

# 시스템다이내믹스와 복합 리얼옵션 기반 신·재생에너지 기술가치평가

전찬웅 · 신준석<sup>†</sup>

성균관대학교 기술경영학과

## On Renewable Energy Technology Valuation Using System Dynamics and Compound Real Options

Chanwoong Jeon · Juneseuk Shin

Graduate School of Management of Technology, Sungkyunkwan University

The transition from fossil to renewable energy is inevitable due to fossil depletion. So, Renewable energy is very important for energy security and economic growth although it's R&D is long-term and high risky project. We propose new valuation method which combined system dynamics and compound real option method for long-term and high risk projects such as renewable energy. This method can show dynamic valuation results for the complex causal interaction and be easy for Monte-Carlo simulation to estimate volatility. And it can reflect the value of flexible decision for uncertainty. We applied the empirical analysis for Korea's photovoltaic industry by using this method. As results by empirical analysis, photovoltaic's R&D has high valuation using this method compared by traditional valuation methods such as DCF.

**Keywords:** Photovoltaic, R&D valuation, System dynamics, Monte-Carlo Simulation, Compound real options

### 1. 서론

기후변화와 화석연료 고갈로 인해 화석에너지에서 신·재생 에너지로의 이행이 필요하다는 국제적 합의는 기후변화에 대한 국제연합 기본협약(1992), 교토의정서(2005), 코펜하겐 합의(2009), 그리고 칸쿤 합의(2010) 등에서 잘 보여준다. 하지만 신·재생에너지는 현재까지 화석에너지에 비해 인프라 및 발전 단가에 측면에서 경쟁력이 떨어지는 것이 사실이다(IRENA, 2013). 따라서 장기적 관점에서는 신·재생에너지 R&D는 높은 가치를 가지고 있지만, 단기적으로는 불확실성이 높기 때문에 과소평가되는 경향이 있다. 신·재생에너지는 경쟁력 확보를 위해 지속적인 기술개발이 필요하기 때문에 장기적 관점에서 경제적 가치를 분석해야 한다.

다양한 신·재생에너지 중 태양광은 가장 각광받는 분야이다. EPIA 보고서(2012)에 따르면 태양광 시장은 2010년 기준으로 설치 기준 16.6GW(1,136억 달러) 규모이며, 전체 신·재생 에너지 시장의 8%에 불과하지만 성장속도는 가장 빠르다. 그러나 이런 성장세는 자체 경제성을 확보했기 때문이라는 것보다 정부의 주도적인 지원정책에 의한 것이라 할 수 있다. 그러나 최근 유럽의 재정위기로 인해 수요가 둔화되었고, 성장세에 맞춘 공격적인 설비증설로 인해 공급과잉이 심화되었다. 이로 인해 시장의 구조조정이 진행되고 있다. 구조조정은 경제성 확보를 위한 역량강화에 그 목적이 있다. 태양광 업체들은 인수합병을 통한 설비 규모의 확대, 또는 기술개발을 통한 원가절감을 통해 경제성을 확보하고자 하며, 이런 선행투자를 통해 경쟁력을 강화하고자 하고 있다.

<sup>†</sup> 연락저자 : 신준석 교수, 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300 성균관대학교 기술경영학과, Tel : 031-290-7697, Fax : 031-290-7610, E-mail : jsshin@skku.edu

2013년 7월 22일 접수; 2013년 9월 10일 수정본 접수; 2013년 10월 11일 게재 확정.

최근 구조조정이 심화되면서 태양광에너지 R&D 가치평가가 부각되고 있다. 에너지 R&D의 가치평가는 신·재생에너지 기업에서 경제성을 확보하기 위한 방안을 찾기 위한 수단으로, 정부에서는 신·재생에너지 확산정책의 수립을 위한 방법론으로 활용될 수 있다. 그러나 신·재생에너지 R&D는 장기적이며, 국제규제, 정부정책, 에너지수급, 경제성장 등 다양한 요인이 상호작용을 통해 시간에 따라 불확실성이 높아지는 특징을 가지고 있다. 그러나 현금흐름 할인법으로 대표되는 기존의 가치평가 방법은 모든 변수가 고정된 확정적인 가치평가 방법이기 때문에, 신·재생에너지에 적용 시 단기적으로는 정확할 수 있으나 장기적으로는 정확도가 크게 떨어지는 단점을 지니고 있다(Amram and Kulatilaka, 2003). 이를 해결하기 위하여 최근 Davis and Owens(2003) 이후 많은 연구가 실물옵션 등을 적용하여 신·재생에너지가 지닌 불확실성에 대한 유연한 의사결정의 가치를 반영하고자 하였다. 하지만 이 방법 역시 다양한 변수 간의 관계를 고려하지 못하는 단점이 있다(Lee, 2012).

본 논문은 기존 신·재생에너지 기술가치평가 방법의 위와 같은 단점을 보완하기 위해 시스템다이나믹스와 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률적 가치평가방법을 제안하고, 이와 더불어 R&D에 적합한 복합실물옵션을 통해 유연한 의사결정이 가지는 가치를 반영하고자 하였다. 시스템다이나믹스는 변수 간 인과관계를 중심으로 통합적인 시스템 구조를 설정하고 특정변수의 변화에 따른 결과값의 동태적인 변화를 파악할 수 있는 방법이다. 시간에 따른 변수의 변화와 인과관계, 그리고 그 상호 영향에 대한 피드백 효과까지 고려할 수 있어 복잡한 현실을 반영한 가치평가를 수행할 수 있다. 또한 기존 확정적 평가방법에서 벗어나 가치의 변동성을 의사결정에 반영하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 확률적 가치평가를 수행하였다. 더불어 유연한 의사결정의 가치를 반영하기 위해 실물옵션을 적용하여 가치평가 방법의 신뢰성을 제고하였다. 이를 통해 신·재생에너지의 대표적인 분야인 태양광 R&D에 적용하여 가치평가를 수행하였다.

## 2. 기존 신·재생에너지 기술가치평가 방법

신·재생에너지 기술가치평가 방법을 상태선호기법(Stated Preference techniques), 현선호기법(Reveal Preference techniques), Emery 분석, 경제적가치분석(Economic analysis), 실물옵션(Finance option theory) 등 5가지로 구분할 수 있다(Angeliki, 2008).

상태선호기법은 정책적 투자 관점에서의 가치평가로 주로 사용하는 방법으로 WTP(Willingness to pay)에 기초한 CVM(Contingent valuation method)가 대표적이다(Borchers *et al.*, 2007; Koundouri *et al.*, 2009). CVM은 에너지 시설이 건립되는 지역 주민을 대상으로 설문조사를 통해 소득, 교육수준과 같

은 인구통계학적 정보와 에너지기술에 대한 선호도를 조사하고 이를 WTP를 통해 화폐가치로 전환한다. 현선호기법은 여행비용접근법, 헤도닉 분석(Hedonic analysis)를 들 수 있다. 이 방법은 신·재생에너지를 이용하여 소비자가 느끼는 즐거움을 간접적으로 측정한다. Emery 분석은 자연환경과 사회경제 활동의 전체적 관점에서 파악하고, 자연환경이 인간에 기여하는 바를 생태학적으로 평가하는 시도이다. 재화의 가치를 다방면으로 평가하면서 이들이 만들어지기 까지 투입된 모든 에너지를 고려 후, 가치를 산정한다(Odum, 1996).

5가지 방법 중 위 세 가지 방법은 모두 간접적 가치를 측정하는 방법이며, 정책적 공익측면의 효용(Utility)을 산정하기 위한 방법이다. 사업성 관점에서는 경제적 가치분석이 가장 많이 활용되는 기법이며, 대표적으로 현금흐름할인법(Discounted Cash Flow, DCF)을 들 수 있다. DCF는 R&D 및 상용화에 필요한 투자, 운영비 등 현금유출과, 사업에서 얻을 수 있는 미래의 현금유입을 할인율에 맞추어 환산 후, 편익에서 비용을 감산하여 0보다 크면 경제성이 있다고 판단한다. 이 방법은 확정적으로 가치를 산정한다. 불확실성으로 대표되는 위험(Risk)을 확정된 할인율로 반영하기 때문에 할인율 산정이 매우 중요하다. 그러나 장기간의 사업일 경우 할인율 산정이 어렵기 때문에 불확실성이 적은 단기 가치평가에는 적합하나, 다양한 요인이 상호작용하며 불확실성을 창출하는 중장기 가치평가에서는 정확도가 크게 떨어진다. 태양광을 비롯한 신·재생에너지 기술은 중장기 연구개발 기간, 국제규제, 정부 정책 등 다양한 불확실성 요인을 가지고 있기 때문에 기존 평가 방법들이 정확도가 낮을 수밖에 없다. 따라서 변수가 고정되어 확정적으로 가치를 판단하는 것과, 확실성에 따른 의사결정의 유연성을 평가할 수 없다는 단점이 있다.

마지막 방법은 실물옵션 모형을 이용하여 신·재생에너지의 가치를 산정하는 것이다. Angeliki(2008)가 기존 신·재생에너지 가치평가 모델을 검토한 결과, 실물옵션 모형이 가장 적용가능성이 높으며, 미래에도 실물옵션의 적용가능성은 더욱 커질 것으로 전망했다. 불확실성이 큰 투자사업의 경우 한번의 의사결정보다는 불확실성을 줄여 의사결정을 할 수 있으면, 이는 상당한 경제적 가치를 지니게 된다. 이런 유연성을 가질 수 있는 선택권을 옵션이라 한다. 옵션은 만기가 되는 미래 시점에서 유리할 경우 행사하고 유리하지 않을 때 행사하지 않을 선택권이며, 이를 통해 이익의 극대화를 이룰 수 있다. 이를 기술이나 사업에 응용한 것이 바로 실물옵션이다. 실물옵션이라는 용어는 Myer(1977)에 의해 처음 등장하였으며, Myer는 실물옵션을 기업이 가지고 있는 유연한 의사결정이 가능한 권리를 수치로 정량화한 것이라 정의했다. 이런 장점 때문에 2000년 이후 신·재생에너지에서 실물옵션을 이용한 연구들이 나타나기 시작했다. Davis and Owens(2003)은 DCF 기법과 실물옵션(Real Options) 기법을 신·재생에너지에 적용해 비교했으며, 중장기적 R&D 위험, 국제 화석에너지 가격 변화 등의 불확실성을 고려하지 못하는 전통적 DCF 기법이 신·재생에너

지 기술가치평가에 적합하지 않다는 것을 보여주었다. Siddiqui *et al.*(2007)은 이항격자 실물옵션 모형을, Kumbaroglu *et al.* (2008) 동적 프로그래밍 기반 실물옵션 모형을 적용해 다양한 기술적, 제도적 위험들을 가치평가에 반영시키고자 했다. 실물옵션 모형은 다양한 변수의 영향, 위험, 불확실성을 가치평가에 확률적으로 반영할 수 있다는 것이 장점이나, 이 방법 역시 변수간 관계를 고려하지 못하는 것이 단점이다.

### 3. Proposed Approach

#### 3.1 Model Development

본 연구에서는 기존 연구와는 다른 새로운 신·재생에너지 가치평가 방법을 제안하고자 한다. 신·재생에너지 산업에는 정부 지원제도, 국제 환경규제 협약, 유가 등 다양한 요인들이 상호 영향을 미치게 된다. 따라서 회귀분석과 같은 단선적인 인과관계 모형으로는 한계가 있다. 본 연구에서는 복잡한 순환적 상호영향관계를 모형화하는데 가장 적합한 시스템다이내믹스를 도입하였다. 시스템다이내믹스는 구조화된 변수 간 관계에서 변수 변화에 따른 경제적 가치가 시간에 따라 동태적으로 변하는 것을 시각적으로 볼 수 있어 효과적이다.

또한 의사결정의 유연성에 대한 가치를 반영하기 위해 실물 옵션을 도입하였다. 신·재생에너지 R&D는 장기간 수행되며 다양한 외부변수가 존재하기 때문에 불확실성이 매우 높다. 따라서 R&D 투자와 R&D 후 사업투자에 대한 유연한 의사결정의 가치가 반영되지 않으면 신·재생에너지 R&D 가치는 저평가 될 수 밖에 없다. 따라서 본 논문은 실물옵션을 도입하였고, 기술적 위험성과 시장성 위험성을 구분하여 적용 가능한 다단계 복합옵션 모형을 도입하였다.

실물옵션의 가치에 영향을 미치는 변수 중 변동성은 옵션가

치 산정에서 가장 핵심적인 문제이다. 변동성은 임의 가정을 통하여 민감도 분석에서 그 영향을 파악하거나, 해당 기업의 주가변동성, 업종의 자기자본 변동성 등을 이용하기도 한다. 하지만, 이런 방법은 개별 프로젝트의 변동성이라 볼 수 없으며, 신뢰성에도 문제를 발생시킬 수 있다.

본 논문은 시스템다이내믹스 내 구조 내 변수들의 변화 및 이에 따른 가치평가 결과의 변화를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 이를 통해 실물옵션에 적용할 변동성을 산정하였다. 시스템다이내믹스를 이용하면 각 변수의 구조화된 인과관계와 각 변수의 변동성에 따른 최종 가치의 변동성을 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 쉽게 산정할 수 있다. 이 방법은 기존 방법에 비해 신뢰성을 높일 수 있으며, 시간에 따른 동태적인 가치변동을 시각적으로 볼 수 있다. 또한 불확실성에 따른 의사결정 경로를 시각적으로 볼 수 있다.

본 논문이 제시하는 방법론 개요를 <Figure 1>에 나타내었다. 본 논문의 방법론은 R&D 투자 및 상용화에 따른 투자를 모두 고려하여 복합실물옵션을 적용한다. 하지만 상용화 투자는 R&D 투자가 완료 후의 일이며, 이 때는 복잡성 및 불확실성이 매우 높다. 따라서 가급적 모든 변수들에 대한 인과관계 구조화를 통하여 이를 해소하고 또한 확률적 가치로 변환하여 불확실성을 반영하고자 하였다. 그리고 확률적 가치를 다시 의사결정의 유연성으로 변환하기 때문에 비교적 정교한 가치산정을 할 수 있다.

#### 3.2 Model Framework

본 모형의 프레임워크는 <Figure 2>와 같이 6개의 모듈로 구성된다. (1) 우선 경제성에 영향을 미치는 변수들을 도출한다. 특히 신·재생에너지 산업에서는 3E Framework(Energy Security, Environment protection, Economic Growth) 등 반드시 필요한 변

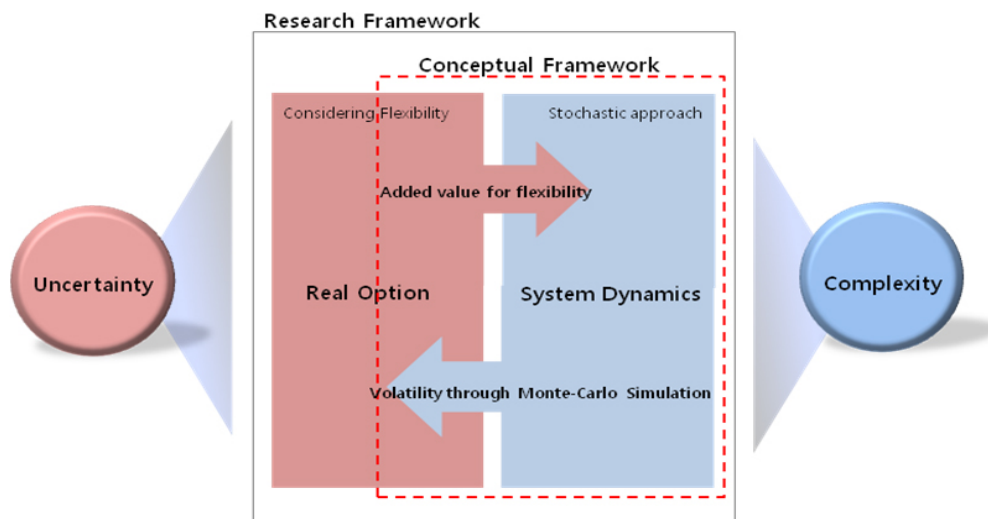


Figure 1. The concept of new valuation model

수들이 모두 포함된 개념적 프레임워크(Conceptual Framework)에 맞춘다. 신·재생에너지 분야가 아니더라도 TBL(Triple Bottom Line), BSC(Balance Score Card) 등 지속성장 가능성을 모두 열어둔 채 개념적 프레임워크를 설정하면 변수도출이 용이하다. (2) 그 후 변수 간의 관계를 구조화한다. 이는 인과관계지도(Casual Loop Diagram)를 이용하면 용이하다. (3) 인과관계지도 작성 후, 변수 값을 입력하고 각 요소의 관계에 대해 유량-저량지도(Stock-Flow Diagram)를 작성한다. 그 후 변수 값에 따른 수익접근법에 의한 가치평가 결과값을 산정한다. (4) 각 변수의 과거 데이터를 이용하여 변수가 가지는 변동성을 파악한 후, 몬테칼로로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation)을 통해 전체 가치의 변동성을 산정한다. (5) 그 후, 투자금액에 R&D 투자 금액을 반영하여 복합실물옵션 가치를 산정할 수 있는 변수들이 모두 취합한다. 그리고 계산된 변수를 바탕으로 Geske 복합옵션을 산정한다. (6) 옵션가치 산정 후 기존의 가치산정 방법과 비교한 확장된 순현재가치(Expanded NPV)를 산정하여 이를 비교한다. 아울러 0보다 높은 R&D 투자 금액의 최적금액을 산정한다.

이와 같은 모형 프레임워크는 전체 변수 간의 구조를 쉽게 파악할 수 있을 뿐 아니라 변동성을 쉽게 파악할 수 있도록 도와준다. 또한 실물옵션을 이용하여 유연성을 가지는 신·재생에너지의 가치를 산정할 수 있다.

### 3.3 시스템다이내믹스

시스템다이내믹스(System Dynamics)는 기존의 단선적 사고에서 벗어나 다수의 변수가 상호 영향을 미치며 순환된 인과관계가 피드백 된다는 가정에서 출발한다. 따라서 시스템다이내믹스는 변수가 시간의 흐름에 따라 변하므로 장기적이며 전체적인 변화패턴에 초점을 맞춘다. 이를 바탕으로 인과관계루프 다이어그램(Cause Loop Diagram)를 작성, 이를 바탕으로 현실세계를 모사한다.

시스템다이내믹스는 다양한 에너지 연구에 활용되어 왔다. 중장기 동태적 변화 모형구축에 적합한 시스템다이내믹스가 에너지 산업 및 기술의 중장기적, 역동적 특성과 잘 맞아 떨어지기 때문이다. 대표적으로 Naill(1992), Quadrat and Davidsen(2001) 등은 국가에너지 정책을 시스템다이내믹스를 통해 모형화하였고, Dyer *et al.*(1995)은 시스템다이내믹스를 이용하여 에너지 효율성에 대한 연구를 수행하였다.

시스템다이내믹스를 가치평가에 적용하면 유리한 점이 많다. 기존 가치평가 방법에서 찾지 못한 여러 변수 간의 관계를 파악하기 쉽고, 변수의 변화에 따라 시간에 따라 가치가 얼마

나 변하는지 동태적 결과를 파악하는 것 용이하다. 또한 시스템다이내믹스를 이용하면 시나리오 분석, 몬테칼로로 시뮬레이션 등을 쉽게 수행 가능하며, 과거자료로부터 변수 추정 쉬운 장점이 있다.

본 논문은 R&D 이후 사업화부터는 기술개발에 따른 내재적 요인과 외부 환경에 따른 외부적 요인에 의한 복잡성을 모사하기 위해 시스템다이내믹스를 이용한다. 시스템다이내믹스를 통해 변수 간의 관계 및 동태적 결과분석을 통해 가치평가를 정교화하고자 한다. 그리고 기존의 확정적 가치평가에서 벗어나 몬테칼로로 시뮬레이션을 이용한 확률적 가치평가를 수행하고자 한다.

### 3.4 복합실물옵션

대표적인 옵션 모형인 Black-Scholes 모형은 무위험이자율( $r$ )과 변동성( $\sigma$ )은 사전에 알려져 있고 불변이라는 가정이 포함된다. 그러나 장기적으로는 R&D와 사업은 다른 변동성을 지닌다. 따라서 다른 여러 단계의 투자사업인 경우 변동성이 고정된 일반 실물옵션 모형보다는 여러 옵션이 결합된 복합옵션을 사용해야 한다.

Margrabe(1978)는 Black-Scholes 모형을 변형하여 하나의 자산을 다른 위험자산으로 교환할 수 있는 권리인 교환옵션(Exchange Options)의 가치평가 모형을 제시한 이후, 이를 바탕으로 Geske(1979)는 다른 옵션을 획득하기 위한 옵션의 가치, 즉 복합옵션을 산정할 수 있는 모형을 제시하였다. 이 복합옵션은 옵션 행사일에서 복합옵션의 소유자는 첫 번째 투자비용을 지불하고 콜옵션을 받을 권리를 갖는다. 이 콜옵션은 두 번째 옵션 행사일에서 두 번째 투자비용을 지불하고 기초자산을 매입할 수 있는 권리를 부여한다. 단, 이 복합옵션은 첫 번째 옵션만기일에 옵션가치가 첫 번째 투자비용보다 높을 때만 행사할 수 있다.

Buraschi and Dumas(2001)은 서로 연관성이 있는 여러 풋옵션과 콜옵션으로 구성된 복잡한 복합옵션의 가치를 평가할 수 있는 복합옵션 평가모형을 제시하였는데, 이 모형은 변동성이 일정하고 자산의 가치가 대수정규분포를 따른다면 두 개의 옵션으로 구성된 일반 복합옵션은 수리적으로 Geske 모형과 일치함을 밝혀냈다. 복합옵션의 산정모형은 수치적으로 매우 복잡하다. 하지만 모형이 복잡하여 설계되어 정교하더라도 변동성 추정을 잘못하게 되면 결과는 크게 달라질 수 있다. 여러 단계로 옵션을 나눈다면 그만큼 많은 변동성 추정을 실시하여야 하고 변동성 추정도 그만큼 정교하여야 한다. 따라서 장기적 변동성 추정이 어려운 신·재생에너지와 같은 투자사업의



Figure 2. Research framework

경우는 단계를 간단하게 설정하고 변동성 추정을 정교화하는 것이 효과적이다.

본 연구가 제안하는 가치평가 방법에서는 R&D와 사업화인 두 단계의 복합옵션을 고려하였다. Buraschi and Dumas(2001)가 언급한 것처럼 두 단계 옵션에서는 Geske 모형이 비교적 간단하여 산정이 효율적이므로 Geske 모형을 적용하였다. Geske 모형은 식 (1)과와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Call Option} &= S2 \cdot M(a1, b1; \rho) \\ &\quad - I2 \cdot e^{-r\tau2} M(a2, b2; \rho) - I1 \cdot e^{-r\tau1} \cdot N(a2) \quad (1) \\ a1 &= \frac{\ln\left(\frac{S2}{S2^*}\right) + \left(r + \frac{\sigma_v^2}{2}\right)\tau1}{\sigma_v \sqrt{\tau1}}, \quad a2 = a1 - \sigma_v \sqrt{\tau1}, \\ b1 &= \frac{\ln\left(\frac{S2}{I2}\right) + \left(r + \frac{\sigma_v^2}{2}\right)\tau2}{\sigma_v \sqrt{\tau2}}, \quad b2 = b1 - \sigma_v \sqrt{\tau2} \\ \rho &= \sqrt{\frac{\tau1}{\tau2}}, \quad \tau1 = T1 - t, \quad \tau2 = T2 - t, \end{aligned}$$

여기서  $\sigma_v$ 와  $r$ 은 각각 상용투자 시 나타나는 변동성 및 무위험이자율을 의미한다.  $N(\cdot)$ 는 누적표준정규분포 함수이며, 초기 투자(R&D)의 행사 시점을  $T1$ , 후속투자(상용화 투자)의 행사시점을  $T2$ , 현재시점을  $t$ 라 표시하였다.  $S2$ 는 상용투자 시 얻을 수 있는 현금유입,  $I1$ 은 초기 투자액(R&D 투자),  $I2$ 는 후속 투자액(상용화 투자)을 의미한다. 또한  $\rho$ 는 시계열상관계수이다.  $M$ 은 이변량 누적표준정규분포(Bivariate cumulative normal distribution)을 의미한다.  $M(a, b; c)$ 의 정의는 식 (2)와 같이 첫 번째 확률변수  $Z1$ 값이  $a$  이하이고, 두 번째 확률변수  $Z2$ 값이  $b$  이하일 누적확률이다.

$$\begin{aligned} M(a, b; c) &= P(Z1 < a, Z2 < b) \quad (2) \\ &= \int_{-\infty}^a \int_{-\infty}^b \left\{ \frac{1}{2\pi\sqrt{1-c^2}} e^{-\frac{1}{2(1-c^2)}(Z1^2 - 2cZ1Z2 + Z2^2)} \right\} dZ1 dZ2 \\ &\quad -\infty < Z1 < \infty, -\infty < Z2 < \infty, -1 < c < 1 \end{aligned}$$

마지막으로  $S2^*$ 는 후속투자의 가치가 초기투자의 가치와 일치되는 값으로 후속투자를 실행여부를 결정하는 임계값(Critical Point)이다.  $T1$ 시점에서 실제 가치가  $S2^*$  이상이면 후속투자(상용투자)를 실행할 가치가 있다는 것이며, 이는 식 (3)을 풀어야 한다.

$$S2 \cdot N(b2 + \sigma \sqrt{\tau}) - I2 \cdot e^{-r\tau} N(b2) - I1 = 0 \quad (3)$$

실제 R&D 사업가치는 확정적 가치와 유연성을 감안한 옵션가치의 합을 이용하여 산정된다. 유연성을 고려한 R&D가치는 Expanded NPV로서 표현할 수 있고 이를 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\text{R\&D 사업가치 (Expanded NPV)} = \text{Static NPV(DCF)} + \text{Option Value} \quad (4)$$

## 4. Empirical Analysis : Illustrative Example

### 4.1 태양광산업의 개요

최근 태양광 산업의 구조조정은 정부지원 변화로 인한 수요 둔화와 과거 급성장으로 인한 경쟁적 설비증설로 인해 발생되었다. 재정압박으로 인한 정부주도의 수요둔화는 태양광 발전사들의 설비증설 둔화로 이어지고, 이는 Module 및 태양전지 제조업체, 폴리실리콘 제조업체들의 R&D 투자 및 설비증설 투자를 감축하게 한다. 이런 투자감축은 기술개발 수준이 상대적으로 낮은 태양광이 타 에너지원에 비해 경쟁력을 갖추는데 많은 시간이 소요되게 한다. 이렇게 되면 정부는 에너지안보 및 국제규제에 따라 이를 보완하기 위해 정부지원금이 필요하게 되고, 이는 다시 재정압박으로 다시 수요둔화라는 악순환의 고리가 형성되었다.

악순환의 고리를 끊기 위해서는 적극적 R&D 투자 및 생산량 증대를 통한 학습효과로 Module 제조단가가 하락하여 조기 Grid-Parity 달성하는 것이 필요하다. Grid-Parity 달성은 정부지원 변화에 상관없이 태양광산업이 선순환 할 수 있는 임계점이 된다.

선순환의 고리를 만들기 위해서는 R&D 투자는 필수적이다. 태양광 R&D 투자가 타당성을 갖기 위해서는 정교한 R&D 가치평가 방법이 필요하며, R&D 가치평가는 태양광 발전사업을 토대로 진행하여야 한다. 왜냐하면 발전사업의 가치에 따라 모듈제조업체의 R&D 투자 및 생산설비 증설투자의 금액이 달라질 수 밖에 없기 때문이다. 즉 태양광 발전사업이 호황이라면 모듈관련 R&D 투자 증대하여 기술개발 가속화할 수 있고, 불황이라면 모듈관련 R&D 투자 감소하여 기술개발 지연될 수 밖에 없다. 반대로 태양광 발전사업은 모듈 기술개발이 동반되어야 발전사에게 수익을 주게 된다. 따라서 발전사업과 모듈관련 R&D 투자의 관계는 <Figure 3>과 같이 복합옵션의 성격을 지닌다. 발전사업은 한번 투자 시 대규모로 진행되며 만기가 정해는 European Option 성격을 지니고 있고, 기술개발 역시 기술개발 목표인 Time을 정해 놓는 European Option 성격을 지니고 있다.

### 4.2 Model Development : 시스템다이내믹스 모델

정부는 태양광 보급을 위해 단기적으로는 수요확장을 위한 지원정책을 유지하여야 하지만, 장기적으로는 R&D 투자를 늘려야 한다. 본 실증분석은 정부의 태양광관련 목표 및 R&D 투자 계획의 가치를 분석한다. 아울러 기존 가치평가방법과 본 연구에서 제시하는 방법을 비교해 보고자 한다. 따라서 모든 경



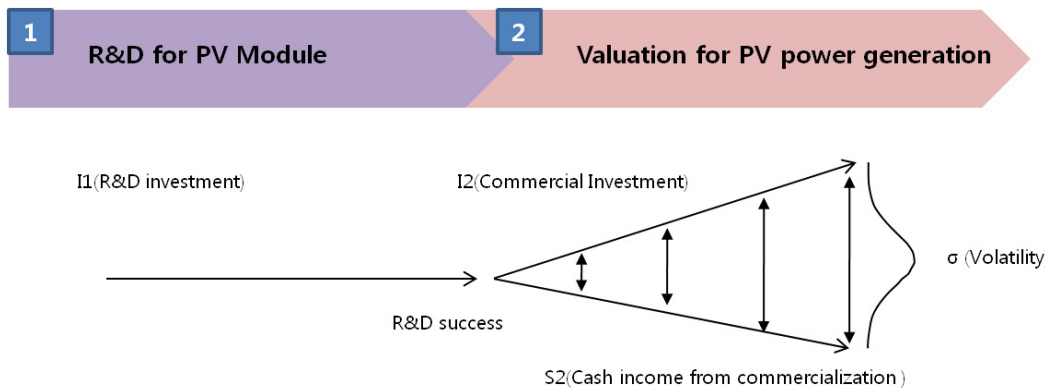


Figure 3. The structure of empirical analysis

Table 1. Input data of empirical analysis from government policy

Contents	Value	Source
Target of capacity	construction of new plants of 542,072MWh from 2020 to 2030	3 <sup>rd</sup> basic plan of technological development, utilization and deployment of new and renewable energy(2009~2030)
R&D Target	Module price 0.5\$/W by 2020	the strategy roadmap of green energy 2011 : photovoltaics
R&D investment	1,352,500MKRW from 2012 to 2020	
Actual R&D investment (~2011)	568,500MKRW	New and Renewable Energy White paper 2012

\* MKRW : Million Korea Won, MWh : Mega Watt Hour.

제적 가치분석의 기본자료는 정부정책 자료를 바탕으로 한다.

2020년 태양광 발전목표는 ‘3차 신·재생에너지의 기술개발 및 이용보급에 대한 기본계획’(2008)에서 가져왔다. 2020년부터 2030년까지는 547,042MWh의 태양광발전소가 신규로 건설되는 것이 목표이다. 이를 달성하기 위한 태양광 R&D 개발 목표는 에너지기술평가원의 ‘그린에너지전략로드맵’(2011)에서의 값을 인용하여 2020년까지 태양광 모듈 0.5\$/W로 설정했다. 그리고 그 동안의 태양광 R&D 투자실적은 ‘신·재생에너지백서’(2012)에서 인용하였다. 본 논문에 이용된 가정을 <Table 1>에 나타내었다.

이를 바탕으로 우선 시스템다이내믹스를 이용하여 모델링을 수행한다. 시스템다이내믹스는 R&D 투자를 제외한 순수 상용화 투자만 반영한다. 즉 2020년부터 신규 태양광 발전소 건설함으로써 발생하는 현금흐름을 바탕으로 경제성 평가를 실시한다.

가치평가에 영향을 미치는 변수를 선택하기 위해 본 논문은 3E Framework를 이용하였다. 3E Framework는 에너지안보(Energy Security), 환경보호(Environment Protecting), 경제성장(Economy Growth)를 큰 축으로 하며, 본 논문은 여기에 속하는 요인들의 인과관계를 살펴보고 이를 바탕으로 가치평가에 영향을 미치는 요인을 추출한다. 그 후 요인들 간의 상호관계를 바탕으로 <Figure 4>(a)와 같이 인과관계 지도를 작성하였다. 이 인과관계 지도를 바탕으로 변수를 입력하여 저장-유량흐름지도를 작성한다. 이 모델에 들어가는 변수들은 기존 문헌을 통하여 수

치를 입력한다.

태양광 발전에서 총 매출은 일조량, 설치된 총 모듈용량, 모듈 효율, 발전단가에 의해 결정된다. 태양광 발전시스템은 일조량이 가장 높은 지역인 경남 진주의 일평균 일조량을 사용하였다(KIER Database). 비용은 직접비와 간접비로 구분된다. 태양광 발전의 특성 상 원료가 없고, 발전된 전력은 송전망을 통해 바로 판매되기 때문에 외상 매출금 및 재고가 없다. 따라서 직접비용은 없으며 간접비용으로 보험료, 모니터링 비용 그리고 유지관리를 위한 고정비가 있다. 모든 비용은 2003년부터 2012년까지 10년 평균 물가상승률을 사용해 연 3.13%씩 증가한다고 가정하였다(KOSIS Database). 투자비 관련 항목은 정부의 발전차액지원금 산정에 사용되는 투자비 산출변수를 이용하였다(KERI, 2010). 또한 거시경제적 요인인 이자율, 환율 등은 과거 데이터를 참고하였다(KOSIS Database). 본 연구에서는 할인율을 한국 기업의 평균치로 가정하고, 가중평균자본비용(Weight Average Cost of Capital, WACC)으로부터 할인율을 산정하였다. WACC은 타인자본수익률과 자기자본수익률의 가중평균으로 구할 수 있다. 타인자본에 의한 이자율은 한국의 AA- 회사채 금리를 가정하였다(KOSIS Database). 자기자본수익률은 CAPM(Capital Asset Pricing Model)을 이용하여 산정하였다. 무위험이자율을 12년간 3년물 국고채 이자율을, 시장프리미엄은 Lee et al.(2008)의 연구결과를 반영하여 자기자본수익율을 산정하였다.

단 여기서 중요한 요인 중 하나가 발전단가이다. 한국에는

발전단가를 SMP(System Marginal Price)를 이용하여 전력거래소에서 정산하게 된다. SMP는 거래시간 별로 원자력, 석탄을 제외한 일반 발전기의 전력량에 정산하는 전력시장 가격으로, 전력생산에 참여한 일반 발전기 중 변동비가 가장 높은 발전단가가 기준이다. 과거 SMP 가격을 회귀 분석한 결과(2001. 1~2013. 4), SMP 가격은 지수함수로 증가하고 있음을 볼 수 있으며( $R^2 = 0.8543$ ) 이 결과를 토대로 미래 값을 예측하였다.

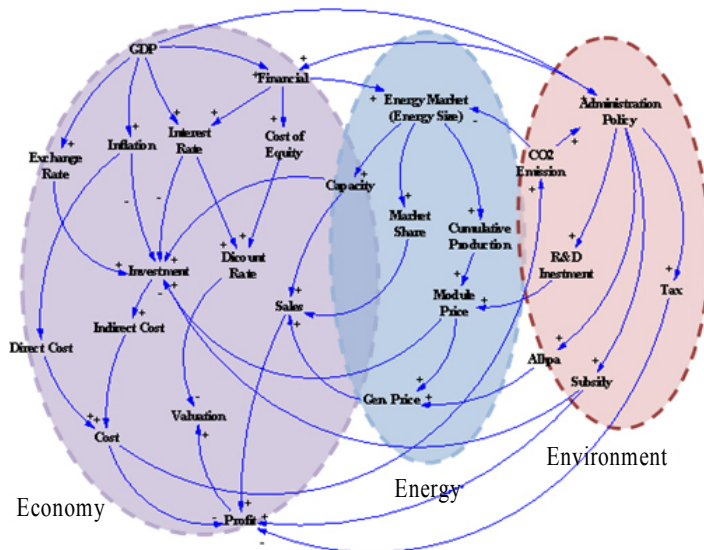
<Table 2>와 같은 가정을 통해 전체 모델을 시뮬레이션하면

<Figure 4>(b)와 같이 시간에 따른 가치의 동태적 결과를 보여 준다. 2020년 정부가 목표한 태양광 발전소 건설을 위해서는 전체 투자액이 14,256억 원이며, 발전소 건설로 인해 평가되는 경제적 가치는 +16,767억 원으로 추산된다. 또한 NPV는 2030년에 음에서 양으로 전환되어 10년이면 투자금을 회수할 수 있다는 것을 볼 수 있다. 이는 태양광 모듈값이 0.5\$/W이 달성되는 2020년부터는 태양광 발전사업은 정부의 지원이 없어도 경제성을 확보할 수 있는 Grid-Parity를 달성한 것을 의미한다.

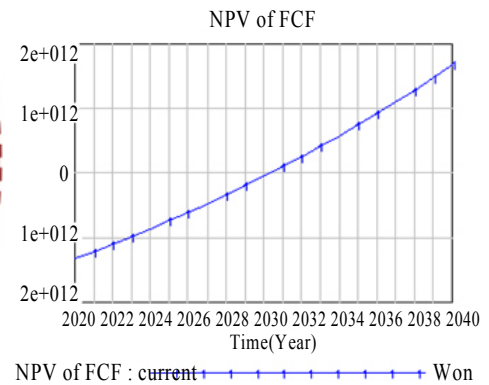
Table 2. Model assumptions

Category	Variable	Unit	Description	Reference
Energy	Unit price of electricity	KRW/kWh	SMP Prices( $= 7 \times 10^{-100} \times e^{0.0159 \times \text{year}}$ )	EPSIS(2001. 1~2013. 4)
	Module price	\$/Wp	0.5	<Table 1>
	Module capacity	kW	489,876( $= 542,072\text{MWh}/(3.8243 \times 365)/0.8$ )	<Table 1>
	Module efficiency	%	Initially 80% with annual 2% reduction	KERI 2011
Economy	Daily Solar radiation	kWh/m <sup>2</sup> /day	3.8243(Jinju region)	KIER 1996~2010
	Operation Period	Year	20	KERI, 2011
	Indirect cost	KRW/year	1% of total investment	KERI, 2011
	Investment	Million KRW	(Inverter(0.4)+Shaft(0.3)+Construction(100)+On-grid system(0.3)+Land(0.36))X Module capacity	KERI, 2011
	Scrap Value	KRW	10%×investment	KERI, 2011
	Inflation rate	%	Annual 3.13	KOSIS databank
	Interest rate	%	5.71.	KOSIS databank
	Exchange rate	KRW/\$	1100.21	KOSIS databank
	Risk-free interest rate	%	5.02	KOSIS databank
	Cost of equity	%	17.02	Lee(2008)
Environment	TAX	%	27.5%	KERI, 2011
	Subsidy	KRW	Initially 0	-

Note) KRW(Korean won), kW(kilo Watt), kWh(kilo Watt hour).



(a) Casual loop diagram



(b) Simulation results

Figure 4. System dynamics results

본 시뮬레이션 결과는 시스템다이나믹스에 입력한 변수가 모두 상수인 경우이다. 단기적으로는 상수 가정이 맞더라도, 중장기적으로는 변수는 변동할 수 밖에 없다. 입력한 변수의 변동이 전체 가치에 미치는 영향을 파악하기 위한 방법이 민감도분석(Sensitivity Analysis)이다. 민감도 분석의 가장 큰 목적은 도출된 결과에 가장 큰 영향을 주는 변수 및 가정을 규명하는 것에 있다. 그러나 공통적으로, 모든 변수를 특정 기간에, 일정한 단위로 변화시키므로 불확실성이 점증하는 변수가 제외될 수 있으며, 또한 단일 변수에 의한 변동만 살펴보기 때문에 변수 간의 상관관계에 의한 영향을 볼 수 없다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이런 단점을 보완하기 위해 확률적 민감도분석을 수행하였다. 확률적 민감도분석 기법 중 가장 대표적인 것이 몬테카를로 시뮬레이션이다. 몬테카를로 시뮬레이션은 구하고자 하는 수치의 확률분포를 반복 가능한 실험 또는 난수 발생으로 구하고, 이를 통해 민감도분석을 수행한다. 데이터가 많고, 자료에 이상점이 적을수록 분석의 신뢰도가 높다.

몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 확률에 영향을 미치는 변동성이 큰 주요 변수들을 파악해야 한다. 과거 자료분포 및 에너지/경제/환경보호의 변화양상에 기반하면 일조량 및 이자율/인플레이션/환율의 주요 거시경제 변수, 그리고 발전단가가 가장 변동성이 크다. 이러한 주요 변수들의 변동성을 반영하여 시스템다이나믹스 모형에서 주요 변수에 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 핵심은 주요 변수에 과거분포에 기반해 난수를 발생시켜 변동성을 예측하는 것이다.

1996년부터 2010년까지의 일조량 변동성은 KIER Database를 통해 찾았다. 일조량은 평균 3.8243kwh/m<sup>2</sup>/day, 분산 0.88이다. 일조량은 정규분포를 따른다는 가정 하에 시간을 연단위로 변환해(kwh/m<sup>2</sup>/yr) 평균 및 분산을 구했다. 진주의 경우 연간 일조량은 평균 1395.859kwh/m<sup>2</sup>/yr, 표준편차는 342.4766, 최소값은 569.4, 최대값은 2230.15이다. 또한 거시경제 주요 변수인 환율, 이자율, 물가상승률은 균등분포(Uniform Distribution)를 따른다고 가정했다. 또한 미래 현금흐름을 할인하기 위해 사용되는 할인율은 앞서 언급한 CAPM 방법을 사용하기 위해 사용되는 변수 중 무위험이자율과 위험프리미엄을 역시 변동성을 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션에 반영하였다. SMP 가

격은 전력거래통계자료를 이용하여 연 최고 SMP 가격에서 연 평균 SMP 가격과의 변동성의 차이와 연 최저 SMP 가격에서 연평균 SMP 가격의 변동성을 각각 산정하여 반영하였다. 미래가치를 산정 시 과거 Data를 사용하면 왜곡이 발생할 수 있으므로, 경제변수 및 발전단가는 모두 Random walk를 따른다는 가정하에 균등분포를 설정하였다. 단 최소값과 최대값만 과거 자료를 이용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 위한 난수 및 분포는 <Table 3>과 같다.

몬테카를로 시뮬레이션 결과는 <Figure 5>와 같이 나타났다. 이 결과는 태양광 발전사업의 가치가 (+)6조 원에서 (-)0.38조 원까지 나타날 수 있는 변동성이 매우 큰 사업이라는 것을 알려준다. 평균은 이익을 본다고 살펴보았지만 손실도 볼 수 있는 확률이 2% 정도 된다는 것이다. 이익은 6조 원까지 날 수 있지만 이 역시 확률이 낮다.

몬테카를로 시뮬레이션은 그 동안의 확정적인 경제적 가치를 확률적 가치로 변환할 수 있도록 도와준다. 확률적 가치산정은 손실 회피를 하기 위한 유연한 의사결정에 도움을 줄 수 있다. 불확실성에 따른 유연한 의사결정의 가치를 산정하기 위해서는 옵션가치를 산정하여야 하고, 이를 위해서는 확률적 가치가 얼마나 변동성을 지니는지 파악하여야 한다. 옵션가치에서 가장 중요한 요인은 변동성이다. 변동성은 앞서 산정한 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 이용하여 경제적 가치의 표준편차를 산정하여 구한다. 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 투자비 대비 수익률로 변환하고 이를 기초통계량 분석하면 전체변동성( $\sigma^*$ )이 75.76%로 산정된다. 전체 변동성은 다시 연 기준 변동성( $\sigma$ )으로 변환하면 16.94%로 추정된다.

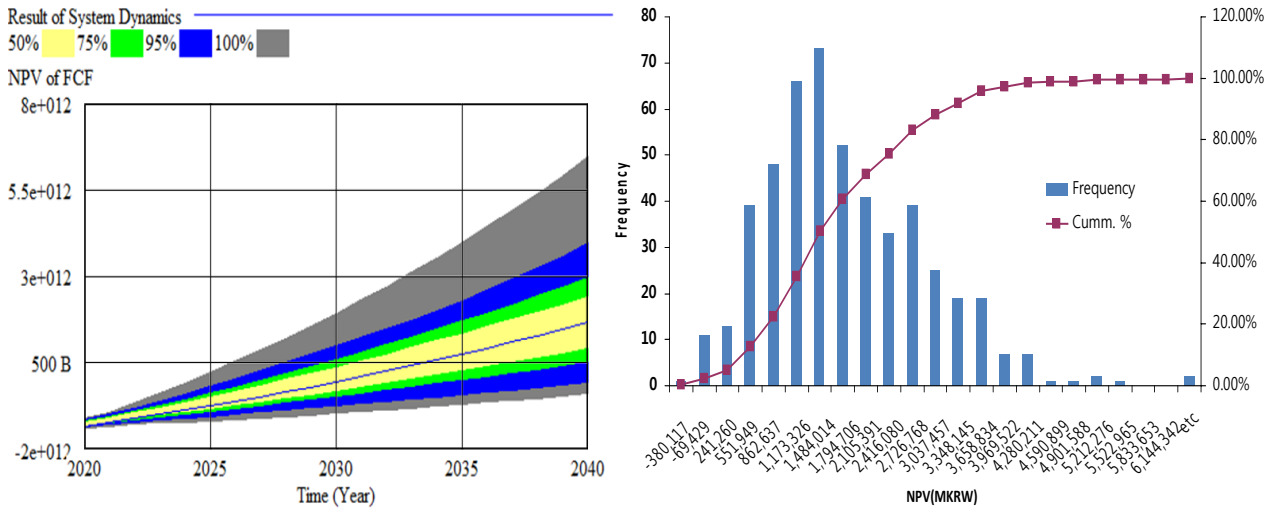
#### 4.3 DCF 및 Compound Real Option 가치산정

앞 장에서는 시스템다이나믹스를 통해 상용화 투자와 상용화 투자로 인해 발생하는 현금흐름을 바탕으로 경제적 가치 및 그 변동성을 산정하였다. 하지만 앞 장에서 살펴 본 것은 기술개발로 인해 태양광 모듈단가가 0.5\$/W를 달성하였을 때의 경제적 가치이다. 본 장에서는 R&D 비용을 포함한 전 Value Chain에서 경제적 가치가 얼마인지 살펴보기로 한다.

**Table 3.** Monte-Carlo simulation setting

Factors	Sources	Distribution	Avg.	Min.	Max	Random #
Solar Radiation(kwh/m <sup>2</sup> /yr)	KIER 1996~2010	Normal	1395.86	569.40	2230.15	500
Interest rate(%)	KOSIS, Corporate bond(AA, 2000~2012)	Uniform	5.71	3.77	9.35	500
Inflation(%)	KOSIS, 2003~2012	Uniform	3.13	2.20	4.70	500
Exchange Rate(KRW/USD)	KOSIS, 1995~2012	Uniform	1100.21	771.04	1398.88	500
Tax refund(%)	-	Uniform	0	0	20	500
Risk Premium(%)	Lee(2008)	Uniform	12.0	9.7	17.3	500
Risk free rate(%)	KOSIS, Government bond(3yr, 2000~2012)	Uniform	5.02	3.13	8.3	500
Volatility of SMP(%)	EPSIS(2001. 1~2013. 4)	Uniform	0	-0.3136	+0.1597	500





(a) Result of Monte-Carlo simulation (b) Histogram(Result of sensitivity analysis)

Figure 5. Results of Monte-Carlo simulation

본 논문은 정부정책 자료를 바탕으로 <Table 1>에서 나타낸 바와 같이 R&D 투자를 반영한다. 그리고 앞 장에서 산정한 현금유입 및 유출을 반영한다. 앞 장에서 언급한 바와 마찬가지로 2011년까지 R&D 비용은 실제 실적이며 이후의 R&D 비용은 정부 예측 값이다. R&D 비용은 모두 무위험할인율(3년물 국채, 2000~2012년 평균, 5.02%)로 할인하여 2011년 기준으로 변환하였다.

우선 DCF 방법을 사용하여 경제적 가치를 산정한다. DCF 방법에서 가장 중요한 요인은 할인율이다. 할인율은 앞 장의 시스템다이나믹스를 통하여 산정되었다. 시장프리미엄과 3년물 국채를 무위험이자율로 감안한 자기자본수익률(Capital of Equity)과 타인자본 수익률(회사채)을 이용한 CAPM(Capital Asset Price Model)법으로 산정한 할인율 7.972%를 감안한다. 상용화 투자로 인한 현금유입흐름에 R&D로 인한 현금유출, 그리고 상용투자로 인한 현금유출을 할인율에 할인하여 산정하면 <Table 5>에서 보는 바와 같이 -4,671억 원으로 산정된다. 기존의 DCF 방법으로는 할인율을 감안한 R&D 투자 및 상용투자자에 대한 현금유출이 현금유입보다 높아 경제성이 없다고 판단된다.

변동성에 따른 실물옵션을 구하기 위한 변수들은 <Table 4>와 같이 정리할 수 있다. 이를 바탕으로 식 (1)을 풀면 Geske 복합옵션의 가치가 구해진다. 이렇게 산정한 결과와 DCF 방법과의 차이를 <Table 5>에 나타내었다. 시스템다이나믹스와 복합실물옵션을 이용한 결과, DCF 방법과는 다르게 경제성이 1조 7천억 원으로 높게 산정되었다. 따라서 정부정책 자료를 바탕으로 한 태양광 R&D는 경제적 타당성이 높다고 할 수 있다.

따라서 정부는 확장된 순현재가만큼 과감하게 태양광 투자를 할 필요가 있다. 산정된 가치는 약 1조 7억 원이므로 이 금액만큼 투자를 하여도 경제성이 있다는 뜻이다.

Table 4. Input of compound real option

Contents	Value
$\tau_1$ (Development time, year)	1
$\tau_2$ (Investment time, year)	10
r(riskless interest rate)	0.0502
$\sigma$ (value volatility)	0.1694
S2(Cash income, 100MKRW)	45,139
I2(Commercial investment, 100MKRW)	14,256
I1(R&D investment, 100MKRW)	14,884

### 5. 결론 및 토의

본 논문은 기존의 신·재생에너지의 기술가치평가 방법을 조사하였고, 장기적이며 불확실성이 높은 기술에 적용할 수 있는 가치방법에 대해 제시하였다. 본 논문에 제시하는 방법은 R&D에 관한 것과, R&D가 완료된 후 R&D 결과를 이용한 상용화에 대한 것으로 나눌 수 있다. R&D 비용은 상업화에 따른 현금흐름에 맞도록 산정되어야 하기 때문에 우선 상업화에 대한 모형을 수립한다.

상용화 모형은 큰 프레임워크에서 영향을 미치는 변수들을

Table 5. Comparison between DCF method and system dynamics+real option method

Unit : 100MKRW	DCF(A)	System Dynamics+Real option(B)	Expand NPV(A+B)
Valuation of PV's R&D	-4,625	22,357	17,687

선 도출하고 이에 대한 인과관계를 구조화하여 시스템다이내믹스 모형을 구축한다. 그 후 시스템다이내믹스에서 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하면 각 변수의 변동성에 따라 전체 가치의 변동성을 쉽게 살펴볼 수 있다. 이 결과를 이용하여 복합실물옵션 가치를 산정하면 전체 R&D가 지닌 실질적 가치를 산정할 수 있다.

본 논문은 이와 같은 방법으로 대표적인 신·재생에너지인 태양광 산업에 대해 적용하고 이 방법론을 검증하였다. 정부 정책 기본자료를 통하여 2020년까지 R&D 비용과 발전소 건설이 갖는 가치를 기존 DCF 방법으로 계산하면 -4,625억 원으로 추산된다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법을 이용한 결과, 정부 목표인 모듈단가 0.5\$/W를 달성 후 2020년 정부목표 태양광 발전소 건설이 가지는 가치는 1조 7천억 원이며 변동성은 75.76%라는 것을 알 수 있었다. 따라서 시장의 구조조정이 심화되고 있는 이 시점에서 오히려 정부는 적극적 투자를 통해 2020년까지 계획된 R&D 투자보다 늘려서 기회를 선점해야 한다. 이는 태양광이 가지는 변동성에서 기인한다. 본 실증분석을 통해 변동성이 높은 사업일 경우 불확실성이 오히려 가치증대의 기회라는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 방법론은 정책적 뿐만 아니라 민간 기업의 에너지 기술개발 및 사업전략에도 많은 도움이 될 수 있다. 신·재생에너지는 대표적 유망기술이며, 많은 세계적 선도기업들이 시장에 진입해 있다. 하지만 불확실성의 심화로 인해 R&D에 대한 적절한 평가를 못하는 경우가 많다. 따라서 본 연구는 이런 오판을 방지하고, 손실을 최소화하는데 기여를 할 수 있을 것이다.

이러한 기여에도 불구하고, 본 연구는 가치 산정에서의 몇 가지 한계가 있다. 우선 각 변수산정방법이다. 본 논문은 각 변수들을 과거 Data를 이용, 회귀분석을 통해 산정했다. 하지만 미래가 과거와 같은 패턴을 가지고 이동하지는 않기 때문에 과거 데이터를 이용 시 오류를 범할 수 있다. 하지만 본 논문은 확정적인 기존 방법론에서 벗어나 구조적으로 가치를 살펴볼 수 있는 모형을 제시한 것이며, 변수산정은 산업의 특성에 맞도록 합리적 근거를 통해 입력하여야 한다. 미래 변수 값의 오차를 감소시킬 수 있다면 가치산정의 정확도를 제고할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Angeliki, M. (2008), Valuation for renewable energy: A comparative review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2422-2437.
- Amram, M. and Kulatilaka, N. (2003), *Real Options*, Harvard Business School Press.
- Borchers, A. M., Duke, J. M., and Parsons, G. R. (2007), Does willingness to pay for green energy differ by source?, *Energy Policy*, **35**, 3327-3334.
- Buraschi, A. and Dumas, B. (2001), The Forward Valuation of Compound Options, *The Journal of Derivatives*, **9**(1), 8-17.
- David, G. A. and Owens, B. (2003), Optimizing the level of renewable electricity R&D expenditures using real options analysis, *Energy Policy*, **31**(15), 1589-1608.
- Dyner, I., Smith, R. A., and Pena, G. E. (1995), System dynamics modeling for energy efficiency analysis and management, *Journal of Operational Research*, **46**(10), 1163-1173.
- EPIA (2012), *Global Market Outlook for Photovoltaics until, 2016*.
- Geske, R. (1979), The valuation of compound options, *Journal of Financial Economics*, **7**(1), 63-81.
- IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview*, 2013.
- KETEP(Korea institute of energy technology evaluation and planning) (2011), *the strategy roadmap of green energy 2011: photovoltaics*.
- KIER(Korea Institute of Energy Research) Renewable Energy Data center.
- KERI(Korea Electro-technology Research Institute) (2010), *Amendment of the Korean Feed-in-Tariffs in 2011*, Korea Electrotechnology Institute.
- KOSIS(Korean Statistic Information Service) Database(<http://www.kosis.kr>).
- Korea Power Exchange, EPSIS(Electricity power statics information system).
- Koundouri, P., Kountouris, Y., and Remoundou, K. (2009), Valuing a wind farm construction: A contingent valuation study in Greece, *Energy Policy*, **37**(5), 1939-1994.
- Kumbaroglu, G., Madlener, R., and Demirel, M. (2008), A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies, *Energy Economics*, **30**, 1882-1908.
- Lee, S.-C. (2011), Using real option analysis for highly uncertain technology investments: The case of wind energy technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 4443-4450.
- Lee, S.-H., Lee, W.-J., and Lim, S.-Y. (2008), Korean Evidence on the implied Cost of Equity, *Korean Accounting Review*, **33**(1), 97-125.
- Margrabe, W. (1978), The value of an option to exchange one asset for another, *Journal of Finance*, **33**, 177-186.
- Ministry of Knowledge Economy (2008), *3rd basic plan of technological development, utilization and deployment of new and renewable energy (2009~2030)*.
- Ministry of Knowledge Economy and Korea energy management corporation New and renewable energy center (2012), *New and Renewable Energy White paper*.
- Myer, S. C. (1977), Determinants of corporate borrowing, *Journal of financial economics*, **5**(2), 147-176.
- Naill, R. F. (1992), A system dynamics model for national energy policy planning, *System Dynamics Review*, **8**(1), 1-19.
- Odum, H. T. (1996), *Environment Accounting: Energy and Environment Decision Making*, John Wiley and Sons, New York.
- Qudrat-Ullah, H. and Davidsen P. I. (2001), Understanding the dynamics of electricity supply, resources, and pollution: Pakistan's case, *Energy*, **26**(6), 595-606.
- 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**, 265-279.