

The Economic Evaluation of the Renewable Energy Projects using the Geske Model

Jaehun Sim[†]

Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

게스케(Geske) 모델을 이용한 신재생에너지사업의 경제성 분석

심재훈[†]

창원대학교 산업시스템공학과

As the environmental impacts of fossil fuel energy sources increase, the South Korean government has tried to change non-environmental-friendly energy sources to environmental-friendly energy sources in order to mitigate environmental effects, which lead to global warming and air pollution. With both a limited budget and limited time, it is essential to accurately evaluate the economic and environmental effects of renewable energy projects for the efficient and effective operation of renewable energy plants. Although the traditional economic evaluation methods are not ideal for evaluating the economic impacts of renewable energy projects, they can still be used for this purpose. Renewable energy projects involve many risks due to various uncertainties. For this reason, this study utilizes a real option method, the Geske compound model, to evaluate the renewable energy projects on Jeju Island in terms of economic and environmental values. This study has developed an economic evaluation model based on the Geske compound model to investigate the influences of flexibility and uncertainty factors on the evaluation process. This study further conducts a sensitivity analysis to examine how two uncertainty factors (namely, investment cost and wind energy production) influence the economic and environmental value of renewable energy projects.

Keywords : Economic evaluation, Geske compound option model, real option, renewable energy, and system dynamics

1. 서론

화석에너지 자원의 사용에 의하여 발생하는 각종 대기오염문제와 이에 의한 지구온난화는 현재 인류와 자연에 심각한 영향을 미치고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 세계 각국은 화석에너지를 이산화탄소가 거의 발생하지 않는 신재생에너지로 대체하기 위하여 신재생에너지 관련 기술들의 개발을 위한 활발한 투자가 진행되고 있다. 대한

민국 역시 이러한 추세에 동참하여 2034년까지 신재생에너지 발전량 비중을 전체 에너지 발전량의 40%까지 확대하기 위하여 노력하고 있다[14]. 대한민국 정부는 2030년의 온실가스 배출목표인 1.93억 톤의 달성을 위하여 재생에너지 밀집 지역별 맞춤형 대책을 통하여 2034년까지 신재생에너지 발전량을 77.8GW까지 확대할 계획이다.

하지만 화석에너지 발전단가 보다 비싼 신재생에너지 발전단가는 신재생에너지 확대를 추구하는 대한민국 정부에게 신재생에너지 프로젝트 투자의 전략과 집중의 중요성을 인식시켜 주었다. 제한된 정부의 신재생에너지 관련 예산 범위에서 최대한의 에너지 발전 생산량을 확보하기 위하여서는 신재생에너지 프로젝트의 계획단계에서 프로

젝트의 경제적 타당성 검증이 필요하다. 또한 신재생에너지는 다른 종류의 프로젝트와 다르게 신재생에너지의 발전량은 강수량, 일사량, 풍속 등의 기후요소에 많은 영향을 받으므로 신재생에너지는 본질적으로 자연 자원의 불확실성을 가지고 있다[10]. 그러므로 신재생에너지 프로젝트의 경제성 분석은 이러한 불확실성을 고려한 경제성 분석이 이루어져야 한다. 하지만 이러한 불확실성을 고려한 신재생에너지 프로젝트 경제성 분석과 관련된 연구는 제한적으로 진행되었다.

일반적으로 신재생에너지의 경제성 분석 연구는 현금흐름할인법을 기반으로 한 순현재가치, 내부수익률, 비용-편익 분석과 같은 전통적인 기법들을 이용하여 주로 이루어졌다[10]. 현금흐름할인법 기반의 기법들은 다양한 종류의 프로젝트 투자의 경제적 타당성 분석에 쉽게 이용할 수 있지만, 변동성 및 불확실성이 큰 프로젝트 투자의 경제성 분석에는 변동성과 불확실성을 경제적 평가과정에 반영하지 않으므로 정확한 경제적 분석이 어렵다. 변동성과 불확실성이 큰 신재생에너지 프로젝트 투자의 가치평가에는 현금흐름할인법 기반의 기법들을 적용하기 어렵다. 따라서, 이러한 전통적 기법들의 문제점을 해결하기 위하여 제한적이지만 경제성 분석 과정에 불확실성을 반영한 실물옵션 기법을 사용하여 신재생에너지의 경제성 분석도 실행되었다.

이러한 이유로 본 연구에서는 변동성과 불확실성이 큰 신재생에너지 프로젝트 투자의 가치를 평가하기 위해 실물옵션과 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 기법을 이용하여 제주도의 육상 풍력발전, 해상 풍력발전, 그리고 태양광의 프로젝트들의 경제적 가치를 분석한다. 구체적으로, 이중실물옵션 가격결정모형 중에서 가장 기본적인 Geske 모델을 기반으로 시스템 다이내믹스 모델을 이용하여 경제성 평가모형을 개발하였다. 또한, 개발된 평가모형을 이용하여 신재생에너지 프로젝트에서 고려해야 할 대표적인 불확실 요소인 투자비용과 신재생에너지 생산량이 대상 프로젝트의 경제적 가치와 환경적 가치에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 개발된 실물옵션 기반 경제성 평가모형을 이용하여 다양한 신재생에너지 프로젝트의 경제적 가치분석에 이용될 것으로 기대한다.

2. 문헌연구

신재생에너지 프로젝트와 관련된 이전의 경제적 가치분석 연구에서는 현금흐름할인기법을 이용한 경제적 분석이 주로 이루어졌지만, 최근에는 현금흐름할인기법의 문제점을 해결하기 위하여 실물옵션을 이용하여 신재생에너지 프로젝트 경제적 분석에 관한 연구 또한 많이 이루어지고 있다. Kjæland[13]은 투자시기별로 옵션가격을 결정할 수

있는 실물옵션 프레임워크를 이용하여 노르웨이 수력발전 프로젝트의 경제적 투자가치를 평가하였다. Bøckman et al.[5]은 실물옵션모델을 이용하여 노르웨이 소규모 수력발전 프로젝트의 적정 투자 시간과 최적 발전 용량 결정을 위한 연구를 진행하였다. 이 연구를 통하여 소규모 프로젝트의 투자시기 결정과 경제성 확보를 위한 특정 가격 범위가 존재한다는 것을 보여주었다.

Venetsanos et al.[23]은 기후변화, 경제성장, 소비경향, 새기술 출현 등의 불확실성을 고려하여 그리스 풍력 에너지 프로젝트와 관련된 불확실성 평가방법을 제시하였다. Boomsma et al.[4]은 실물옵션 방법을 이용하여 다양한 지원계획에서 신재생에너지 투자시기와 투자규모와 관련된 투자행동을 분석하였다. Abadie and Chamorro[1]는 이항격자모형을 이용하여 불확실한 전력가격, 풍력 발전량, 보조금 등이 영국의 풍력 발전단지 프로젝트에 미치는 영향을 분석하였다. Reuter et al.[20]은 불확실한 에너지 가격과 생산량을 고려한 실물옵션을 이용하여 풍력발전을 위한 생산용량과 기술종류를 결정하는 연구를 수행하였으며 또한 개발된 실물옵션 모델을 이용하여 불확실한 에너지 정책에 대응하는 에너지 생산자의 대응방안도 연구하였다. Lee and Shin[16]은 타이완의 풍력발전 관련 정책 분석을 위하여 이항격자모형을 이용한 정책 평가모형을 개발하였다. 이 연구를 통하여 기초자산 가격, 옵션행사가격, 옵션행사시기, 무위험이자율, 변동성 등의 불확실 요소들이 정책 평가에 미치는 영향을 분석하였다.

Barroso and Iniestata[3]는 실물옵션에 기반하여 제시한 경제성 분석방법을 이용하여 다양한 불확실 요소인 풍력발전단지 투자비, 전기생산량, 전기요금, 소비자물가지수 등이 독일 풍력발전 단지의 경제성에 미치는 영향을 분석하였다. Loncar et al.[17]은 복합옵션인 이항나무방법을 이용하여 세르비아의 민간 부분과 공공 부분에서의 육상 풍력발전단지의 경제성 평가를 수행하였다. 또한 이 연구를 통하여 다양한 불확실요소 중에서 변동성이 풍력발전단지의 경제성에 가장 큰 영향을 주는 요소임을 보여주었다. Martinez-Cesena and Mutale[19]은 소형 풍력발전 프로젝트의 가치평가를 위하여 실물옵션을 이용하였으며 이 연구를 통하여 풍력발전단지 설계단계에서의 풍력자원의 불확실성을 고려하는 것이 풍력발전단지의 경제성 타당성을 향상하는 중요요소임을 증명하였다.

국내 풍력발전단지의 경제성 평가를 위하여 실물옵션을 이용한 연구가 진행되었다. Kim et al.[11]은 실물옵션 방법을 이용하여 풍력에너지와 관련된 R&D 투자의 경제성 분석을 수행하였다. 또한, 개발된 실물옵션모델을 이용하여 에너지 생산량, 무위험이자율, 이자율 변동성, 풍력 에너지 판매가격 등의 불확실 요소들이 R&D 투자의 경제성에 미치는 영향을 분석하여 관련 풍력발전 기술의 적절

한 적용시기를 제시하였다. 또한, Kim and Chang[12]은 풍력발전단지 개발프로젝트를 이용하여 에너지 생산량, 전기판매가격, 이자율 변동성 등의 불확실성이 대상 프로젝트의 경제성 가치에 미치는 영향을 분석하였다. Lee et al.[15]은 확장옵션을 이용하여 해상풍력발전단지의 경제성 분석을 시행하였으며 이 연구를 통하여 풍력발전단지의 경제성 확보는 국가의 신재생에너지 보조금이 중요한 역할을 하고 있는 것을 보여주었다.

풍력발전과 비슷하게 태양광 발전 부분에서도 실물옵션을 이용한 연구가 이루어졌다. Zhange et al.[24]은 실물옵션 모델을 이용하여 탄소세, 에너지 가격, 투자비, 전기판매가격 등의 불확실 요소들이 중국 태양광발전 프로젝트의 경제성에 미치는 영향을 평가하였다. 이 연구에서 신재생에너지의 투자 활성화를 위하여 정부의 보조금, 관련 기술 발달, 시장 안정 등이 중요한 요소임을 보여주었다. Deter and Kotani[6]는 연기옵션을 이용하여 석탄 가격의 불확실성이 몽골에서의 태양광발전과 풍력발전의 가능성을 경제성을 기준으로 평가하였다. Jeon et al.[7]은 국내의 태양광발전 사업의 발전차액기준가격을 결정하기 위하여 개발된 실물옵션모델을 이용하여 전기판매가격, 태양광에너지 생산량, 무위험 이자율, 위험 프리미엄, 환율과 같은 불확실 요소들이 위험성 있는 사업에서의 발전차액기준가격을 산정하였다.

Kim et al.[8]은 포기옵션을 고려한 실물옵션 모델을 이용하여 건물 일체형 태양광발전 시스템의 경제성분석을 수행하였다. 이 연구를 통하여 전기판매가격의 불확실성이 건물 일체형 태양광발전 시스템의 투자규모와 발전규모 결정에 미치는 영향을 분석하였다. Martinez-Cesena et al.[18]은 영국에서의 태양광발전 투자사업에서의 경제성 평가를 위하여 연기옵션을 적용하였으며 화폐의 시간가치, 대출종류, 비용예측이 연기옵션의 결정에 미치는 영향을 분석하였다. Kim and Kim[9] 등은 에너지 판매가격의 불확실성이 국내의 재생에너지 포트폴리오 제도와 연계한 태양광발전 사업의 경제성평가에 미치는 영향을 분석하였으며 또한 재생에너지 포트폴리오 비율과 태양광발전 사업의 확장성과의 연관관계를 보여주었다.

재생에너지 프로젝트의 투자와 관련된 국내외 문헌연구에서 보이듯, 다양한 종류의 실물옵션을 이용한 풍력발전과 태양광발전의 가치평가에 관한 연구는 수행되었다. 하지만 불확실한 요소들의 시간에 따른 변화를 반영한 시스템 다이내믹스 기반의 옵션모델을 이용한 연구는 많이 이루어지지 않은 상태이다. 그러므로 이 연구에서는 이중실물옵션 가격결정모형인 Geske 모델을 기반으로 개발된 시스템 다이내믹스 모델을 이용하여 제주도의 풍력발전과 태양광발전의 가치평가를 수행한다. 개발된 모델을 이용하여 다양한 종류의 신재생에너지 투자프로젝트의 가치평가를 수행할 것으로 기대한다.

3. 연구방법

이 연구에서는 2013년에 수행된 제주도의 제주형저탄소 녹색성장(Carbon Free Island by 2030) 계획의 신재생에너지 분야의 경제적 가치분석을 수행하였다. 신재생에너지 평가과정에서 발생하는 불확실성 요소인 개발투자비용과 신재생에너지 생산량을 반영하기 위하여 이중실물옵션인 Geske 모델에 기반한 시스템 다이내믹스를 이용하여 신재생에너지 개발과 관련된 경제성 가치를 분석한다. 또한, 개발된 평가모델을 이용하여 신재생에너지 발전을 통한 이산화탄소의 절감효과를 분석한다.

3.1 신재생에너지 투자

제주형저탄소 녹색성장 계획분야의 신재생에너지 분야의 경제적 가치를 평가하기 위하여 이 연구에서는 세 가지 종류(육상풍력, 해상풍력, 태양광)의 신재생에너지 투자산업을 고려한다. Bae and Hong[2]은 제주형저탄소 녹색성장의 신재생에너지 산업분야의 경제적 및 환경적 평가를 수행하였다. 하지만 Bae and Hong[2]의 연구는 현금흐름 할인법에 기반한 순현재가치 방법을 사용하여 신재생에너지 산업의 가치를 평가하였으므로 이 연구에서는 이중실물옵션인 Geske 모델을 이용하여 세 종류의 신재생에너지 투자산업의 경제적 가치를 재평가한다.

3.1.1 제주지역 신재생에너지 발전계획

제주도는 제주형 녹색성장 계획에 의하여 2030년까지 탄소 없는 무공해 제주도로 만들기 위하여 전력부문의 화석연료에너지를 신재생에너지인 풍력에너지와 태양광에너지로 대체하려고 한다. 이러한 무공해 제주도를 위하여 육상풍력과 해상풍력 발전 및 태양광 발전 부문에서 본격적인 사업이 진행되고 있다. 구체적으로, 제주도는 <Table 1>에서 보이는 신재생에너지 개발계획을 추진하고 있다.

풍력발전은 바람의 운동에너지에 의하여 이산화탄소 발생 없이 지속적인 발전이 가능하므로 신재생에너지 중 가장 주목받는 에너지원이다. 또한, 풍력발전은 풍향이 풍부한 해안 지역 및 산간 지역에 설치됨으로써 토지이용 효율성이 뛰어난 장점을 가지는 신재생에너지원이다. 풍력발전기 시스템은 기계시스템, 전기 시스템, 제어 시스템으로 구성된다. 한편, 태양광발전은 햇빛의 광전효과에 의하여 전기를 생산하는 태양전지를 사용하는 신재생에너지원이다. 소음과 진동 없이 전기를 발생할 수 있는 장점 때문에 급격한 성장세를 보여주고 있는 에너지원이다. 태양광발전 시스템은 태양전기 셀, 전력변환장치, 축전장치, 시스템 제어기로 구성된다.

<Table 1> The Development Plan of Renewable Energy in Jeju Island (MW) [2]

년도별	육상풍력	해상풍력	태양광
2015	65	150	6
2016	26	100	5
2017	30	100	6
2018	30	300	5
2019	10	120	6
2020	10	100	24
2021	10	100	6
2022	10	100	5
2023	10	100	9
2024	10	100	20
2025	10	100	20
2026	10	100	20
2027	10	100	20
2028	10	100	20
2029	10	100	20
2030	10	200	10

3.1.2 투자 비용

신재생에너지와 관련된 비용은 초기투자비용과 운영기간 동안 발생하는 운영비용으로 구성된다. 풍력발전과 관련된 투자비용은 터빈, 기초공사, 전기시스템, 모니터링, 운송과 설치와 관련된 비용으로 구성되며 태양광 발전과 관련된 투자비용은 태양광 발전모듈, 인버터, 접속함, 직류 간선 케이블, 스트링 케이블, 급전 케이블, 전력 조절기, 지지구조와 관련된 비용으로 구성된다. 해상풍력은 육상

<Table 2> The Investment Cost of Renewable Energy in Jeju Island (\$ B/GW) [2]

년도별	육상풍력	해상풍력	태양광
2015	6,663	56,985	15
2016	2,665	37,990	13
2017	3,075	37,990	15
2018	3,075	113,970	13
2019	1,025	45,588	15
2020	1,025	37,990	60
2021	1,025	37,990	15
2022	1,025	37,990	13
2023	1,025	37,990	23
2024	1,025	37,990	50
2025	1,025	37,990	50
2026	1,025	37,990	50
2027	1,025	37,990	50
2028	1,025	37,990	50
2029	1,025	37,990	50
2030	1,025	37,990	20

풍력에 비하여 품질이 우수하지만 비용이 많이 드는 단점을 가지고 있다. 육상풍력발전에서는 터빈구입비용이 가장 큰 비중을 차지하는 반면 해상풍력발전에서는 균형비용이 가장 큰 비중을 차지한다. 육상풍력, 해상풍력, 태양광 발전과 관련된 연간 초기투자비용은 <Table 2>에서 보인다. 참고로 이 연구에서는 1,053원/달러의 환율을 이용하여 달러기준으로 모든 비용이 계산되었다.

3.1.3 운영 비용

신재생에너지발전과 관련된 운영비용은 운영 및 유지보수비용으로 구성된다. 육상풍력발전, 해상풍력발전, 태양광발전의 균등화발전비용을 비교하면 kWh당 육상풍력은 \$0.102, 해상풍력은 \$0.075, 태양광은 \$0.048로 나타나고 있다. 여기서 균등화발전비용은 발전설비의 건설부터 폐기까지 발생하는 모든 비용을 운영기간 동안 생산할 것으로 예상되는 총발전량으로 나눈 값을 의미한다. 해상풍력발전은 육상풍력발전단지에 비하여서 대규모의 발전단지 구축이 가능하다는 장점을 가지지만 연안에 조성되는 해상풍력발전단지는 연안생태계 훼손 및 어업권 방해의 단점과 먼바다에 조성되는 해상풍력발전단지는 높은 운영비용이 단점으로 지적되고 있다. 제주도 신재생에너지 발전과 관련된 연간 운영비용은 <Table 3>에서 보인다.

<Table 3> The Operating Cost of Renewable Energy in Jeju Island (\$ K/GW) [2]

년도별	육상풍력	해상풍력	태양광
2015	99.05	367.05	258.69
2016	96.96	336.75	243.02
2017	94.87	309.02	228.30
2018	92.88	283.57	214.44
2019	90.88	260.11	201.52
2020	88.89	238.75	189.27
2021	87.08	219.09	177.87
2022	85.19	200.95	165.05
2023	83.38	184.43	156.98
2024	81.58	169.23	147.48
2025	79.87	155.27	138.56
2026	78.16	142.25	130.01
2027	76.45	130.77	122.22
2028	74.83	119.94	114.82
2029	73.22	110.07	107.88
2030	71.70	101.04	101.33

3.1.4 전력판매 수입

본 연구에서는 신재생에너지의 전력판매 수입 산정을 위하여 거래시간별로 적용되는 전력량에 대한 전력시장가격인 계통한계가격을 기준으로 전력 판매 수입을 계산하였

다. 각 에너지원의 연간 생산량은 <Table 4>에서 보인다.

<Table 4> The Expected Production of Renewable Energy in Jeju Island (GWh) [2]

연도별	육상풍력	해상풍력	태양광
2015	133.66	433.62	6.80
2016	191.32	1,011.78	12.52
2017	254.39	1,011.78	19.48
2018	317.46	1,879.02	25.12
2019	317.46	2,804.08	31.96
2020	317.46	2,804.08	59.25
2021	317.46	2,804.08	66.16
2022	317.46	3,382.24	71.70
2023	317.46	3,382.24	82.266
2024	317.46	3,960.04	104.84
2025	317.46	3,960.04	127.56
2026	317.46	4,538.56	150.32
2027	317.46	4,538.56	173.10
2028	317.46	5,116.72	195.91
2029	317.46	5,116.72	218.64
2030	317.46	5,694.88	230.01

3.2 게스케(Geske) 모델

경제적 가치평가모델에서 주로 사용되어 오던 현금흐름할인법의 단점을 보완하기 위해서는 다양한 옵션가격결정모형이 R&D 투자의 경제적 타당성 평가에서 많이 사용되고 있다. 그러므로 이 연구에서는 현금흐름할인법에 기초하여 제주도 신재생에너지 산업분야의 경제적 투자가치를 평가한 연구를 보완하기 위하여 이중실물옵션인 Geske 모델을 사용하여 세 가지의 신재생에너지 분야인 육상풍력, 해상풍력, 태양광 투자산업의 경제적 가치를 분석한다. 다른 옵션가격결정모형도 신재생에너지 경제성 평가에 효과적으로 사용될 수 있지만 시스템 다이내믹스 방법을 이용하여 옵션가격결정모형을 구현하기 위해서는 닫힌 형태의 해를 제공하는 Geske 모델이 적합하다. Geske 모델은 블랙-숄즈 모델을 기반으로 확장한 옵션모델로서 만기 시점까지 변동될 기초자산 가격의 기댓값과 만기 시점에 옵션이 행사될 때의 가격의 차이를 이용한다. 보통 Geske 모델은 기초자산의 가격의 변동성이 클 것으로 예상되거나 움직임의 방향성이 불확실할 때 주로 사용된다.

이중옵션가격결정모형인 Geske 모델이 제주도 신재생에너지 산업정책의 경제적 가치평가에 이용될 때에 옵션평가모델의 옵션가격 (C)는 산업정책의 경제적 가치를 의미하며 옵션행사가격 (S)는 신재생에너지 발전을 통해서 얻는 예상 전력판매 수입으로 가정된다[22]. 본 연구에서 사용된 Geske 모델의 수식들의 입력변수들은 콜옵션가격

(C), 옵션행사가격(S), 이중옵션의 현재가치(K₁), 기초자산의 현재가치(K₂), 잔존만기(T), 변동성(σ), 무위험 이자율(r), 표준정규분포의 이변량(M(d)), 표준정규분포의 누적밀도함수(N(d)) 등으로 구성된다. 또한, 신재생에너지 R&D 투자연구에 사용되었던 주식수익률의 표준편차로는 43.49%, 무위험 이자율로는 2.8%, 운영기간으로는 20년이 각각 사용되었다[7].

$$C = S \cdot M(a_1; b_1; \rho) - K_2 \cdot e^{-r(t_2-t)} \cdot M(a_2; b_2; \rho) - K_1 \cdot e^{-e^{-r(t_1-t)}} \cdot N(a_2)$$

$$a_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{S^*}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)(t_1 - t)}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$a_2 = a_1 - \sigma\sqrt{(t_1 - t)}$$

$$b_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K_2}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)(t_2 - t)}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$b_2 = b_1 - \sigma\sqrt{(t_2 - t)}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{t_1 - t}{t_2 - t}}$$

또한, Geske 모델에서 후속투자 가치가 초기 투자비용과 일치하는 값인 임계값(S*)은 아래의 식을 이용하여 계산된다. 만약, 후속투자 가치가 초기 투자비용보다 큰 경우에는 후속투자가 이루어지지만 후속투자의 가치가 초기 투자비용보다 작을 시에는 후속투자를 실행하지 않는다. 본 연구에서는 초기투자를 초기 투자비용으로 후속투자를 운영비용으로 가정하여 신재생에너지의 경제성 평가를 수행하였다.

$$S^* \cdot N(b_2 + \sigma\sqrt{t}) - K_2 \cdot e^{-rt} \cdot N(b_2) - K_1 = 0$$

3.3 시스템 다이내믹스

본 연구에서는 제주도 신재생에너지 투자산업의 경제적 가치평가를 위하여 이중실물옵션 Geske 모델을 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 구현하였다. 신재생에너지 투자산업의 가치평가과정에서 고려해야 할 불확실요소들이 동태적으로 어떻게 투자산업의 경제적 가치에 영향을 미치는지를 시스템 다이내믹스 모델을 이용하여 분석하였다.

시스템 다이내믹스 기법은 경영분야, 산업분야, 에너지분야 등의 다양한 분야에서 사용되는 시뮬레이션 기법으로서 시스템에 포함된 각 구성요소들의 순환적 인과관계와 요소 간의 관계를 다양한 피드백으로 표현한다. 또한, 시스템 내의 각 구성원들의 순환적 인과관계에 의한 동태

적 현상들이 전체 시스템에 미치는 영향을 분석한다[21].

본 연구에서 개발된 신재생에너지 투자산업의 저장-유량 다이어그램 (Stock and Flow Diagram)은 Appendix에서 참조할 수 있다. 개발된 모델의 인과관계는 다음과 같다. 신재생에너지 판매량의 증가와 신재생에너지 판매단위가격의 증가는 신재생에너지 판매량을 증가한다. 증가한 신재생에너지 판매량은 신재생에너지의 경제적 가치를 증가시키며, 신재생에너지 투자비용과 운영비용의 증가는 신재생에너지의 경제적 가치를 감소시킨다. 또한, 신재생에너지의 증가는 신재생에너지의 판매단위가격과 이산화탄소 발생량을 감소시킨다.

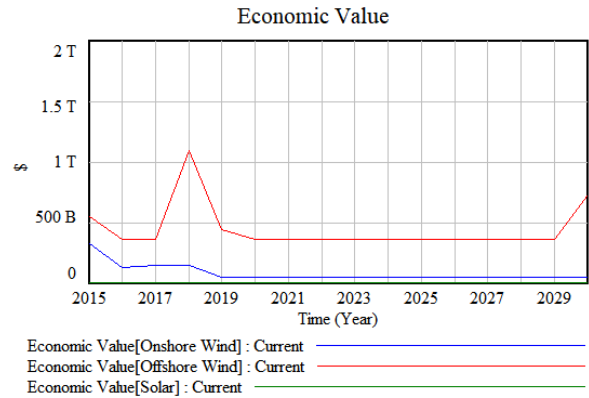
4. 연구결과

본 연구에서는 제주도의 신재생에너지 발전투자의 경제적 가치평가 및 환경적 가치평가를 위하여 이중실물옵션인 Geske 모델을 이용한 가치평가모델을 개발하였다. 또한 민감도분석을 통하여 평가과정에서 고려해야 할 투자비용, 운영비용, 매출액, 신재생에너지 생산량의 불확실성이 경제적 가치와 환경적 가치에 미치는 영향을 알아보았다.

4.1 신재생에너지의 경제적 가치

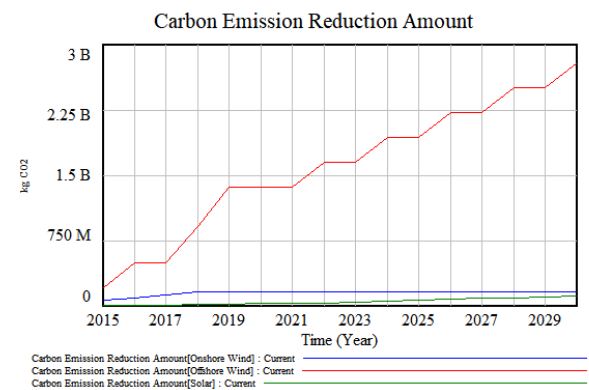
본 연구에서는 2013년에 계획된 제주형 저탄소 녹색성장의 계획에 의하여 2015년부터 2030년까지 건설될 육상풍력발전소, 해상풍력발전소, 풍력발전소의 경제적 가치를 분석하였다. <Table 2>부터 <Table 4>까지 나타난 각 신재생에너지의 투자비용, 운영비용, 매출액을 기준으로 Appendix에서 보이는 Geske 모델에 기반한 시스템 다이내믹스 모델을 사용하여 경제적 가치를 평가하였으며 신재생에너지 발전량을 기준으로 각 신재생에너지의 환경적 가치가 계산되었다. <Figure 1>에 보이듯, 2015년부터 2030년까지의 육상풍력발전단지의 경제적 가치는 연평균 \$83.29 B, 해상풍력발전단지의 경제적 가치는 연평균 \$449.34 B, 태양광발전단지의 경제적 가치는 연평균 \$2.68 B를 가지는 것으로 나타났다. Bae and Hong[2]의 현금흐름할인법에 기반한 순현재가치 방법을 이용하여 세 종류의 신재생에너지 투자산업의 분석한 결과에서는 육상풍력발전단지의 현재가치가 가장 높게 나타났으며 태양광발전단지의 현재가치가 가장 낮은 것으로 나타났다. 하지만 이중실물옵션을 이용한 본 연구에서는 해상풍력발전단지의 경제적 가치가 가장 높았으며, 태양광발전단지의 경제적 가치가 가장 낮음을 보여주었다. 해상풍력발전단지의 경제적 가치가 육상풍력발전단지의 경제적 가치보다 약 4.5

배 더 큰 것으로 나타났다. <Figure 1>에 나타나는 그래프의 추세는 후속투자 가치가 초기 투자비용과 일치하는 임계값의 영향을 받는 것으로 추정된다.



<Figure 1> Economic Values of Each Renewable Energy

또한, 개발된 경제가치평가모델을 이용하여 각 신재생에너지 발전산업의 환경적 가치를 이산화탄소 감소량을 기준으로 예측하였다. 신재생에너지를 생산하므로 감소하는 이산화탄소의 감소량은 0.5246kg CO₂-e/kWh의 전기탄소배출계수를 사용하였다. 각 신재생에너지의 이산화탄소 감소량은 <Figure 2>에 보이고 있다. 제주형 저탄소 녹색성장의 계획에 따라 각 발전투자가 이루어진다면 연평균 육상풍력발전은 143.41 M kg CO₂-e, 해상풍력발전은 1,600.97 M kg CO₂-e, 태양광발전은 47.85 M kg CO₂-e의 이산화탄소 감축효과가 있음을 보여주었다.

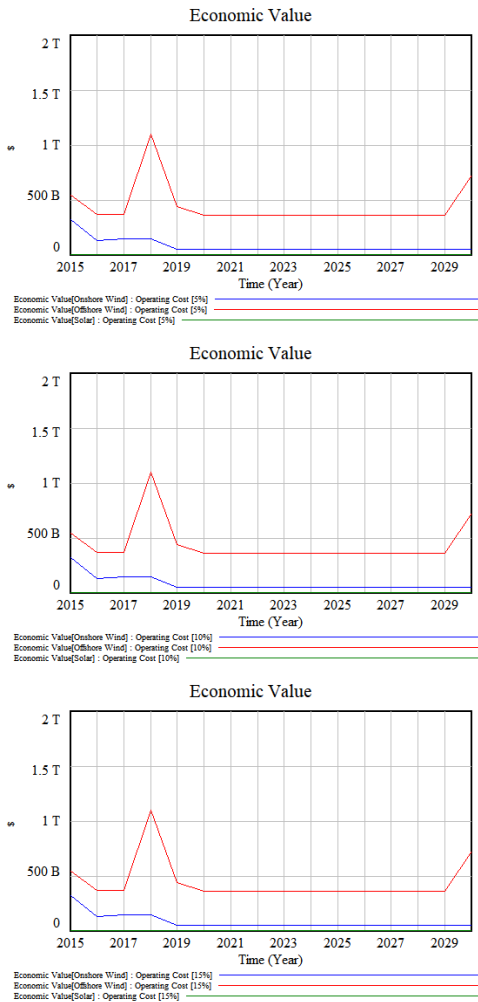


<Figure 2> Carbon Emission Reduction of Each Renewable Energy

4.2 민감도 분석

본 연구에서는 신재생에너지 발전투자의 가치평가과정에서 중요한 불확실요소인 투자비용, 운영비용, 매출액, 신

재생에너지 생산량이 각 신재생에너지의 경제적 가치에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 평가하였다. 또한 신재생에너지 생산량이 이산화탄소 감소량에 미치는 영향을 분석하였다. 각 불확실요소를 5%에서 15%까지 5%씩 증가시켜 이 변화들이 어떻게 경제적 가치와 환경적 가치에 미치는 살펴보았다. 투자비용이 5%에서 15%까지 5%씩 증가할 때, 각 발전투자의 경제적 가치의 변화량을 <Figure 3>에서 보여주고 있다. 육상풍력발전의 경우에는, 투자비용이 5% 증가할 때 경제적 가치는 평균적으로 9.45% 감소하며, 10% 증가할 때 경제적 가치는 평균적으로 18.33% 감소하며, 15% 증가할 때 경제적 가치는 평균적으로 26.64% 감소하는 것으로 나타났다.



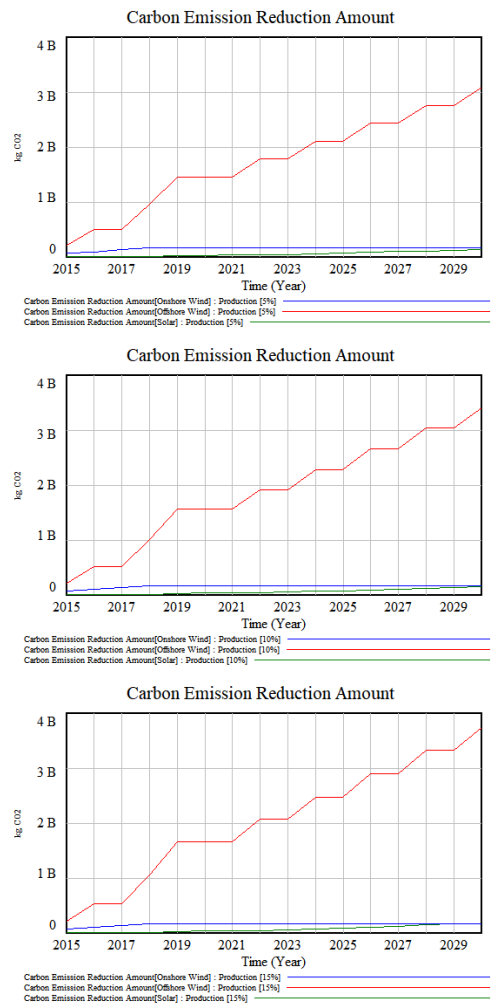
<Figure 3> The Sensitivity Analysis of Operating Costs

다음은 또 다른 주요한 불확실 요소인 운영비용의 변화가 각 신재생에너지 투자의 경제적 가치에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 살펴봤다. 투자비용에 대비하여 금액이 상대적으로 작은 운영비용의 변동성은 각 신재생에

너지 투자산업의 경제적 가치에 작은 영향을 미치는 것을 보여주었다.

투자비용과 운영비용의 변동성이 각 신재생에너지 투자사업의 경제적 가치에 미치는 영향의 민감도 분석결과를 통하여, 투자비용이 운영비용에 비하여 경제적 가치에 더욱 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 운영비용의 민감도 분석 결과처럼, 투자비용의 효과와 비교하면 매출액과 신재생에너지 생산량의 변동성은 각 투자산업의 경제적 가치에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

환경적 측면에서의 신재생에너지의 효과를 알아보기 위하여, 이 연구에서는 각 신재생에너지의 생산량이 5%에서 15%까지 5%씩 증가할 때의 이산화탄소의 감소량을 민감도 분석을 통하여 알아보았다. 태양광발전발전량이 5% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 54.09 M kg CO₂-e 감소하였으며, 10% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 61.07 M kg CO₂-e 감소하였으며, 15% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 68.88 M kg CO₂-e 감소하는 것으로 나타났다.



<Figure 4> The Sensitivity Analysis of Carbon Emission

풍력발전의 경우에는, 육상풍력발전량이 5% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 148.50 M kg CO₂-e 감소하였으며, 10% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 153.68 M kg CO₂-e 감소하였으며, 15% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 159.03 M kg CO₂-e 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 해상풍력발전량이 5% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 1,736.53 M kg CO₂-e 감소하였으며, 10% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 1,881.13 M kg CO₂-e 감소하였으며, 15% 증가할 때 이산화탄소는 평균적으로 2,035.38 M kg CO₂-e 감소하는 것으로 나타났다. 환경적 측면에서의 신재생에너지 투자산업은 해상풍력발전이 가장 큰 환경적 가치를 가지면 태양광발전이 가장 작은 환경적 가치를 가지는 것으로 나타났다.

5. 결 론

화석연료에 의한 환경오염 문제가 전 세계적으로 증가하고 있는 현시점에서 화석연료를 대체할 신재생에너지에 대한 R&D 투자와 신재생에너지 발전단지 건설은 모든 국가전략에서 중요한 부문이 되고 있다. 국내의 경우 재정 및 시간적 제한은 신재생에너지 발전단지 투자에서 경제적 가치평가의 필요성을 더욱 중요하게 만들고 있다. 그러므로, 본 연구에서는 제주형 저탄소 녹색성장의 신재생에너지 발전단지 계획의 경제적 및 환경적 가치평가를 위하여 이중옵션인 Geske 모델에 기반한 시스템 다이내믹스 모형을 개발하였다. 개발된 평가모형을 이용하여 해상풍력발전, 육상풍력발전, 태양광발전에서의 산업투자의 경제적 가치를 평가하는 동시에 민감도분석을 통하여 제주도 신재생에너지 산업투자의 가치평가과정에서 중요하게 고려되는 불확실 요소들인 투자비용, 운영비용, 매출액, 신재생에너지 생산량이 경제적 가치와 환경적 가치에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구의 결과는 투자비용이 각 신재생에너지 투자산업의 경제적가치에 큰 영향을 미치는 것을 보여주었으며, 신재생에너지 생산량이 각 신재생에너지 투자산업의 환경적가치에 큰 영향을 미치는 것을 보여주었다.

Acknowledgement

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

References

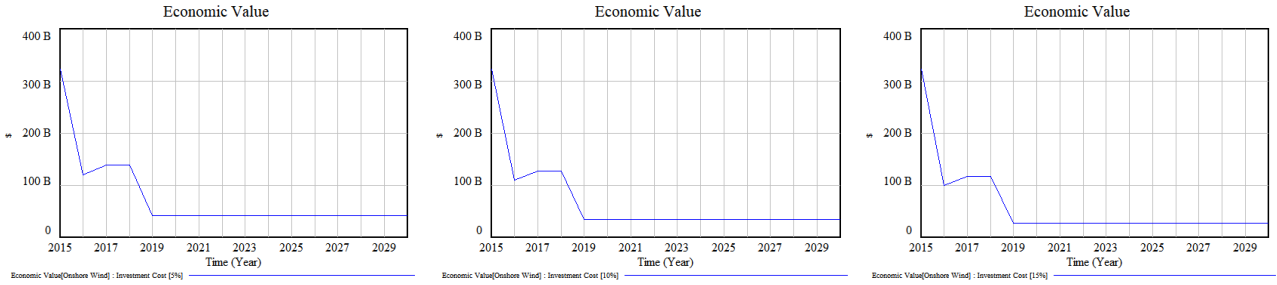
- [1] Abadie L.M. and Chamorro, J.M., Valuation of Wind Energy Projects: A Real Option Approach, *Energies*, 2014, Vol. 7, No. 5, pp. 3218-3255.
- [2] Bae, J. and Hong, S., A Study on the Economic and Environmental Effects of Renewable Energy Policy in Jeju Island, Bank of Korea, 2015.
- [3] Barroso, M.M. and Iniestata J.B., A Valuation of Wind Power Projects in Germany Using Real Regulatory Options, *Energy*, 2014, Vol. 77, pp. 422-433.
- [4] Boomsma, T.K., Meade, N., and Fleten, S., Renewable Energy Investments Under Different Support Schemes: A Real Options Approach, *European Journal of Operational Research*, 2012, Vol. 220, pp. 225-237.
- [5] Bockman, T., Fleten, S.E., Juliussen, E., Langhammer H.J., and Revdal, I., Investment Timing and Optimal Capacity Choice for Small Hydropower Projects, *European Journal of Operations Research*, 2008, Vol. 190, No. 1, pp. 255-267.
- [6] Deter, N. and Kotani, K., Real Options Approach to Renewable Energy Investments in Mongolia, *Energy Policy*, 2013, Vol. 56, pp. 136-150.
- [7] 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.
- [8] Kim, B., Kim, K., and Kim, C., Determining the Optimal Installation Timing of Building Integrated Photovoltaic Systems, *Journal of Cleaner Production*, 2017, Vol. 140, No. 3, pp. 1322-1329.
- [9] Kim, E.M. and Kim, M.S., Evaluating Economic Feasibility of Solar Power Generation Under the RPS System Using the Real Option Pricing Method: Comparison between Regulated and non-regulated Power Providers, *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 2013, Vol. 26, No. 9, pp. 690-700.
- [10] Kim, K., Review of Real Options analysis for Renewable Energy Projects, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 2017, Vol. 18, No. 2, pp. 091-098.
- [11] Kim, K., Lee, D., and Park, S., Evaluation of R&D Investments in Wind Power in Korea using Real Option, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, Vol. 40, pp. 335-347.
- [12] Kim, Y. and Change, B., Real Option Valuation of a Wind Power Project based on the Volatilities of Electricity Generation, *New & Renewable Energy*, 2014, Vol. 10,

- No. 1, pp. 41-49.
- [13] Kjæland, F., A Real Option Analysis of Investments in Hydropower: The Case of Norway, *Energy Policy*, 2007, Vol. 35, pp. 5901-5908.
- [14] Kwak, E. and Moon, C., Analysis of Power System Stability by Deployment of Renewable Energy Resources, *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, 2021, Vol. 16, No. 4, pp. 633-642.
- [15] Lee, S., Using Real Option Analysis for Highly Uncertain Technology Investments: The Case of Wind Energy Technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, Vol. 15, pp. 4443-4450.
- [16] Lee, S. and Shih, L., Renewable Energy Policy Evaluation Using Real Option Model: The Case of Taiwan, *Energy Economics*, 2010, Vol. 32, pp. 567-578.
- [17] Loncar, D. Milovanovic, I., Raki, B., and Radjenovic, T., Compound Real Options Valuation of Renewable Energy Projects: The Case of a Wind Farm in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 75, pp. 354-367.
- [18] Martinez-Cesena, E.A., Azzopardi, B., and Mutale, J., Assessment of Domestic Photovoltaic Systems Based on Real Options Theory, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, Vol. 21, pp. 250-262.
- [19] 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, No. 1, pp. 158-166.
- [20] Reuter, W.H., Szolgayova, J., Fuss, S., and Obersteiner, M., Renewable Energy Investment: Policy and Market Impacts, *Applied Energy*, 2012, Vol. 97, pp. 249-254.
- [21] Schneider, M., Tejada, M., Dondi, G., Herzog, F., Keel, S., and Geering, H., Making Real Options Work for Practitioners: A Generic Model for Valuing R&D Projects, *R&D Management*, 2008, Vol. 38, No. 1, pp. 85-106.
- [22] Sim, J., The Default Risk of the Research Funding with Uncertain Variable in South Korea, Along with the Greeks, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2021, Vol. 44, No. 1, pp. 1-8.
- [23] Ventsanos, K., Angelopoulou, P., and Tsoutsos, T., Renewable Energy Sources Project Appraisal Under Uncertainty: The Case of Wind Energy Exploitation within a Changing Energy Market Environment, *Energy Policy*, 2002, Vol. 30, No. 4, pp. 293-307.
- [24] Zhang, M.M., Zhou, P., and Zhou, D.Q., A Real Options Model for Renewable Energy Investment with Application to Solar Photovoltaic Power Generation in China, *Energy Economics*, 2016, Vol. 59, pp. 213-226.

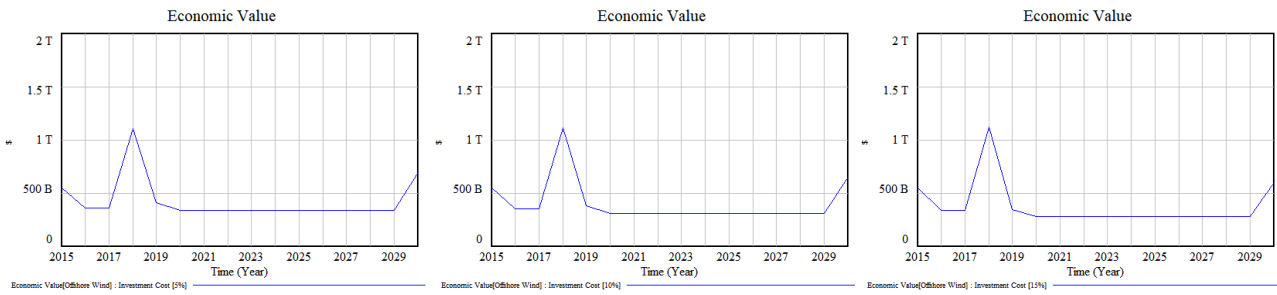
ORCID

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

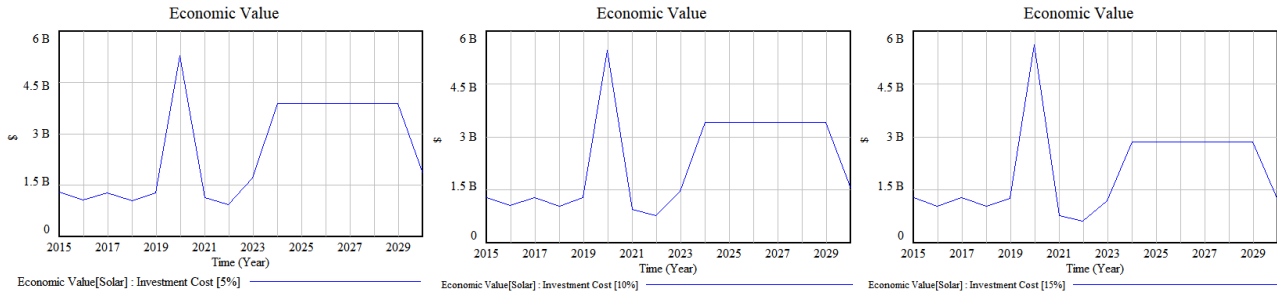
<Appendix 1>



<Figure A1> The Sensitivity Analysis of Investment Costs (Onshore Wind)

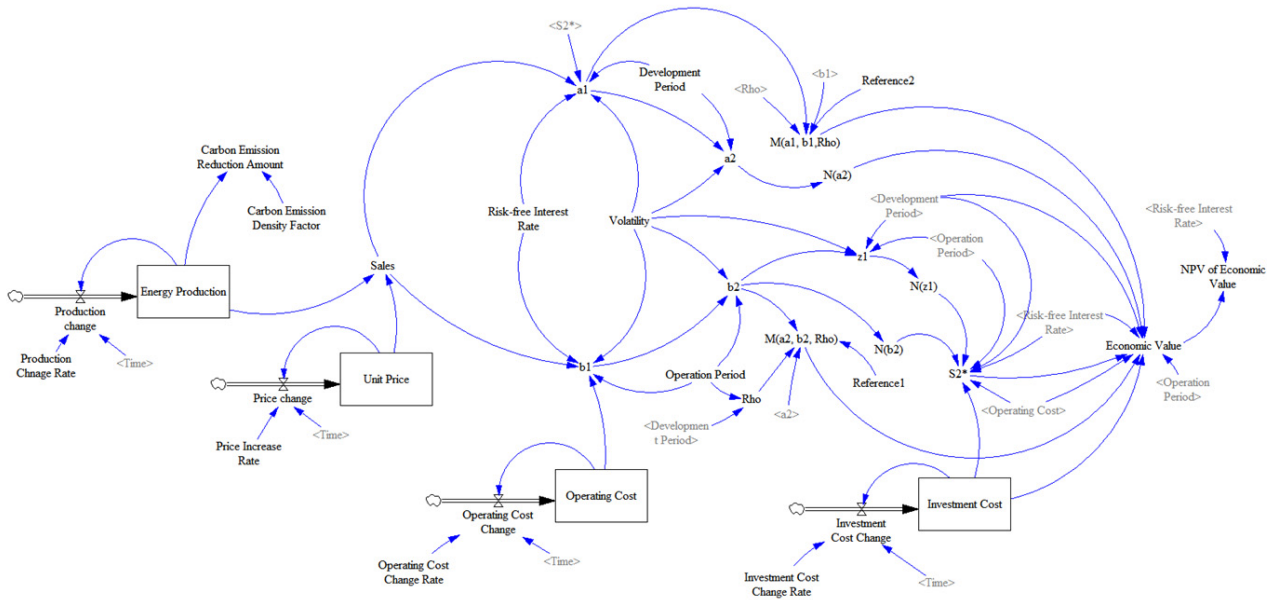


<Figure A2> The Sensitivity Analysis of Investment Costs (Offshore Wind)



<Figure A3> The Sensitivity Analysis of Investment Costs (Solar)

<Appendix 2>



<Figure A4> The Stock-and-flow Diagram of the Developed Economic Evaluation Model