

실물옵션을 이용한 신재생에너지 R&D의 경제적 가치 및 최적 적용시점 평가

김경택 · 이덕주[†] · 박성준

경희대학교 산업경영공학과

Evaluation of the Economic Values and Optimal Deployment Timing of R&D Investment in New and Renewable Energy Using Real Option Approach

Kyung-Taek Kim · Deok Joo Lee · Sung-Joon Park

Dept. of Industrial and Management System Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

In recent years, advanced countries in energy sector are emphasizing the importance of the development and deployment of renewable energy to cope with the global environmental crisis such as depletion of fossil energy, climate convention to control emissions of greenhouse gases. In this paper, we evaluate the economic value of the investment in new and renewable energy R&D in Korea and optimal deployment timing of new and renewable energy by using the real option approach. The real option model adopted in this paper assumes that a decision maker has a compound option to abandon, deployment, or continue the R&D. As a result by using empirical data of Korea, it is found that there exists a considerable amount of positive real option value (ROV) in the investment of new and renewable energy R&D while its net present value (NPV) calculated by traditional discounted cash flow (DCF) model shows negative value.

Keywords: Economic Evaluation, New and Renewable Energy R&D, Real Option

1. 서론

신재생에너지는 화석에너지 자원고갈, 고유가시대의 도래, 지구온난화 및 온실가스 배출 억제를 위한 기후변화협약의 규제 대응 등 국내외 환경변화에 따라 중요성이 재인식 되고 있다. 선진국에서는 신재생에너지 기술을 에너지안보를 확충 하고 기후변화에 대응하는 지속가능한 에너지원으로서 뿐만 아니라 미래성장 산업으로 인식하고 과감한 연구개발(R&D)과 보급정책 등을 추진하고 있다(Ministry of Knowledge Economy *et al.*, 2008).

하지만 국내의 경우 국가 에너지소비의 97%를 해외에 의존함에도 불구하고 에너지문제를 단순히 경제적 문제로 보았으며, 에너지절약보다는 편리성을 추구하는 등 선진국보다 미흡한

문제의식을 가지고 있었다. 최근 한국에서도 신재생에너지의 중요성을 인식하여 반도체, 기계 등 관련분야의 경쟁력을 보유한 한국의 강점을 살려 태양광, 풍력, 수소 및 연료전지를 3대 핵심 분야로 선정하고 집중투자 하고 있으며, R&D 투자액을 지속적으로 늘리고 있는 추세이다(Korea Energy Management Corporation New and Renewable Energy Center, 2007; Ministry of Knowledge Economy *et al.*, 2008)

3대 핵심 분야를 살펴보면 풍력의 경우 에너지원이 고갈되지 않는 재생 가능한 무공해 에너지원이고, 오랜 기술력 축적으로 인해 경제성 및 기술의 성숙도가 가장 뛰어난 것으로 분석되고 있으며, 공해물질 저감에 대하여 비용대비 효과가 높은 에너지원이다. 태양광은 발전 규모를 주택용에서부터 대규모 발전용 까지

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2009-0076567).

[†] 연락저자 : 이덕주 교수, 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1 경희대학교 산업경영공학과, Tel : 031-201-2911, E-mail : ldj@khu.ac.kr
2011년 11월 4일 접수; 2012년 2월 9일 수정본 접수; 2012년 4월 20일 게재 확정.

다양하게 할 수 있으며, 정부에서 활발한 보급정책을 수립하여 추진하고 있다. 연료전지는 수소와 산소의 화학반응으로 생기는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 장치로 일반 배터리와는 다르게 재충전이 필요 없이 연료가 공급되는 한 지속적으로 에너지를 만들 수 있다. 또한 수소 연료전지의 경우 생성물이 전기, 물, 열이므로 공해물질이 배출되지 않는 무공해 에너지원이다.

신재생에너지 R&D 투자에 대한 정확한 의사결정을 위해서는 신재생에너지 R&D에 대한 정확한 경제적 평가가 필요하다. 그런데 많은 연구에서 신재생에너지 R&D의 경제적 효과를 평가하기 위해 일반적으로 사용되어온 전통적인 평가도구인 현금할인기법(DCF : Discounted Cash Flow)이 신재생에너지 R&D의 가치를 저평가하는 경향이 있는 점을 지적하고 있다 (Dixit and Pindyck, 1994; Trigeorgis, 1996; Davis and Owens, 2003; Siddiqui et al., 2007). 신재생에너지 R&D의 가치가 저평가되는 이유는 현금할인기법으로는 신재생에너지 R&D 투자가 가지고 있는 의사결정의 유연성을 평가모형에 제대로 반영하지 못하기 때문이며, 이러한 부정확한 평가 결과는 신재생에너지 분야의 투자확대에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 의사결정의 유연성에 대한 가치를 반영할 수 있는 새로운 경제성 평가 기법이 필요하며 이를 위해 최근에는 실물옵션 방법론을 신재생에너지 R&D의 경제적 가치 평가에 활용하는 시도가 이루어지고 있다.

국내의 경우 윤원철(2001)은 국내의 에너지 산업의 구조 개편, 자유화 등의 불확실성이 증가하는 추세에 주목하고, 에너지 분야의 실물옵션 적용가능성과 타당성에 대해서 논의 하면서 실물옵션을 활용하여 가상의 열병합발전의 건설 및 운영 관련 투자산업에 대한 실증분석을 수행하였다. 따라서 신재생에너지를 분석대상으로 삼지는 않고 있다. 실제로 신재생 에너지에 대한 R&D는 불확실성이 높을 뿐만 아니라 R&D를 연기, 포기, 또는 확장하는 등 여러 가지 의사결정 옵션을 가지고 있다. 의사결정자는 이러한 여러 가지 옵션들을 고려하여 신재생 에너지 R&D에 대한 가치를 평가하여야 하며, R&D를 통해 개발된 기술의 적용시점을 결정하는 것이 중요한 문제이다.

국의 문헌의 경우, Davis and Owens(2003)는 연속변수 실물 옵션 방법론을 이용하여 재생에너지 R&D의 최적 투자수준을 분석하였다. 한편 Siddiqui et al.(2007)는 실물옵션의 이항모형 방법론을 이용하여 R&D를 통해 개발된 기술의 최적 적용시점을 결정하는 모형을 제시하였다. 특히 Siddiqui et al.(2007)는 재생 에너지 R&D의 가치를 평가하기 위해 연구개발의 포기, 개발된 기술의 적용, 연구개발의 지속이라는 세 가지 옵션을 가진다고 가정하였으며, 재생에너지의 연구개발 및 시장도입 프로젝트의 경제적 가치 평가문제를 Brennan and Schwartz(1985)의 구리광산 문제와 연결시켜 의사결정 옵션의 격자를 유사화시키고, 이를 이항옵션가격결정 모형으로 실증 분석하였다. 또한 실물옵션을 통해 분석한 결과를 Davis and Owens(2003)의 연구결과와 비교 하였다.

본 연구에서는 DCF 모형과 Siddiqui et al.(2007)의 연구를 기초로 한 실물옵션 모형을 이용하여 국내 신재생에너지 R&D의 경제적 가치와 개발된 기술의 최적 적용시점을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 국내의 신재생에너지 R&D와 관련된 데이터를 이용하여 Siddiqui et al.(2007)의 모형을 기초로 한 실물옵션 모형을 이용하여 분석을 수행하였으며, 실물옵션 분석결과와 DCF를 통해 도출한 결과를 비교분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 한국 신재생에너지 정책 및 현황에 대해 살펴보고, 제3장에서는 신재생에너지 R&D의 경제적 가치를 분석하기 위한 DCF 모형과 실물옵션 모형을 소개한다. 제4장에서는 분석에 사용되는 자료를 간략히 설명하고, DCF 모형과 실물옵션 모형을 이용한 분석결과를 도출하여 정책적 의미를 살펴보았다. 마지막으로 제5장에서 결론을 맺는다.

2. 한국 신재생에너지 정책 및 현황

한국은 신재생에너지의 체계적인 육성을 위해 「신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」을 10년 이상의 기간단위로 수립하고 있다. 제1차 기본계획(1997~2006)은 신재생에너지 기술개발 위주로 수립되었으며, 2003년 수립된 「제2차 신재생 에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2003~2012)」은 기술 개발과 보급을 포함한 계획이었다. 그러나 지나치게 보급에 비중을 둔 2차 신재생에너지 기본계획을 수정·보완하고, 중장기적인 비전을 제시하며 신성장 동력으로서의 신재생에너지 산업을 육성하겠다는 계획하에 「제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2009~2030)」을 2008년 수립하였다(Ministry of Knowledge Economy, 2008).

「제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」은 ‘신재생에너지에 기반한 지속가능 에너지 시스템 구현’이라는 목표 아래 양적 목표로서 2030년까지 신재생에너지 보급률 11% 달성과 신재생에너지 녹색성장 동력 산업화를 이루는 것을 목표로 하고 있으며, 총 전력생산 중 신재생에너지 발전량 목표는 2030년까지 7.7%로 설정하였다(Ministry of Knowledge Economy et al., 2008).

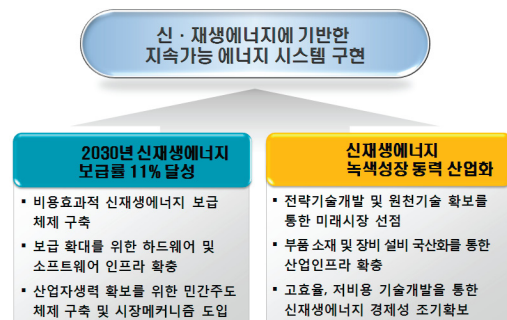


Figure 1. The policy objectives and implementation strategies of the third basic plan for technology development, utilization and deployment of renewable energy

한편 정부는 신재생에너지 분야의 선진기술을 따라잡고 기술 상용화 촉진을 위해서는 지속적인 R&D 투자 증대가 필요하다는 판단 아래 에너지 및 자원사업 특별회계를 통해 신재생에너지 기술개발사업 규모를 증대시켜왔다. 연도별 신재생에너지 연구개발비 투자실적을 살펴보면 <Table 1>과 같다(Ministry of Knowledge Economy, 2008).

Table 1. Annual R&D investment of new and renewable energy ('88~'07)

년도	과제수	사업비(백만 원)		
		정부	민간	계
'88~'00	367	101,855	72,370	174,225
2001	54	24,212	11,718	35,930
2002	50	25,853	13,906	39,759
2003	69	32,963	18,015	50,978
2004	116	58,788	31,668	90,456
2005	44	79,370	42,499	121,869
2006	65	115,788	76,912	192,700
2007	55	120,900	91,041	211,941
계	820	559,729	358,129	917,858

1988년부터 2007년까지 신재생에너지 연구개발비 지원현황을 살펴보면 총 투자액은 9,178억 원이다. 이중 정부지원액이 5,597억 원, 민간부담금이 3,581억 원으로 각각 61%, 39%를 차지하고 있다. <Table 1>을 살펴보면, 2001년 이후 연구개발비 투자실적이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다. 분야별 신재생에너지 연구개발비 투자실적을 살펴보면 <Table 2>와 같다(Ministry of Knowledge Economy, 2008).

Table 2. R&D investment of new and renewable energy with respect to energy sources('88~'07)

구 분	과제수	사업비(백만 원)		
		정부	민간	계
수소	35	37,500	24,159	61,659
연료전지	68	138,519	129,400	267,919
태양광	112	88,091	47,593	135,683
풍력	45	70,051	31,460	101,511
태양열	80	23,924	8,817	32,741
바이오	115	43,390	21,691	65,081
폐기물	68	36,633	26,742	63,375
석탄이용	49	52,225	50,851	103,076
지열	29	14,908	5,707	20,615
소수력	12	4,757	2,745	7,502
해양	9	6,454	2,456	8,910
기타	198	43,277	6,508	49,785
합계	820	559,729	358,129	917,858

총 투자액 중 3대 중점분야인 수소·연료전지, 태양광, 풍력 분야의 투자액은 5,667억 원이며, 이는 11개 에너지원 전체 지원금 중의 59.6%에 해당한다. 한국 정부는 산업화 잠재력 및 기술 중요성이 큰 수소·연료전지, 태양광, 풍력 등 3대 분야에 대하여 기술개발 역량을 집중시켜 이 분야의 산업화를 위한 정부 계획을 추진 중이다(Ministry of Knowledge Economy, 2008).

본 논문에서는 한국의 신재생에너지 3대 핵심 분야 중 자료 확보의 용이성을 고려하여 태양광에너지와 풍력에너지만을 분석대상으로 한정하고, 이 두 가지 신재생에너지의 R&D 투자에 대한 경제적 가치를 평가하고자 한다.

본 연구의 분석 대상 중 우선 국내 풍력발전 현황에 대해 살펴보면, 한국은 1970년대부터 풍력발전 시제품이 제작되어 시운전 되었으나 주변 여건의 미성숙으로 인해 지속적인 기술 개발 없이 외국사의 시스템을 모방 제작하는 수준에 머물렀다. 1988년 「대체에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」이 수립됨으로써 풍력발전에 대한 본격적인 연구개발이 시작 되었으며 2007년까지 기술개발투자비로 1,015억 원이 지원 되었다. 지난 10여 년간의 노력으로 국내의 풍력발전시스템의 보급 여건 조성은 상당히 진전되었다고 할 수 있으나 아직은 대부분의 풍력발전 시스템을 수입하여 풍력발전 단지를 건설 하고 있는 실정이다.

한국의 풍력 보급현황을 살펴보면, 1997년 정부의 시범사업으로 조성된 제주도 행원(시설용량 9,795kW)을 시작으로 전북, 태백시 등 여러 지자체에서 풍력발전 단지를 설치운영중이며, 2010년 1월 1일 기준 208기의 풍력발전기가 설치되어있으며, 총 설비용량은 약 346MW이다. 이는 선진국의 2009년 기준 누적 풍력 설비용량인 미국 35.1GW, 독일 25.8GW, 스페인 19.1GW, 중국 25.1GW과 비교했을 때 아직 초기 단계임을 알 수 있다(AWEA, 2010; EWEA, 2010).

국내 태양광발전 현황에 대해 살펴보면, 최근 국내외 태양광 시장의 확대와 태양광 기술 개발 및 보급에 대한 정부의 적극적인 지지에 힘입어 전반적으로 국내 관련 산업이 활성화되고 있다. 정부의 주택보급사업, 발전차액 지원제도, 공공건물 의무화 제도 등의 정책으로 태양광에너지 시장이 활성화되고 있으며 특히 발전차액 지원제도에 따라 대규모 발전소가 건설 되는 추세가 빠르게 확산되고 있다. 2010년 1월 1일 기준 1,676기의 태양광 발전기가 설치되어 있으며, 총 설비용량은 415MW이다. 그러나 역시 태양광 발전도 선진국의 2009년 기준 누적 태양광 설비용량인 미국 2,108MW, 독일 9,677MW, 스페인 3,595MW, 일본 2,628MW와 비교했을 때 아직 초기 단계임을 알 수 있다(SEIA, 2010). 따라서 신재생에너지 분야를 미래의 신산업으로 육성하기 위해서는 적극적으로 신재생에너지 R&D에 투자하여 신재생에너지를 보급하여야 하며, 이를 위해서는 적극적인 투자 이전에 신재생에너지 R&D의 경제적 효과에 대한 정당한 평가가 선행되어야 할 것이다.

3. 모형

3.1 DCF(Discounted Cash Flow) 모형

신재생에너지 R&D의 경제적 가치를 평가함에 있어 가장 일반적으로 활용되고 있는 방법이 현금흐름할인 모형(DCF)이다. 현금흐름할인 모형은 예측되는 미래의 현금흐름을 적정한 할인율을 활용하여 순현재가치(NPV : Net Present Value)로 환산함으로써 투자의 경제적 가치를 평가하는 방법으로 고전적으로 경제성 평가에 가장 일반적으로 활용되고 있다.

현금흐름할인 모형에서 신재생에너지 기술의 NPV를 구하기 위해서는 우선 신재생에너지 기술에 의해 창출되는 미래의 현금 흐름을 예측해야 한다. 신재생에너지의 경제적 가치를 평가하기 위한 현금흐름할인 모형은 식 (1)과 같다.

식 (1)을 살펴보면, 미래에 예측되는 연도별 현금흐름은 연도별 수익에서 비용을 차감하는 형태로 구성되어 있다. 이때 수익은 화석에너지를 대신하여 신재생에너지를 사용할 경우에 발생하는 단위 비용절감액에 신재생에너지 발전량을 곱한 값이며, 비용은 연도별 신재생에너지의 R&D 비용으로 산정하였다. 순현재가치 NPV는 예측된 연도별 현금흐름을 현재 가치로 할인 후 합산하여 NPV를 도출한다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \delta^t [(P_{NRE}(t) - P_{RE}(t)) \times RE(t) - C(t)] \quad (1)$$

여기에서,

- NPV : 투자안의 순현재가치
- $P_{NRE}(t)$: t 시점의 화석에너지 발전단가
- $P_{RE}(t)$: t 시점의 신재생에너지 발전단가
- $C(t)$: t 시점의 신재생에너지 R&D 비용
- $RE(t)$: t 시점의 신재생에너지 발전량
- γ : 할인율
- $\delta = \frac{1}{1+\gamma}$

3.2 실물옵션 모형(Real Option Model)

본 논문에서 사용하는 실물옵션 모형은 Siddiqui et al.(2007)의 모형을 기초로 다음과 같이 구성되어진다. 우선 신재생에너지 R&D 프로젝트는 연구개발의 지속, 연구개발 결과의 적용, 그리고 연구개발의 포기라는 세 가지 옵션을 가지고 있다고 가정한다. 그리고 연구개발 결과를 적용하거나 포기하는 경우 다시는 R&D를 재개발 수 없는 것으로 가정한다. 한편 문제의 단순화를 위하여 기술적 위험, 즉 R&D를 수행할 경우 기술 개발이 실패하는 상황은 존재하지 않는다고 가정한다. 따라서 R&D를 수행하면 신재생에너지의 발전단가는 떨어지게 된다.

화석에너지 발전단가는 기하 브라운이안 모션(GBM : Geo-

metric Brownian Motion)을 따른다고 가정하며, t시점의 화석에너지 발전단가를 나타내는 $P_{NRE}(t, i)$ 는 t기간 동안에 발전단가가 i번 증가한 경우를 의미한다. 초기 화석에너지 발전단가는 $P_{NRE}(0, 0)$ 이며, 다음 기간부터는 확률적으로 두 값을 가진다. 즉, p의 확률로 화석에너지 발전단가가 상승하는 경우 u를 곱하여 $P_{NRE}(1, 1) = uP_{NRE}(0, 0)$ 이 되며, (1-p)의 확률로 화석에너지 발전단가가 하락하는 경우 d를 곱해 $P_{NRE}(1, 0) = dP_{NRE}(0, 0)$ 이 된다. α 를 무위험이자율, σ 을 과거 화석에너지 발전단가의 변동성이라고 하면 $u = e^\sigma$, $d = \frac{1}{u} = e^{-\sigma}$, $p = \frac{e^{\alpha} - d}{u - d}$ 이다.

화석에너지 발전단가와 신재생에너지 R&D의 세 가지 옵션에 대한 의사결정나무를 도식화하면 <Figure 2>와 같다.

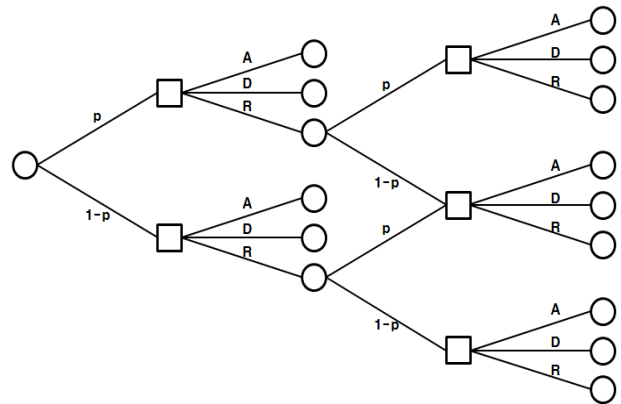


Figure 2. Decision tree

<Figure 2>에서 A는 연구의 포기(Abandon), D는 개발된 기술의 적용(Deployment), R은 연구의 지속(Research)을 의미한다. <Figure 2>를 살펴보면, 초기 화석에너지 가격이 확률적으로 상승하거나 하락한 후 의사결정자는 연구개발의 포기, 개발된 기술의 적용, 연구개발의 지속이라는 세 가지 옵션 중 하나를 선택하게 된다. 만약 연구개발을 포기하거나 개발된 기술을 적용하게 되면 종료가 되며, 연구개발을 지속할 경우에는 다음 년도의 화석에너지 가격이 확률적으로 상승하거나 하락한 후 다시 세 가지 옵션 중 하나를 선택하게 되는 형태로 이루어져 있다.

본 논문에서는 이항모형을 이용하여 위험중립 확률공간에서 화석에너지 발전단가의 불확실성을 반영하고 있다. 완비 시장인 경우 기초자산이 시장에 존재하여 효율적으로 거래가 이루어진다. 하지만 기초자산이 존재하지 않거나 원활히 거래되지 않는다면, 이에 대한 보완이 필요하다. 본 논문에서는 화석에너지 발전단가를 산출하기 위해서 화석에너지 발전단가가 주원료의 가격 변화와 perfect correlated되어있다고 가정한다. 즉, 화석원료의 가격 변화를 통하여 화석에너지 발전단가의 불확실성을 반영하였다.

신재생에너지 R&D에 대한 세 가지 옵션의 가치는 식 (2)와

같다. 신재생에너지 R&D를 통해 개발된 기술이 과거에 적용되지 않는 경우 t 시점에서는 연구개발의 포기, 연구결과의 적용, 연구개발의 지속이라는 세 가지 옵션을 가지고 있으므로, 아래의 형태로 최종 옵션가치가 나타나게 된다. 이 때 $V(t, i, r)$ 은 t 시점에 화석에너지 가격이 i 번 상승하고, R&D를 r 번 수행한 경우의 최종 옵션가치이다. 식 (2)에서 β 는 $\beta=1/(1+\alpha)$ 로써 현금흐름을 무위험이자율로 할인하는 할인인자이다.

$$V(t, i, r) = \max(\Pi_A, \Pi_D, \Pi_R) \quad (2)$$

여기에서,

$$\Pi_A = -A$$

$$\Pi_D = \Pi(t, i, r, t) - D$$

$$\Pi_R = -C(t) + \beta(pV(t+1, i+1, r+1) + (1-p)V(t+1, i, r+1))$$

윗 식(2)에서 첫 번째 항인 Π_A 는 연구개발을 포기할 때의 비용을 나타내는 항으로서 A 는 해당년도의 신재생에너지 R&D 투자비용을 적용하였다. 두 번째 항인 Π_D 는 R&D를 통해 개발된 기술을 적용하였을 때의 수익을 나타내는 항으로서, $\Pi(t, i, r, t)$ 는 t 시점에 R&D를 통해 개발된 기술을 적용하였을 때 발생하는 수익을 나타내며, D 는 기술을 적용하는데 소요 되는 제반 비용을 의미한다. 본 연구에서는 적용비용을 0으로 가정하였다. 신재생에너지 R&D에 의해 개발된 기술을 적용할 경우 발생하는 기대이익은 화석에너지 보다 저렴한 비용으로 신재생에너지를 사용할 수 있게 됨으로써 소비자가 얻는 비용 절감(cost savings)의 형태로 나타나므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi(t, i, r, j) = \{P_{NRE}(t, i) - P_{RE}(t, r)\} \times RE(j, t) + \beta p \Pi(t+1, i+1, r, j) \quad (3)$$

식 (3)에서 $\Pi(t, i, r, j)$ 는 t 시점까지 화석에너지 발전단가가 i 번 상승, R&D를 r 번 수행, 개발된 기술을 j 시점에 적용하였을 때 t 시점의 비용절감수익을 나타낸다. $\{P_{NRE}(t, i) - P_{RE}(t, r)\} \times RE(j, t)$ 은 현재시점의 비용절감수익을 나타내며, 나머지 부분은 미래의 비용절감수익을 나타낸다. $P_{NRE}(t, i)$ 는 t 시점까지 화석에너지 발전단가가 i 번 상승하였을 때 t 시점의 화석에너지 발전단가를 의미하며, $P_{RE}(t, r)$ 는 t 시점까지 신재생에너지 R&D를 r 번 수행하였을 때 t 시점의 신재생에너지의 발전단가를 의미한다. $RE(j, t)$ 는 j 시점에 신재생에너지 기술이 적용되었을 때 t 시점의 신재생에너지 발전량을 나타낸다. 따라서 현재시점의 비용절감수익은 화석에너지 발전단가와 신재생에너지 발전단가의 차액에 신재생에너지 발전량을 곱하여 구할 수 있다.

t 시점 이후에 발생하는 비용절감액은 $t+1$ 시점에 p 의 확률로 화석에너지 발전단가가 상승하였을 때 발생하는 비용 절감액과 $(1-p)$ 의 확률로 화석에너지 발전단가가 하락하였을 때 발생하는 비용절감액의 합을 할인하여 $\beta\{p\Pi(t+1, i+1, r, j) + (1-p)\Pi(t+1, i, r, j)\}$ 로 표현할 수 있다.

마지막 항인 Π_R 은 R&D를 지속함으로써 얻는 수익을 나타내는 항이다. 따라서 t 시점에 소요되는 R&D 비용과 R&D를 수행함으로써 미래에 발생하는 수익의 현가를 더해줌으로써 계산할 수 있다. t 시점에는 R&D에 대한 투자비용이 발생함으로 $-C(t)$ 의 현금흐름이 발생한다. t 시점 이후에 R&D를 수행함으로써 미래에 발생하는 수익은 $t+1$ 시점에 p 의 확률로 화석에너지 발전단가가 상승하였을 때 발생하는 수익과 $(1-p)$ 의 확률로 화석에너지 발전단가가 하락하였을 때 발생하는 수익의

Table 3. Input variables for real option analysis

변수	설명	단위	High	Low
$P_{RE}(0, 0)$	신재생에너지 초기발전단가	원/KWh	271.58	271.58
$P_{RE}(t, 0)$	t 시점의 신재생에너지 발전단가(R&D 미수행)	원/KWh	271.58	271.58
$P_{RE}(t, t)$	t 시점의 신재생에너지 발전단가(R&D 수행)	원/KWh	Fig.4	Fig.4
$P_{NRE}(0, 0)$	화석에너지 초기발전단가	원/KWh	66.09	66.09
N	분석기간	년	21	21
α	무위험이자율(2009년 기준 양도성예금증서 91일물의 연 수익률)	%	2.63	2.63
β	할인인자($\beta=1/(1+\alpha)$)		0.97	0.97
σ	변동성	%	32.65	10.01
p	화석에너지 가격이 상승할 확률		0.46	0.62
$C(t)$	t 시점의 신재생에너지 R&D 비용	억 원	Fig.5	Fig.5
A	포기비용	억 원	Fig.5	Fig.5
D	개발된 신재생에너지 기술 적용비용	원	0	0
$RE(j, t)$	j 시점에 적용된 신재생에너지의 t 시점 발전량	GWh	Fig.6	Fig.6

합을 할인하여 계산할 수 있으므로 $\beta\{pV(t+1, i+1, r+1) + (1-p)V(t+1, i, r+1)\}$ 로 표현할 수 있다.

따라서 식 (2)에 의하면 신재생에너지 R&D가 진행되는 동안 선택 가능한 세 가지 옵션의 현금흐름을 반복적으로 비교하여 최대값을 선택한다. Backward induction을 통해 구한 옵션의 최후가치는 식 (4)와 같다.

$$V(0, 0, 0) = \max \left\{ \begin{array}{l} -A; \\ (P_{NRE}(0, 0) - P_{RE}(0, 0))RE(0, 0) - D \\ + \beta(pII(1, 1, 0, 0) + (1-p)II(1, 0, 0, 0)); \\ -C(0) + \beta(pV(1, 1, 1) + (1-p)V(1, 0, 1)); \end{array} \right. \quad (4)$$

4. 분석

4.1 자료의 구성

실물옵션 분석에 사용된 입력변수를 정리하면 <Table 3>과 같으며 자세한 내용을 살펴보면 다음과 같다. 본 연구의 분석 기간은 2009년부터 2030년까지 21년이며, 무위험 이자율은 통계청의 국가통계포털에서 조사한 2009년 기준 양도성예금증서(CD) 91일물의 연 수익률 2.63%를 적용하였다. 무위험 이자율로 양도성예금증서(CD) 91일물의 연 수익률을 사용한 이유는 증권거래소에서 산정하는 선물이론 가격에서 사용하는 무위험이자율이 CD 91일물의 연 수익률이기 때문이며, 한국에서 현행 유통되는 만기 1년 미만의 단기채권 중에서 비교적 유동성이 풍부하기 때문이다. 화석에너지의 발전단가는 전력거래소의 통계치를 활용하였으며 <Table 4>와 같다(Korea Power Exchange EPSIS).

Table 4. Cost of fossil energy generation in 2009

에너지원	발전량 (GWh)	비중(A) (%)	발전정산단가(B) (원/KWh)	가중합 (C = A×B) (원/KWh)
일반수력	2,550	0.63%	110.53	0.70
양수	2,814	0.70%	149.70	1.05
무연탄	7,298	1.81%	109.10	1.98
유연탄	178,839	44.37%	60.23	26.72
유류	12,869	3.19%	147.24	4.70
LNG	57,555	14.28%	129.51	18.49
원자력	141,123	35.01%	35.56	12.45
합계	403,048	100.00%		66.09

화석에너지 발전단가는 전체 에너지원 중 신재생에너지를 제외한 에너지원 별 비중을 발전정산단가를 곱하여 합산하였으며 2009년 기준 66.09원/KWh이다.

한편 2009년 기준 태양광 에너지 평균정산단가는 <Table 5>와 같다. 2009년 기준 태양광 에너지의 발전단가는 2009년에 설치된 태양광 발전설비 중 50% 이상이 '30kW 초과 200kW 이하'인 설비이므로 대표치로 태양광 에너지 평균정산단가 중 591.63원을 태양광 에너지의 발전단가로 가정하였다. 2009년 이후 태양광 에너지의 발전단가의 추이를 살펴보기 위해 '30kW 초과 200kW 이하'인 태양광 발전설비의 발전단가를 살펴보면, 적용기간 15년을 기준으로 태양광 발전정산단가는 677.38원에서 620.41원으로 감소하였으므로 8.4% 감소하였다. 따라서 본 연구에서는 R&D를 통하여 태양광 발전단가가 연 8.4% 감소한다고 가정하였다.

Table 5. Cost of photovoltaic energy generation in 2009

적용시점	~2008. 09. 30	2008. 10. 1~2009. 12. 31			
적용기간	15년	15년	20년	평균	
30kW 이하	711.25	649.96	589.64	618.30	
30kW 초과 200kW 이하		620.41	562.84	591.63	
200kW 초과 1MW 이하		677.38	590.87	536.04	563.46
1MW 초과 3MW 이하			561.33	509.24	535.29
3MW 초과			472.70	428.83	450.77

2009년 기준 풍력에너지의 발전단가는 지식경제부에서 발표한 바와 같이 풍력발전 기준가격인 고정요금 105.14원/KWh을 적용하였다. 2009년 이후 풍력에너지 발전단가의 추이는 풍력 에너지 발전정산단가가 매년 2%씩 감소하므로, R&D를 통하여 풍력에너지 발전단가가 연 2%씩 감소한다고 가정 하였다 (Ministry of Knowledge Economy, 2008).

신재생에너지 발전량은 지식경제부의 '제3차 신재생에너지 기본계획'에서 발표한 장기 전망치를 이용하여 piecewise linear interpolation method를 통해서 산출하였으며, <Figure 3>과 같다.

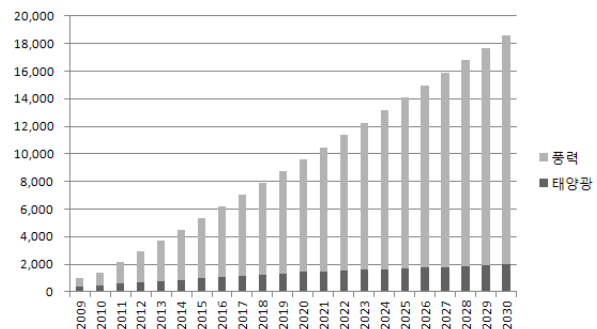


Figure 3. Future annual target of renewable energy generated electricity (Unit : GWh)

태양광에너지와 풍력에너지의 발전단가 및 발전량을 고려한 신재생에너지 발전단가와 화석에너지 발전단가를 도식화 하면 <Figure 4>와 같다. <Figure 4>의 화석에너지 발전단가 예측치는 현금흐름할인 모형의 분석에 사용된다. 전력통계정보 시스템의 2001년부터 2009년까지 화석에너지 발전단가를 분석한 결과 화석에너지 발전단가의 연평균 증가율은 4.1%였으며, 본 분석에서는 이를 활용하여 2009년부터 2030년까지 화석에너지 발전단가는 연평균 4.1%씩 증가하는 것으로 예측하였다(Korea Power Exchange EPSIS).

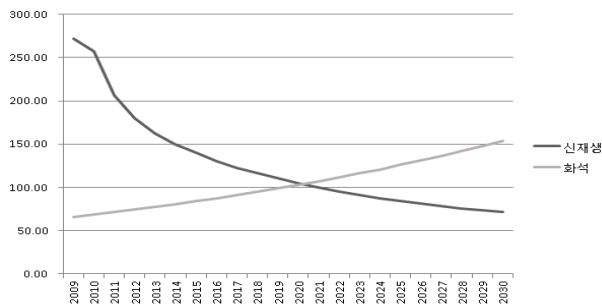


Figure 4. Forecasting of fossil/renewable energy generation cost (Unit: KRW/KWh)

에너지관리공단 신재생에너지센터의 『신·재생에너지 R&D 전략 2030』에 따르면 연도별 신재생에너지 R&D 투자비용은 <Figure 5>와 같다. 신재생에너지 R&D 투자비용은 2009년 872억 원이며, 2012년 최대 1,269억 원까지 증가하나 이후 증감을 반복하면서 점점 감소하는 경향을 보인다(Korea Energy Management Corporation New & Renewable Energy Center, 2007).

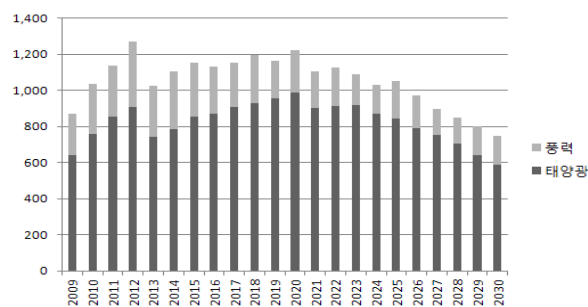


Figure 5. Future annual R&D investment of renewable energy (Unit: Hundred billion KRW)

신재생에너지 R&D에 의해 개발된 기술이 적용되는 시기에 따른 신재생에너지 발전량은 <Figure 6>과 같다.

$RE(j, t)$ 는 j 시점에 신재생발전 기술이 적용되었을 때 t 시점의 신재생에너지 발전량을 나타내므로 전체 발전량 중 신재생에너지 발전량의 비율을 통해 예측할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 연도별 전체 에너지 발전량을 예측하고, 신재생에너지 R&D를 통해 기술을 적용한 첫 해의 신재생에너지

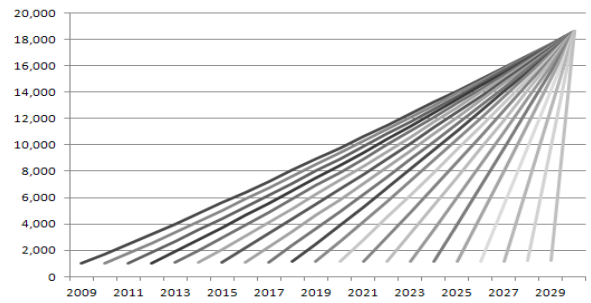


Figure 6. Future generated electricity of renewable energy with respect to deployment timing (Unit: GWh)

발전량을 전체 에너지 공급량 441,615GWh 중 992.5GWh를 생산하여 0.22%를 차지한다고 가정하였다. 2030년에는 신재생에너지에 의한 발전량이 정부 목표인 약 18,591GWh에 달하여 전체 에너지 공급량 중 3.42%를 차지한다고 가정하였다. 기술 적용 시기에 따른 신재생에너지 발전량의 변화는 기술적용이 늦어질수록 신재생에너지 발전단가의 경쟁력이 증대되므로, 발전량이 더욱 급속히 증가하여 2030년에는 신재생에너지에 의한 발전량이 정부 목표인 약 18,591GWh를 달성한다고 가정하였다.

4.2 분석결과

4.2.1 현금흐름할인 모형(DCF)

화석에너지 발전단가는 시간이 흐를수록 발전단가가 상승하며, 신재생에너지 발전단가는 R&D를 수행할수록 발전단가가 감소한다. 따라서 일정한 시점에 도달하면 신재생에너지의 발전단가보다 화석에너지의 발전단가가 높아지는 현상이 발생한다.

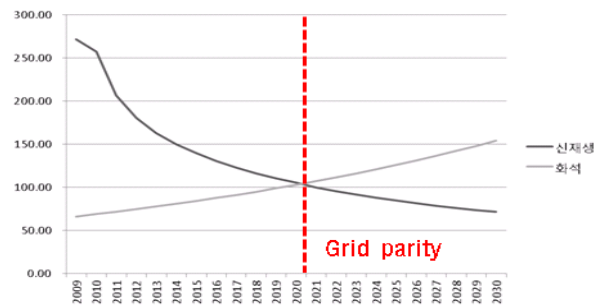


Figure 7. Grid parity

<Figure 7>을 살펴보면, 한국의 경우 2021년에 화석에너지 발전단가보다 신재생에너지 발전단가가 낮아지는 역전현상이 발생하게 됨을 알 수 있다. 즉 한국은 2021년에 화석에너지 발전단가와 신재생에너지 발전단가가 같아지는 Grid parity를 달성하였다. 역전시점 이후는 화석에너지의 발전단가가 지속적으로 상승하므로 신재생에너지는 R&D를 수행하지 않아도

경쟁력을 갖추게 된다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 실증분석 시나리오를 통해 분석을 수행하였다.

- Continue 시나리오 : 역전시점 이후 R&D를 지속적으로 수행
- Stop 시나리오 : 역전시점 이후 R&D를 수행하지 않음

현금흐름할인 모형에서 미래 현금흐름 예측과 더불어 중요한 요소 중 하나는 적절한 할인율을 적용하는 것이다. 한국전기연구원의 「신·재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS 제도와 연계방안」에서는 신재생에너지 발전사업의 할인율을 7%로 제시하고 있다. 본 연구의 대상이 되는 태양광에너지와 풍력에너지는 발전차액지원제도에 해당되는 에너지원이므로 전기연구원의 결과를 준용하여 할인율은 7%를 적용하였다. 실증분석 시나리오에 대한 연도별 현가 환산 현금흐름을 도식화하면 <Figure 8>과 같으며, 시나리오별 분석결과는 <Table 6>과 같다.

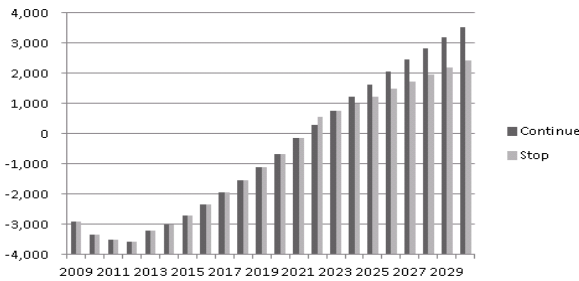


Figure 8. Cash flows of each scenario

Table 6. Results of DCF analysis(Unit : Hundred million KRW)

	Continue	Stop
NPV	-12,126	-16,744

<Figure 8>의 앞의 막대그래프는 시나리오 ‘Continue’의 현금흐름이며, 뒤의 막대그래프는 시나리오 ‘Stop’의 현금흐름이다. 두 시나리오의 현금흐름을 살펴보면 화석에너지 발전단가와 신재생에너지 발전단가의 역전현상이 최초로 발생하는 시점은 2021년이며, 2021년까지의 현금흐름은 두 시나리오 모두 신재생에너지 R&D를 수행하므로 동일하다는 것을 알 수 있다. 2021년 화석에너지 발전단가와 신재생에너지 발전단가의 역전 현상이 발생하지만, 실제 양의 현금흐름이 발생하는 시기는 2022년부터이다. 이는 2021년에는 화석에너지보다 저렴한 신재생 에너지를 통해 발전함으로써 얻는 수익이 R&D 비용보다 적기 때문이며, 2022년부터는 수익이 R&D 비용보다 크기 때문에 양의 현금흐름이 발생한다. 2022년부터 2023년까지는 R&D 투자액보다 R&D를 수행함으로써 발생하는 신재생 에너지 발전단가 하락에 의한 수익이 적음으로써 시나리오 ‘Stop’의 현금흐름이 더 큰 것을 알 수 있으며, 2024년부터는 시나리오 ‘Continue’의 현금흐름이 더 큰 것을 알 수 있다. 시나리오

‘Continue’의 경우 2022년 최초로 신재생에너지 발전 에 의해 약 296억 원의 수익이 발생하며, 이후 지속적으로 수익이 증가하여 2030년에는 약 3,532억 원의 수익이 발생하게 된다. 시나리오 ‘Stop’의 경우 2022년 약 549억 원의 수익이 발생하며, 이후 지속적으로 수익이 증가하여 2030년에는 약 2,430억 원의 수익이 발생하게 된다.

<Table 6>을 살펴보면 시나리오 ‘Continue’의 NPV가 시나리오 ‘Stop’의 NPV보다 높은 것을 볼 수 있다. 즉 화석에너지 발전단가와 신재생에너지 발전단가의 역전현상이 발생한 이후 신재생에너지 R&D를 중단하는 경우보다 R&D를 지속하는 경우의 NPV 값이 더 큰 것으로 분석되었다. 이는 신재생에너지 R&D를 지속함으로써 신재생에너지 발전단가가 낮아져 발생하는 수익이 신재생에너지 R&D 투자금액보다 크기 때문으로 분석된다. 이러한 분석결과는 풍력에너지 발전단가 감소율이 연 2%, 태양광에너지 발전단가 감소율이 8.4%인 경우에만 해당되며, 발전단가 감소율이 이 보다 낮은 경우 그리드 패리티 달성시점이 늦어져 본 분석과는 다른 결과가 도출될 수도 있다.

4.2.2 실물옵션

옵션가치를 평가하는데 있어서 핵심인자(key parameter)는 화석에너지 발전단가의 변동성이다. <Table 7>을 살펴보면, 한국의 경우 원자력을 제외한 대부분의 발전비중을 석탄과 천연가스가 차지하고 있다. 따라서 화석에너지 발전단가의 변동성을 도출하기 위해 석탄과 천연가스의 연도별 가격 변화를 살펴보면 <Figure 9>, <Figure 10>과 같다. <Figure 9>를 살펴보면 제1차 석유파동 기간인 1973년~1974년과 제2차 석유파동 기간인 1978년~1980년에 석탄가격이 급격히 오른 것을 알 수 있으며, <Figure 10>을 살펴보면 1998년 이후 천연가스의 가격이 급격히 변하는 것을 알 수 있다.

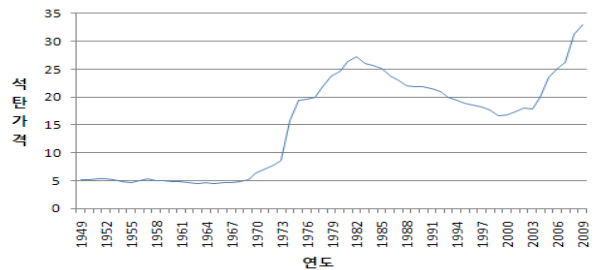


Figure 9. Annual market price of coal(Unit : \$/short ton)

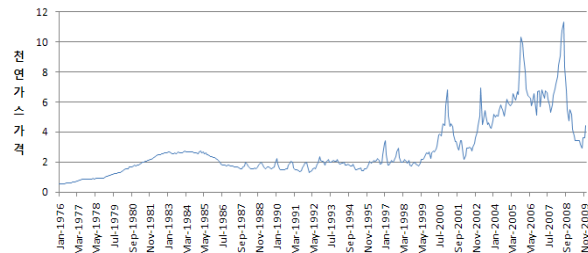


Figure 10. Annual market price of natural gas(Unit : \$/ft³)

Table 7. Option value lattice of 'High' scenario(Unit : Hundred million KRW)

연도	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
A	-872	-1035	-1139	-1269	-1023	-1103	-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
D	-12394	41572	109190	194473	303042	441672	618665	844105	1130049	1490557	1941438	2499492	3180911	3998282	4955361	6038309	7201479	8344823	9278564	9668641	8953347	11659715
R	37951	68517	117520	189686	289398	418719	582988	790957	1052662	1379528	1783782	2276940	2868357	3560432	4343380	5184234	6010723	6686111	6969292	6455004	8407679	0
		-1035	-1139	-1269	-1023	-1103	-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
		-46312	-7151	40868	100824	176310	271679	392203	544171	734916	972676	1266203	1623932	2052419	2553629	3120366	3728878	4327098	4816257	5022485	4653429	6062306
		15525	32251	60135	105195	169064	256966	368279	507509	680620	894032	1153666	1464524	1827715	2238246	2678945	3112158	3466804	3617349	3352853	4369460	0
			-1139	-1269	-1023	-1103	-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
		-67704	-39081	40868	100824	176310	271679	392203	544171	734916	972676	1266203	1623932	2052419	2553629	3120366	3728878	4327098	4816257	5022485	4653429	6062306
		4052	12327	27248	51940	92362	148283	223766	316851	430934	569022	733855	925868	1142562	1374988	1603507	1791213	1872723	1738239	1738239	2267639	0
			-1269	-1023	-1103	-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749	-749
		-80693	-39081	40868	100824	176310	271679	392203	544171	734916	972676	1266203	1623932	2052419	2553629	3120366	3728878	4327098	4816257	5022485	4653429	6062306
		-611	2675	27248	51940	92362	148283	223766	316851	430934	569022	733855	925868	1142562	1374988	1603507	1791213	1872723	1738239	1738239	2267639	0
			-1023	-1103	-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749	-749	-749
			-87720	-33694	-33694	-2920	34575	80517	136913	206013	290199	391764	512495	652937	811153	980718	1147537	1284860	1345594	1250546	1250546	1632608
			-2097	-1110	1345	6922	17743	36963	66556	106344	155616	212160	275455	343057	409586	465178	492055	460460	604293	604293	604293	0
					-1103	-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749	-749
					-90584	-77309	-62307	-45088	-25086	-1677	25798	97968	57968	95327	138037	185584	236238	286189	328200	349519	328700	432597
					-2228	-2258	-1638	224	4483	13496	29804	53570	85000	85000	120964	159200	196867	228920	246064	232801	307938	0
							-1155	-1132	-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
							-90563	-79568	-67467	-53950	-38681	-21310	-1504	21001	46298	74128	103595	132724	157753	172050	164456	218793
							-2258	-2253	-2315	-2113	-681	2523	9686	22859	40664	63506	86151	105953	118030	114308	153690	0
									-1132	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
							-88552	-79114	-68972	-57941	-45829	-32458	-17684	-1450	16116	34557	52849	79680	79680	79680	78970	107512
							-2253	-2315	-2329	-2357	-2304	-2304	-2207	-2190	1622	26	3607	10097	16706	20535	31621	0
									-1151	-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
							-85177	-76791	-67965	-58591	-48569	-37819	-26302	-14077	-1376	11275	22865	31604	34476	34476	49592	49592
							-2315	-2329	-2357	-2304	-2304	-2207	-2190	-2096	-1622	26	3607	10097	16706	20535	31621	0
									-1195	-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749	-749
							-80861	-73182	-65233	-56954	-48299	-39237	-29793	-20079	-10363	11168	6581	11318	19446	19446	19446	19446
							-2329	-2357	-2304	-2304	-2207	-2190	-2096	-1622	26	3607	10097	16706	20535	31621	31621	0
									-1164	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749	-749	-749
							-75898	-68690	-61319	-53754	-45970	-37972	-29813	-21626	-13677	-6443	-736	3755	3755	3755	3755	3755
							-2357	-2304	-2207	-2190	-2096	-1622	26	3607	10097	16706	20535	31621	31621	31621	482	482

	-1225	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749
	-70489	-63591	-56593	-49474	-42229	-34879	-27488	-20188	-13222	-7009	-4412
	-2304	-2207	-2190	-2096	-2058	-2000	-1846	-1721	-1629	-1533	0
	-1108	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749	
	-64773	-58070	-51298	-44445	-37516	-30539	-23576	-16750	-10274	-8662	
	-2207	-2190	-2096	-2058	-2000	-1846	-1721	-1629	-1533	0	
	-1128	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749		
	-58839	-52247	-45599	-38889	-32127	-25340	-18587	-11974	-10875		
	-2190	-2096	-2058	-2000	-1846	-1721	-1629	-1533	0		
	-1090	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749			
	-52741	-46199	-39603	-32953	-26258	-19543	-12859	-12026			
	-2096	-2058	-2000	-1846	-1721	-1629	-1533	0			
	-1033	-1052	-973	-896	-847	-803	-749				
	-46511	-39975	-33384	-26736	-20040	-13319	-12625				
	-2058	-2000	-1846	-1721	-1629	-1533	0				
	-1052	-973	-896	-847	-803	-749					
	-40169	-33607	-26984	-20299	-13559	-12937					
	-2000	-1846	-1721	-1629	-1533	0					
	-973	-896	-847	-803	-749						
	-33724	-27114	-20434	-13683	-13100						
	-1846	-1721	-1629	-1533	0						
	-896	-847	-803	-749							
	-27181	-20504	-13748	-13184							
	-1721	-1629	-1533	0							
	-847	-803	-749								
	-20540	-13782	-13228								
	-1629	-1533	0								
	-803	-749									
	-13800	-13251									
	-1533	0									
	-749										
	-13263										
	0										

Volatility = 0.3265
 Time set = 1 year
 Up step size(u) = 1.3861
 Down step size(d) = 0.7214
 Probability of up move(p) = 0.4592
 Probability of down move(1-p) = 0.5408
 Risk-free discount rate = 2.63%

본 논문에서는 화석에너지 발전단가의 변동성을 다음과 같은 두 가지 시나리오로 나누어 분석하였으며, 변동성은 simple volatility 방법을 통해 도출하였다.

- 시나리오 ‘High’: 1999년부터 2008년까지 최근 10년간 천연가스가격의 변동률인 32.65%를 사용하는 경우로써 높은 변동성을 적용한 시나리오
- 시나리오 ‘Low’: 1989년부터 2008년까지 최근 20년간 석탄 75%, 천연가스 25%를 사용하는 경우의 변동성인 10.01%를 사용한 경우로써 낮은 변동성을 적용한 시나리오

Table 9. Results of real option analysis(Unit : Hundred million KRW)

		ENPV	NPV	ROV
High	Continue	37,951	-12,126	50,077
	Stop	37,951	-16,744	54,696
Low	Continue	12,645	-12,126	24,771
	Stop	12,645	-16,744	29,390

실물옵션분석에서 옵션이 없는 투자가치를 NPV, 옵션가치를 포함한 실물가치를 ENPV(Expanded NPV), 옵션가치를 ROV(Real Option Value)라고 하면 그 관계는 $ENPV = NPV + ROV$ 와 같이 표현할 수 있다(Lim et al., 2006) 실물옵션을 통해 분석된 각 시나리오별 결과는 <Table 9>와 같다. DCF 모형을 통해 분석한 결과는 NPV가 -12,126억 원, -16,744억 원으로 신재생에너지가 경제성이 없다고 분석되었지만, 실물옵션 모형을 통해 분석한 결과를 살펴보면 신재생에너지 기술의 ENPV가 12,645억 원에서 37,951억 원에 달한다는 것으로 분석되었다. 특히 변동성이 클수록 ENPV가 높은 것으로 분석되었으며, 신재생에너지 R&D의 옵션가치는 24,771억 원에서 54,696억 원에 달하는 것으로 분석되었다. 이것은 DCF 모형으로 분석한 결과는 신재생에너지 R&D의 가치가 없다고 판단되었지만, 미래의 불확실성과 의사결정의 유연성을 고려하면 신재생 에너지 R&D의 경제적 가치가 있다는 것을 보여주는 결과이다.

위의 시나리오 중 대표적인 경우로 시나리오 ‘High’의 옵션 가치적자는 <Table 7>과 같으며, <Table 7>에서 의사결정만을 도식화하면 <Table 8>와 같다. <Table 7>과 <Table 8>는 화석에너지 발전단가가 상승 시 가로로 이동하며, 화석에너지 발전단가가 하락 시 대각선 아래로 이동하는 형태로 이루어져 있다. 의사결정만을 도식화한 <Table 8>를 살펴보면, 2009년에는 R&D에 투자하는 것이 최적이며 화석에너지 발전단가의 상승 여부와 관계없이 2010년과 2011년에도 R&D에 투자하는 것이 최적이라는 것을 알 수 있다. 2012년까지 화석에너지 발전단가가 지속적으로 상승하는 경우에는 R&D를 통해 개발된 기술을 적용하는 것이 최적이다. 2012년까지 화석에너지 발전단가가 상승하더라도 신재생에너지는 화석에너지 발전단가보다 높다. 그럼에도 불구하고 빠른 시기에 R&D를 통해 개발된 기술을 적용하는 것은 현재 손실보다 적용시점 이후의

신재생에너지 발전량 증가로 인한 수익이 더 크기 때문이다. 그리고 2012년까지는 화석에너지 발전단가가 떨어지더라도 지속적으로 신재생에너지 R&D에 투자하도록 권고하고 있다. 만약 2013년까지 화석에너지 발전단가가 지속적으로 하락한다면 포기옵션을 권고하는 노드가 나타나게 된다.

4.2.3 민감도 분석

본 연구의 실물옵션분석에 사용된 무위험이자율, 발전단가 하락률, 신재생에너지 발전량, 변동성이 ENPV에 미치는 민감도를 분석해보면 <Figure 11>과 같다. 민감도 분석은 무위험이자율 2.63%, 2030년 신재생에너지 발전량 18,591GWh, 변동성 32.65%, 발전단가 감소율은 태양광 8.4%, 풍력 2%를 기준으로 분석을 수행하였다.

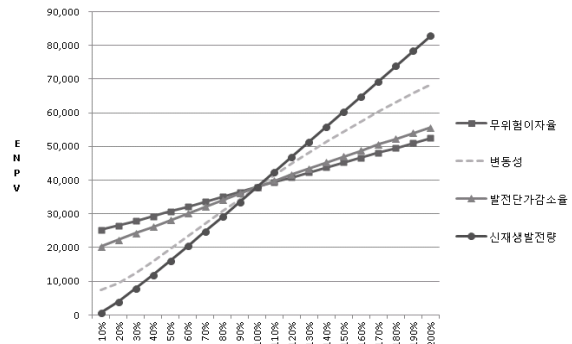


Figure 11. Sensitivity analysis

<Figure 11>을 살펴보면 ENPV는 무위험이자율, 발전단가 하락률, 신재생에너지 발전량, 변동성이 커질수록 증가한다. 가장 민감하게 영향을 주는 모수는 신재생에너지 발전량이며, 이는 정부의 신재생에너지 발전목표량에 의해 좌우된다. 한편 정부의 신재생에너지 발전목표량이 과도하게 예측되었다는 주장을 고려하여 신재생에너지 발전량을 정부 목표량의 10%만 달성한다고 가정하더라도 옵션가치를 포함한 ENPV는 DCF 분석에 의해 도출된 NPV 분석결과에 비해 더 큰 가치를 가지는 것으로 분석되었다.

5. 결론 및 추후 연구방안

본 연구에서는 실물옵션 분석법을 이용하여 한국의 신재생에너지 R&D의 가치를 도출하였다. 신재생에너지 R&D의 총 옵션가치(ENPV)는 미래의 불확실한 상황에서의 의사결정 옵션을 고려함으로써 현금흐름할인 모형(DCF) 분석으로 도출한 NPV 값보다 신재생에너지 R&D가 더 큰 투자 가치가 있다는 것을 보여주었다. 특히 정부의 신재생에너지 발전목표량이 과도하게 예측되었다는 주장을 고려하여 신재생에너지 발전량을 10% 수준까지 낮추었을 때에도 DCF 분석결과보다 유리한 결과가 도출되었다.

본 연구는 실물옵션 분석법을 통하여 이항격자를 통해 미래의 상황변화에 따른 신재생에너지 R&D에 대한 전략적인 의사결정 경로를 보여줌으로써 정부 의사결정자들에게 도움을 줄 수 있을 것이다.

그러나 일반적으로 옵션의 가치를 평가할 경우 이자율 기간 구조를 구하여 이 기간구조로 할인하는 방법을 사용하지만 본 연구에서는 모델의 단순화를 위해 무위험이자율이라는 하나의 이자율만을 고려하였다는 한계점이 있다. 또한 신재생에너지 R&D에 대해서 R&D가 실패할 수 있다는 기술적 성공에 대한 불확실성을 고려하지 않았다는 한계점이 있다. 따라서 추후 연구방향은 신재생에너지 R&D의 기술적 성공에 대한 불확실성, 신재생에너지 발전량의 예측, 신재생에너지 기술사용의 확산에 따른 환경영향(이산화탄소 배출량 감소 등), 이자율 기간구조 반영 등을 추가적으로 고려하여 분석하는 연구가 필요할 것이다. 또한 화석에너지 발전단가가 증가, 감소, 유지하는 trinomial model 또한 고려해 볼 수 있을 것이다.

참고문헌

- AWEA(American Wind Energy Association) (2010), U.S. Wind Industry Annual Market Report.
- Awerbuch, S. and Berger, M. (2003), "Energy security in the EU : applying portfolio theory To EU electricity planning and policy-making," *International Energy Agency Report EET/2003/03*, Paris, France.
- Black, F. and Scholes, M. (1973), The pricing of options and corporate liabilities, *Journal of Political Economy*, **81**(3), 637-654.
- Brennan, M. J. and Schwartz, E. S. (1977), The valuation of American put options, *Journal of Finance*, **32**(2), 449-462.
- Brennan, M. J. and Schwartz, E. S. (1985), Evaluating natural resource investments, *Journal of Business*, **58**(2), 135-157.
- Davis, G. A. and Owens, B. (2003), Optimizing the level of renewable electric R&D expenditures using real options analysis, *Energy Policy*, **31**(15), 1589-1608.
- Dixit, A. K. and Pindyck, R. S. (1994), *Investments Under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Dykes, K. and Neufville, R. (2008), "Real Options for a Wind Farm in Wapakoneta, Ohio : Incorporating Uncertainty into Economic Feasibility Studies for Community Wind," MIT, 2008.
- EWEA(European Wind Energy Association). (2010), *Wind in Power : 2009 European statistics*.
- Grenadier, S. R. and Weiss, A. M. (1997), Investment in technological innovations : an option pricing approach, *Journal of Financial Economics*, **44**(3), 397-416.
- Méndez, M., Lamothe, P., and Goyanes, A. (2007/2009). "Valoración de un Parque Eólico con Opciones Reales," *Business Review UNIVERSIA*(English Working Paper : Real Options Valuation of a Wind Farm available at <http://www.realoptions.org/papers2009/46.pdf>).
- SEIA(Solar Energy Industries Association) (2010), *US Solar Industry Year in Review*, 2009.
- Siddiqui, A. S., Marnay, C., and Wiser, R. H. (2007), Real options valuation of US federal renewable energy research, development, demonstration, and deployment, *Energy Policy*, **35**(1), 265-279.
- Smit, H. T. J. and Trigeorgis, L. (2001), Flexibility and commitment in strategic investment. In : Schwartz, E. S., Trigeorgis, L. (Eds.), *Real Options and Investment Under Uncertainty : Classical Readings and Recent Contributions*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 451-498.
- Fleten, S.-E. and Maribu, K. M. (2004), "Investment timing and capacity choice for small-scale wind power under uncertainty," *Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Power and Energy Systems*, November 28-December 1, 2004, Clearwater Beach, Florida, USA.
- Trigeorgis, L. (1996), *Real Options : Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Yoon, W.-C. (2001), Economic evaluation of energy related projects using real option pricing method, Korea Energy Economics Institute, Working Paper No. 2001-06.
- Korea Energy Management Corporation New and Renewable Energy Center (2007), *New and Renewable Energy RD&D Strategy 2030*, Korea.
- <http://www.energy.or.kr>
- Lim, K.-S., Lee, D.-J., Kim, K.-H., and Oh, H.-S. (2006), Valuation and Optimal Timing of the Investment in Next Generation Telecommunication Service Using Real Options, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **32**(3), 180-190.
- Korea Power Exchange EPSIS(Electric Power Statistics Information System).
- Korea Power Exchange (2009), *Present condition of generation facility in 2009*.
- Ministry of Knowledge Economy (2008), *The third basic plan of technological development, utilization and deployment of new and renewable energy (2009~2030)*.
- Ministry of Knowledge Economy, Korea Energy Management Corporation New and Renewable Energy Center (2008), *New and Renewable Energy White Paper 2008*, Korea.
- Ministry of Knowledge Economy, 「Guideline of electric power price generated from new and renewable energy」 Notification No. 2009-207.
- U. S. Energy Information Administration Homepage(<http://www.eia.gov>).
- Korea Electrotechnology Research Institute, *Improvement of renewable energy cost difference subsidy system and plan for connection with RPS system*.