산되며 이 식에서 I_t 는 초기 투자비이며, 75%의 차입 자본 이자율(r_c), 5%의 대출 금리(r_i), 10년의 상환기간(t_e)을 가정하였다.

$$I_t = I_i \times \left(\frac{100 - r_c}{100 \times 3}\right) \text{ for } t = 0 \sim 2\text{year}$$

$$I_t = \left[I_i \times \left(\frac{r_c}{100 \times 10} \right) + \frac{r_i}{100} \right] \cdot \left[I_i \times \frac{r_c}{100} - \frac{100}{t_{rc}} (t - (t-1)) \right] \text{ for } t = 3 \sim 12 \text{ year}$$

운영 및 유지보수 지출은 해상풍력발전단지의 운영과 보수와 관련된 비용이다. 20년 동안의 운영 및 유지보수 지출은 아래 식을 이용하여 계산되며 1.97%의 운영 및 유지보수 비율(r_m), 3%의 물가상승률(r_{inf}), 22%의 법인세(T_i)가 사용되었다.

$$M_t = I_i \times \frac{r_m}{100} \times \left(\frac{100 + r_{\infty}}{100} \right)^t$$

3.2 블랙-숄즈 모형

옵션가격결정모형은 R&D 투자가치 평가에서 많이 사용되고 있는 모델이므로 본 연구에서도 해상풍력발전단지의 가치평가에 식물옵션 가격결정모형에서 가장 대표적인 모델로 사용되고 있는 블랙-숄즈 모델을 이용하였다[5]. 블랙-숄즈 모델은 옵션의 가치를 기초자산의 현재가격과 행사가격의 현재가격의 차이를 이용하여 계산하며, 기초자산의 현재가격은 만기 시점까지 변동될 기초자산 가격의 기댓값으로 행사가격의 현재가격은 만기 시점에 옵션이 행사될 때의 가격으로 가정한다[11]. 또한 블랙-숄즈 모델을 해상풍력발전단지의 경제적 가치분석에 사용하기 위하여 기초자산의 확률과정은 기하 브라운 운동을 따른다고 가정하며 무위험 이자율은 모든 만기에 대해 동일하며 일정하다고 가정한다.

옵션가격결정모형인 블랙-숄즈 모형을 식물옵션에 적용하면 해상풍력발전단지에 대한 투자를 옵션의 기초자산에 대한 권리행사로 볼 수 있다[24]. 블랙-숄즈 모델이 해상풍력발전단지 가치평가에 사용될 때는 옵션평가모델에서 계산되는 콜옵션가격이 해상풍력발전단지의 경제적 가치를 나타낸다. 기초자산의 현재가치는 풍력발전단지를 통하여 얻을 수 있는 예상매출액으로 가정되며 옵션행사 가격은 해상풍력발전단지 개발을 위한 총비용인 투자비용과 운영비용의 합으로 가정한다. 또한, 기대현금흐름의 변동성은 기초자산의 변동성에 대한 변수로 가정한다. 해상풍력발전단지에 대한 권리를 잃지 않으면서 운영할 수 있는 기간을 옵션의 잔존만기로 가정한다.

만약 대상지역 해상풍력발전단지의 경제성 평가가 대상지역에 대단지 해상풍력발전단지 건설을 위한 시범사업으로 가정한다면 대상지역의 해상풍력발전단지의 경제성 평가는 대단지 해상풍력발전단지 개발을 위한 투자옵션을

보유한 것으로 고려할 수 있다[24]. 따라서 투자옵션의 행사는 해상풍력발전단지의 평가가 끝나는 시점에 이뤄지는 최적행사로 볼 수 있다. 예를 들어 대상지역의 해상풍력발전단지의 경제성 평가가 운영 후 3년 후인 2023년까지 실행된다고 가정한다면 이는 2024년 초 행사가 가능한 투자옵션을 가진 유럽형 콜옵션으로 볼 수 있다[24].

본 연구에서는 해상풍력발전단지의 경제적 가치는 아래의 블랙-숄즈 모델의 수식을 사용하여 계산되며 블랙-숄즈 모형의 입력변수들은 콜옵션가격 (C), 옵션행사가격 (K), 기초자산의 현재가치 (S), 잔존만기 (T), 변동성 (σ), 무위험 이자율 (r), 표준정규분포의 누적밀도함수 (N(d)) 등으로 구성된다. 또한, 신재생에너지 투자연구에 사용되었던 43.49%의 주식 수익률의 표준편차, 2.8%의 무위험 이자율, 20년의 운영 기간이 사용된다 [15].

$$C = SN(d_1) - Ke^{-rT}N(d_2)$$

$$d_1 = \frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left\{ \ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)T \right\}$$

$$d_2 = \frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left\{ \ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)T \right\}$$

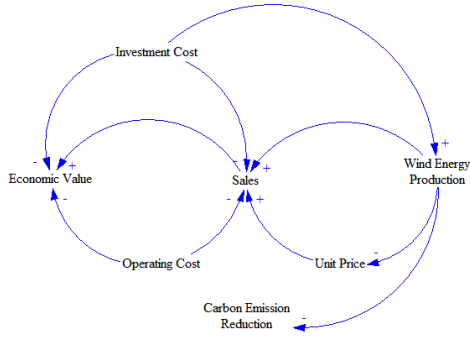
3.3 시스템 다이내믹스

신재생에너지 사업투자에 대한 가치평가는 높은 불확실성을 포함하고 있기 때문에 장기적인 관점에서 가치평가가 이루어져야 한다. 일반적으로 사용되고 있는 현금흐름할인법은 장기적 가치평가가 이루어져야 하는 신재생에너지 사업투자 가치평가에는 적합하지 않다. 또한 식물옵션가격결정모형은 불확실성 요인들이 정적으로 가치평가에 영향을 미치는 단점을 가지고 있기 때문에 신재생에너지 가치평가에 부분적인 한계를 가지고 있다. 그러므로 이러한 식물옵션가격결정모형의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 블랙-숄즈 모형을 구현하였다.

신재생에너지 사업은 다양한 요인들이 가치평가에 영향을 미치므로 복잡한 순환적 상호영향관계 모형화에 가장 적합한 시스템 다이내믹스 방법을 이용하는 것이 적합하다. 시스템 다이내믹스는 시스템 내에서 각 구성요소들의 순환적 인과관계와 요소 간의 관계를 다중의 피더백을 이용하여 동적으로 표현하여 각 구성요소들의 시스템에 미치는 영향을 분석하는 방법이다[14].

<Figure 1>의 해상풍력발전단지 가치평가모델 인과지도 (Causal-loop Diagram)에서 보듯이, 잠재적 위치의 경제적 가치는 풍력 에너지 판매량에 의하여 증가하며, 풍력에너지 판매량은 풍력에너지 생산량과 신재생에너지 단위가격에 의하여 증가한다. 투자비용과 운영비용의 증가는 매

출액을 감소시키며 풍력에너지의 증가는 신재생에너지 단위가격의 하락에 의해 매출액을 증가시킨다. 또한, 풍력에너지의 증가는 풍력에너지 단위가격의 하락과 이산화탄소 감소량을 증가시킨다.



<Figure 1> Causal-loop Diagram of an Evaluation Model

또한, 본 연구에서 개발된 해상풍력발전단지 가치평가모델의 유량-저량 지도(Stock and Flow Diagram)는 Appendix에서 확인할 수 있다. 이 연구에서는 가치평가 과정에 사용된 신재생에너지 가격은 한국원자력학회의 자료를 바탕으로 예측되었으며 전기의 탄소배출계수는 0.5246 kg CO₂-e/kWh를 사용하였다.

4. 연구결과

본 연구에서는 전라북도 부안군의 해안 지역에 설치될 해상풍력발전단지의 경제적 가치평가를 위하여 개발된 블랙-박스 모델에 기반한 가치평가모델을 사용하였다. 잠재적 발전단지의 경제적 가치뿐만 아니라 환경적 경감효과에 관해서도 분석하였다. 또한 경제적 가치 평가과정에서의 불확실한 요인인 해상풍력발전단지 투자비용, 운영비용, 매출액, 신재생에너지 생산량이 경제적 가치에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 알아보았다. 이 연구에서는 대상지역 해상풍력발전단지의 경제성 평가를 대단위 해상풍력발전단지 개발을 위한 투자옵션을 보유한 실증사업으로 가정하므로 옵션행사가격과 기초자산의 현재가치를 계산할 때 각 연도의 가치를 이용한다고 가정한다.

4.1 잠재적 입지의 경제적 가치

본 연구에서는 2020년부터 2040년까지 잠재적 건설위치에 건설될 해상풍력발전단지의 건설 및 운영기간 동안의 경제적 가치를 평가하였다. 각 위치의 평균투자비용, 평균운영비용, 평균매출액은 아래의 <Table 2>에서 나타

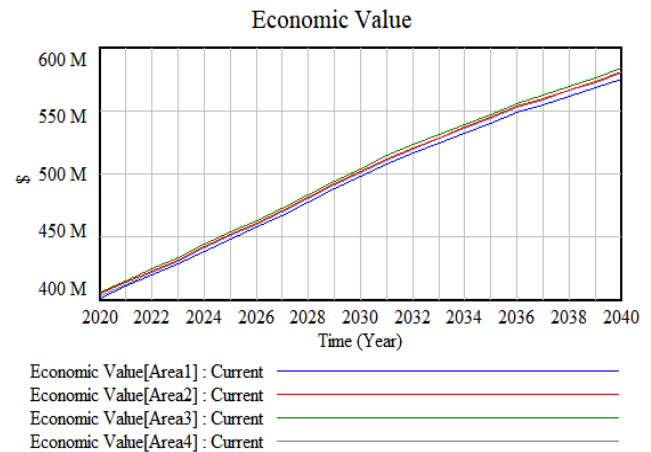
난다. 각 잠재적 건설위치의 연도별 경제적 가치는 각 연도를 기준으로 고정 투자비용, 고정 운영비용, 고정 매출액이 사용되며 각 연도를 기준으로 20년의 운영기간을 고려하여 다른 잔존만기 기간이 적용된다.

<Table 2> The Total Cost of POTENTIAL Sites (\$ M)

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
투자비용	196.30	214.60	229.90	243.90
운영비용	2.81	3.07	3.29	3.49
매출액	580.30	589.88	596.35	596.71

개발된 경제적 가치 평가모델을 사용하여 네 곳의 잠재적 위치인 Area 1에서 Area 4까지의 경제적 가치는 <Figure 2>에 보이고 있다. 각 연도별 경제적 가치는 각 연도를 기준으로 남은 잔존만기 기간이 적용되어 계산된다. <Figure 2>에 나타난 것처럼 Area 1은 \$493.62 M, Area 2는 \$497.74 M, Area 3은 \$499.90 M, Area 4는 \$496.70 M의 경제적 가치를 가지고 있다. 현금흐름할인법에 기반한 비용-편익 분석을 통하여 경제적 타당성을 조사한 Kim 등의 연구에서는 Area 1이 가장 경제적인 위치로 선정되었지만 실물옵션을 이용한 경제적 가치평가에서는 Area 3이 가장 경제적인 위치로 나타났다. Kim의 연구와 다른 결과를 보여주는 이유는 만기 시에 기초자산의 현재가치가 행사가치 보다 클 때 기초자산의 기대가치의 영향으로 추측된다. 기초자산의 기대가치는 기초자산의 현재가치와 위험중립확률($N(d_1)$)의 곱으로 표현된다.

Area 1을 기준으로 본 연구에서는 Area 2는 0.83%, Area 3은 1.27%, Area 4는 0.62%의 더 나은 경제적 가치를 가지고 있음을 보여준다. 따라서 경제적 측면에서 Area 3이 가장 좋은 잠재적 발전위치이며 Area 1이 가장 나쁜 잠재적 발전위치임을 보여준다.



<Figure 2> Economic Values of Potential Sites

또한, 개발된 가치평가모델을 이용하여 각 잠재적 위치에 풍력발전단지가 건설될 때의 이산화탄소 감소량을 예측하였는데 Area 1은 320.1 M kg CO₂-e, Area 2는 325.4 M kg CO₂-e, Area 3은 329.0 M kg CO₂-e, Area 4는 329.2 M kg CO₂-e의 이산화탄소 감축효과가 있음을 보여주었다. 잠재적 풍력발전단지 위치에서는 Area 4가 가장 큰 환경적 경감효과를 가지며 Area 1이 가장 작은 환경적 경감효과를 보여주고 있다. Area 1을 기준으로 본 연구에서는 Area 2는 1.66%, Area 3은 2.78%, Area 4는 2.84%의 더 나은 환경적 경감효과를 가지고 있음을 보여준다. 환경적 측면에서는 Area 4가 가장 좋은 잠재적 발전위치이며 Area 1이 가장 나쁜 잠재적 발전위치임을 보여준다.

4.2 민감도 분석

본 연구에서는 민감도 분석을 통하여 해상풍력발전단지 가치평가과정에서 중요한 불확실 요소인 투자비용, 운영비용, 매출액, 신재생에너지 생산량이 잠재적 발전위치의 경제적 가치에 미치는 영향과 신재생에너지 생산량이 이산화탄소 감소량에 미치는 영향을 분석하였다. 풍력발전단지의 선정에는 경제적 가치와 환경적 가치인 이산화탄소 감소량이 중요한 지표이므로 불확실 요소들이 이들 지표에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에서는 하나의 불확실성 요소에 대한 민감도 분석을 실행할 때, 나머지 세 가지의 불확실성 요인은 변화지 않는 요인으로 가정하였다. 또한, 특정 불확실 요소들의 단순 증분량 변화들이 경제적 가치와 이산화탄소 감소량의 변화에 어떤 영향을 미치는 지를 확인하기 위하여 민감도 분석을 실행하였다. 각 불확실성 요소들이 변화하게 되면 블랙-숄즈 모델의 입력변수인 옵션행사가격과 기초자산의 현재가치 변화에 의해서 경제적 가치의 변화가 발생한다.

<Table 3> The Sensitivity Analysis of Investment Costs

(\$ M)	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
2020 (5%)	399.5	402.4	403.7	400.8
2040 (5%)	572.7	577.7	580.4	576.9
Average Annual Increase Rate (5%)	36.4%	36.5%	36.6%	36.8%
2020 (10%)	397.2	400.0	401.2	398.2
2040 (10%)	569.9	574.8	577.4	573.8
Average Annual Increase Rate (10%)	36.5%	36.6%	36.8%	36.9%
2020 (15%)	394.9	397.0	398.7	395.0
2040 (15%)	567.2	572.4	574.4	570.7
Average Annual Increase Rate (15%)	36.6%	36.9%	36.9%	37.2%

본 연구에서는 각 불확실 요소가 5%에서 15%까지 5%씩 증가하며 잔존만기 기간이 변할 때 경제적 가치가 어떻게 변화하는 지를 살펴보았다. <Table 3>은 투자비용이 5%에서 15%까지 5%씩 증가할 때 각 잠재적 건설위치의 경제적 가치 변화와 연평균 증가율을 보여주고 있다. 예를 들어서, Area 3의 경우에는 설치비용 변동성이 5%에서 15%까지 5%씩 증가할 때, 경제적 가치는 투자금액이 5% 증가하면 평균적으로 0.58% 감소하며, 투자금액이 10% 증가하면 평균적으로 1.15% 감소하며, 투자금액이 15% 증가하면 평균적으로 경제적 가치는 1.70% 감소한다.

다음은 또 다른 불확실 요소인 운영비용이 변동할 때 경제적 가치에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 분석하였다. 예를 들어서, Area 3의 경우에는 운영비용의 변동성이 5%에서 15%까지 5%씩 증가하며 잔존만기 기간이 변할 때, Area 3의 경제적 가치는 운영비용이 5% 증가하면 평균적으로 0.07% 감소하며, 운영비용이 10% 증가하면 평균적으로 0.12% 감소하며, 운영비용이 15% 증가하면 평균적으로 경제적 가치는 0.19%로 감소한다. 민감도 분석 결과를 기초하여, 투자비용과 운영비용의 변동성이 잠재적 풍력발전단지의 경제적 가치에 미치는 영향을 살펴볼 때 초기 투자금액이 경제적 가치에 더욱 큰 영향을 주고 있다는 것을 확인할 수 있다.

또한, 잠재적 풍력발전단지의 매출액이 향후 대상단지의 경제적 가치에 미치는 영향을 살펴보았다. Area 3의 경우를 살펴보면, 매출액의 변동성이 5%에서 15%까지 5%씩 증가하며 잔존만기 기간이 변할 때, 경제적 가치는 매출액이 5% 증가하면 평균적으로 5.61% 증가하며, 매출액이 10% 증가하면 평균적으로 11.24% 증가하며, 매출액이 15% 증가하면 평균적으로 경제적 가치는 16.88%로 증가한다. 민감도 분석결과가 보여주듯, 잠재적 풍력단지의 지속적인 운영을 위하여서는 경제적 가치를 향상시킬 수 있는 매출액의 증가가 중요한 불확실 요소임을 보여준다.

마지막으로 신재생에너지 생산량이 잠재적 풍력발전단지의 경제적 가치에 미치는 영향을 분석하기 위한 민감도 분석의 결과가 <Table 4>에 나타나 있다.

AREA 3의 경우를 살펴보면, 풍력에너지의 증가량이 5%에서 15%까지 5%씩 증가하며 잔존만기 기간이 변할 때, 경제적 가치는 생산량이 5% 증가하면 평균적으로 경제적 가치는 5.61% 증가하며, 생산량이 10% 증가하면 평균적으로 경제적 가치는 11.25% 증가하며, 생산량이 15% 증가하면 경제적 가치는 평균적으로 16.89%로 증가한다. 투자비용과 운영비용의 증가는 잠재적 풍력발전단지의 경제적 가치를 감소시키며 매출액과 풍력에너지 생산량의 증가는 잠재적 풍력발전단지의 경제적 가치를 증가시키는 것으로 나타난다. 또한, 풍력에너지가 5% 증가하면 Area

1은 336.1 M kg CO₂-e, Area 2는 41.7 M kg CO₂-e, Area 3은 345.4 M kg CO₂-e, Area 4는 345.6 M kg CO₂-e의 이산화탄소 감축효과가 있음을 보여주었다.

<Table 4> The Sensitivity Analysis of Energy Production

(\$ M)	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
2020 (5%)	399.5	402.4	403.7	400.8
2040 (5%)	572.7	577.7	580.4	576.9
Average Annual Increase Rate (5%)	36.1%	36.3%	36.4%	36.6%
2020 (10%)	397.2	400.0	401.2	398.2
2040 (10%)	569.9	574.8	577.4	573.8
Average Annual Increase Rate (10%)	36.0%	36.2%	36.3%	36.4%
2020 (15%)	394.9	397.0	398.7	395.0
2040 (15%)	567.2	572.4	574.4	570.7
Average Annual Increase Rate (15%)	35.9%	36.1%	36.3%	36.4%

5. 결론

RE100이 중요시되고 있는 현재의 경영환경에서 신재생 에너지 발전단지의 개발과 운영은 국가전략의 중요한 부분이 되어가고 있다. 효율적이며 효과적인 신재생에너지 발전단지의 개발과 운영을 위하여서는 잠재적발전 위치의 경제적 가치평가는 계획단계에서 가장 중요한 부분일 것이다. 따라서, 본연구에서는 잠재적 해상풍력발전단지의 경제적 가치평가를 위한 평가모형을 개발하였다. 개발된 가치평가모형은 평가과정에서 고려되어야 하는 불확실 요소들을 평가과정에 반영하기 위하여 실무옵션 가격모형인 블랙-숄츠 모형에 기반하여 시스템 다이내믹스 형태의 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 평가과정에서 발생하는 불확실한 요소들이 가치평가에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 편익-분석 기법을 사용하여 이미 평가된 네 곳의 잠재적 해상풍력발전 위치를 대상으로 경제적 가치를 평가하였다. 분석된 결과는 편익-분석 기법을 사용하여 평가된 결과와 다른 결과를 보여주었으며 이를 바탕으로 평가과정에서 불확실한 요소들의 반영의 중요성을 보여주었다. 또한, 해상풍력발전단지의 가치평가에서 중요한 불확실한 요소인 투자비용, 운영비용, 매출액, 신재생에너지 생산량 등이 경제적 가치에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 알아보았다. 민감도 분석 결과는 투자비용과 운영비용의 증가는 경제적 가치를 감소시키며 매출액과 신재생에너지 생산량의 증가는 경제적 가치를 증가시키는 것을 보여주었다. 또한 잠재적 풍력발전단지의 환경 경감효과를 이산화탄소 감소량을 기준으로 살펴보았다.

Acknowledgement

This research was supported by Changwon National University in 2021~2022.

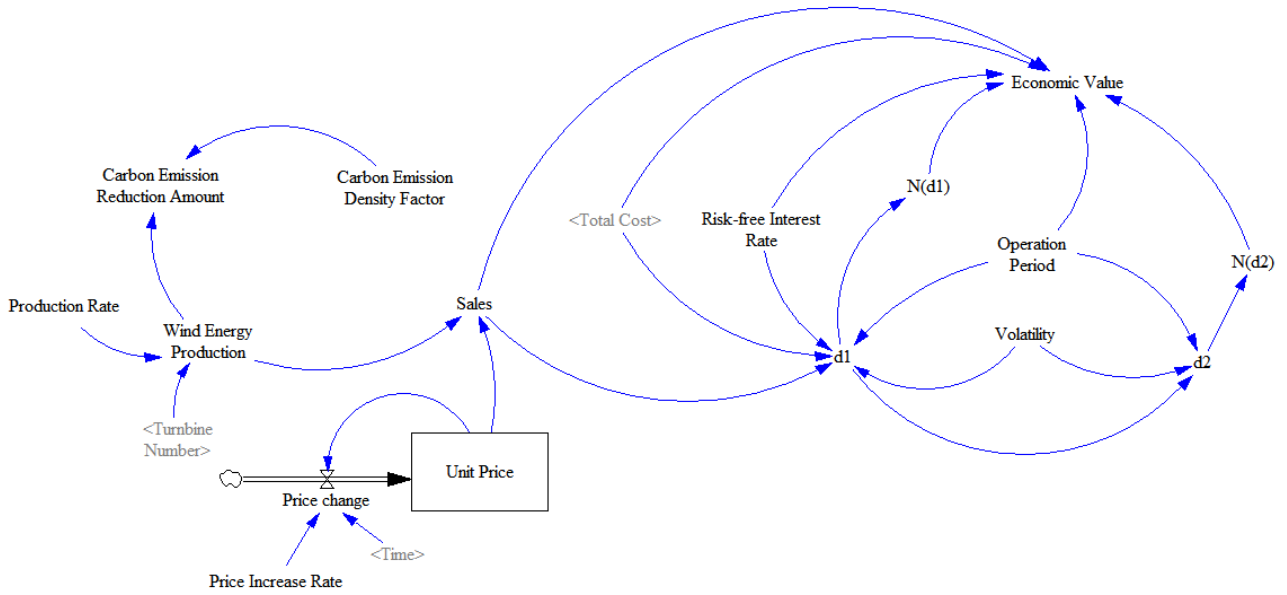
References

- [1] Abdel-Basset, M., Gamal, A., Chakraborty, K.R., and Ryan M., A new hybrid multi-criteria decision-making approach for location selection of sustainable offshore wind energy stations: A case study, *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 280, pp. 123362.
- [2] Angelakoglou, K., Botsari, N.P., and Gaidajis, G., Issues regarding wind turbines positioning: A benchmark study with the application of the life cycle assessment approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessment*, 2014, Vol. 5, pp. 7-18.
- [3] Aquila, G., de Queiroz, A.R., Balestrassi, P.P., Rotella Junior, P., Rocha, L.C.S., Pamplona, O., and Nakamura, W.T., Wind energy investments facing uncertainties in the Brazilian electricity spot market: A real options approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020. Vol. 42, pp. 100876.
- [4] Assereto, M. and Byrne, J., No real option for solar in Ireland: A real option valuation of utility scale solar investment in Ireland, *Renewable and sustainable Energy Review*, 2021, Vol. 143, pp. 1-9.
- [5] Black, F. and Scholes, M., The pricing of options and corporate liabilities, *The Journal of Political Economy*, 1973, Vol. 81, pp. 637-654.
- [6] Cali, U., Erdogan, N., Kucuksari, S., and Argin, M., Techno-economic analysis of high potential offshore wind farm locations in Turkey, *Energy Strategy Reviews*, 2018, Vol. 22, pp. 325-336.
- [7] Chiang, C.A., Keoleian, A.G., Moore, R.M., and Kelly C.J., 2016. Investment cost and view damaged cost of siting on offshore wind farm: A spatial analysis of Lake Michigan, *Renewable Energy*, Vol. 96, pp. 966-976.
- [8] Chaouachi, A., Covrig C.F., and Ardelean, M., Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States, *Energy Policy*, 2017, Vol. 103, pp. 179-192.
- [9] Cranmer, A., Baker, E., Liesio, J., and Salo, A., A portfolio model for siting offshore wind farms with economic and environmental objectives, *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 267, pp. 304-314.

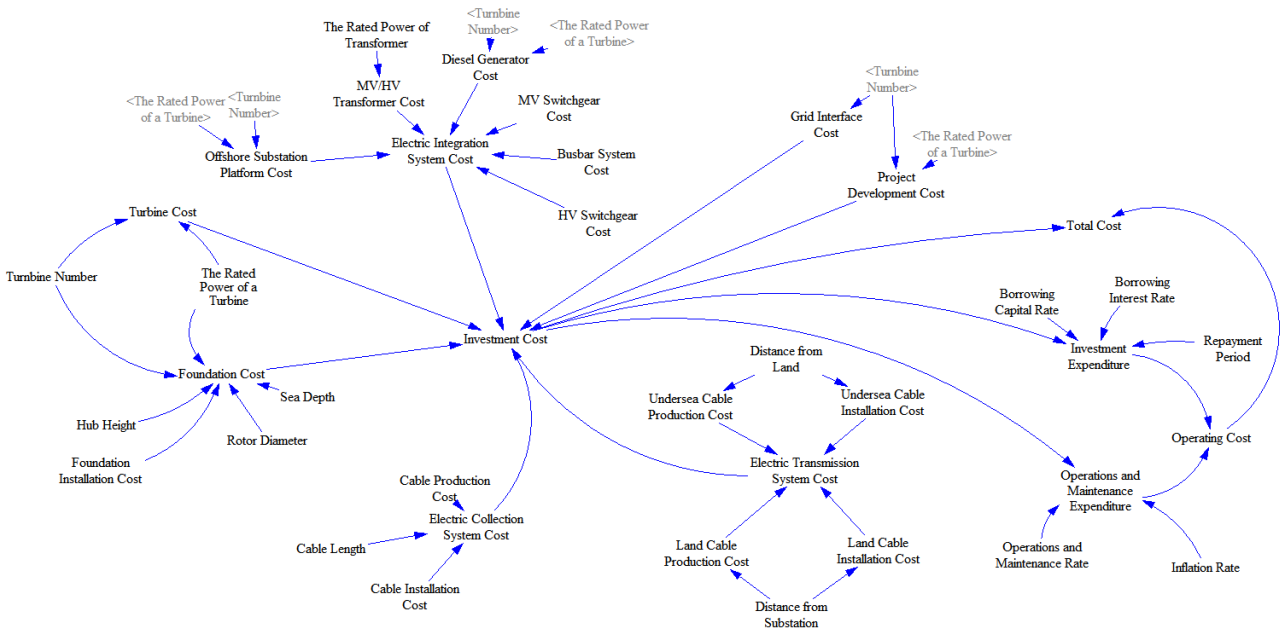
- [10] Cuervo, F.I., Arredondo-Orozco, C.A., and Marengo-Maldonado, G.C., Photovoltaic power purchase agreement valuation under real options approach, *Renewable Energy Focus*, 2021, Vol. 36, pp. 96-107.
- [11] Deveci, M., Cali, U., Kucuksari, S., and Erdogan, N., Interval type-2 fuzzy sets based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm development in Ireland, *Energy*, 2020, Vol. 198, pp. 117317.
- [12] Dicorato, M., Forte, G., Pisani, M., and Trovato, M., Guidelines for assessment of investment cost for offshore wind generation, *Renewable Energy*, 2011, Vol. 36, pp. 2043-2051.
- [13] Fuss, S. and Szolgayova, J., Fuel price and technological uncertainty in a real options model for electricity planning, *Applied Energy*, 2010, Vol. 87, pp. 2938-2944.
- [14] Gao, J., Guo, F., Ma, Z., Huang, X., and Li, X., Multi-criteria ground decision making framework for offshore wind farm site selection based on the intuitionistic linguistic aggregation operators, *Energy*, 2020., Vol. 204, pp. 117899.
- [15] Jeon, C., Lee, J., and Shin, J., Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model: Photovoltaic technology case, *Applied Energy*, 2015, Vol. 142, pp. 33-43.
- [16] Kim, J., A study on the improvement plans of the IMO's regulation for the greenhouse gas emissions from international shipping, *Regional Industry Review*, 2018, Vol. 41, No. 1, pp. 237-260.
- [17] Kim, K., Kim, B., and Kim, H., A decision-making model for the analysis of offshore wind farm projects under climate uncertainties: A case study of South Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 94, pp. 853-860.
- [18] Kim, K., Lee, D., and Park, S., Evaluation of R&D investments in wind power in Korea using real option, *Renewable Sustainable Energy Review*, 2014, Vol. 40, pp. 335-347.
- [19] Kim, T., Park, J., and Maeng, J., Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea, *Renewable Energy*, 2016, Vol. 94, pp. 619-628.
- [20] Kim, J., Oh, K., Kang, K., and Lee, J., Site selection of offshore wind farms around the Korean Peninsula through economic evaluation, *Renewable Energy*, 2013, Vol. 54, pp. 189-185.
- [21] Korea Nuclear Society (KNS), The report of energy mix analysis, Special Committee on Energy Mix, 2021.
- [22] Kozlova, M., Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design, *Renewable and sustainable Energy Review*, 2017, Vol. 80, pp. 180-196.
- [23] Kwon, T., Market or regulation for renewable energy policies in Korea, *Journal of Korean Economic Development*, 2018, Vol. 67, pp. 1-26.
- [24] Lee, D., Yun, S., Kim, S., and Jeong, K., Economic evaluation of offshore wind power demonstration project by the real option method, *Korean Economic Review*, 2012, Vol. 11, No. 2, pp. 1-26.
- [25] Martinez-Cesena, E.A. and Mutale, J., Wind power projects planning considering real options for the wind resource assessment, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, Vol. 3, pp. 158-166.
- [26] Mytilinou, V. and Kolios, J.A., Techno-economic optimisation of offshore wind farms based on life cycle cost analysis on the UK, *Renewable Energy*, 2019, Vol. 132, pp. 439-454.
- [27] Oh, K., Kim, J., Lee, J., and Ryu, K., Wind resource assessment around Korean peninsula for feasibility study on 100 MW class offshore wind farm, *Renewable Energy*, 2012, Vol. 42, pp. 217-226.
- [28] Rodrigues, M., Silva, V., Barcelos, E., Silva, C., and Dentinho, T., Geographical information systems and cost benefit analysis-based approach for wind power feasibility: a case study of Teceira Island, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015, Vol. 7, pp. 053115.
- [29] Wu, Y., Zhang, J., Yuan, J., Geng, S., and Zhang, H., Study of decision framework of offshore wind power station site selection based on ELECTRE-III under intuitionistic fuzzy environment: A case of China, *Energy Conversion and Management*, 2016, Vol. 113, pp. 66-81.
- [30] Xu, Y., Li, Y., Zheng, L., Cui, L., Li, S., Li, W., and Cai, Y., Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision-making method in Wafangdian, China, *Energy*, 2020, Vol. 207, pp. 118222.
- [31] Yeh, T. and Huang, Y., Factors in determining wind farm location: Integrating GQM, fuzzy DEMATEL, and ANP, *Renewable Energy*, 2014., Vol. 66, pp. 159-169.

ORCIDJaehun Sim | <http://orcid.org/0000-0003-3519-8136>

<Appendix>



<Figure A1> The Stock-and-flow Diagram of the Developed Economic Evaluation Model



<Figure A2> The Stock-and-flow Diagram of the Total Cost