

## 태양광 REC 최적 거래 방식에 관한 연구<sup>†</sup>

남영식\*·이재형\*\*

**요약** : 신재생에너지 발전 규모 확대를 위해 신재생에너지공급의무화(RPS) 제도가 실시되는 가운데, 발전사업자는 신재생에너지 공급인증서(REC)를 확보하여 이를 시설 운영에 대한 인센티브로 활용할 수 있다. 태양광 발전을 통해 확보된 REC는 현물시장 또는 고정가격계약을 통해 거래될 수 있으며, 현물시장 거래 시 발전사업자는 REC 현물시장 가격의 불확실성에 노출된다. 본 연구에서는 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려하여 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점을 분석하기 위해 실물옵션 분석을 실시한다. 분석을 통해 REC 거래 방식을 현물시장 거래에서 고정가격계약 거래로 전환할 수 있는 REC 임계 가격을 산출하였다. 민감도 분석 결과 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려한 경우에는 현물시장 거래가 합리적 거래 방식으로, 불확실성을 고려하지 않은 경우에는 고정가격계약 거래가 합리적 거래 방식으로 나타났다.

**주제어** : 발전사업자, 태양광 발전, 고정가격제도, REC 거래, 실물옵션

**JEL 분류** : C6, D8, Q3

접수일(2020년 2월 27일), 게재확정일(2020년 3월 5일)

<sup>†</sup> 본 논문의 주제 선정 및 연구진행 과정에서 많은 조언을 주신 고려대학교 식품자원경제학과 박호정 교수께 감사의 말씀을 전한다. 더불어 본 논문을 보완하는 데 도움을 주신 두 분의 익명의 심사위원께도 감사의 말씀을 전한다.

\* 대전·세종연구원 세종연구실, 연구위원, 제1저자(e-mail: toju11@naver.com)

\*\* SK텔레콤, SV Innovation 센터, 매니저, 교신저자(e-mail: for385@hanmail.net)

# Study on Optimal Trading Method of REC by Solar Power Generation

Youngsik Nam\* and Jaehyung Lee\*\*

**ABSTRACT :** While the renewable energy portfolio standard (RPS) is in place to expand the scale of renewable energy generation, the power producer can obtain the renewable energy credit (REC) and use it as an incentive to operate the facility. RECs secured by solar power generation can be traded through spot market or fixed price contracts, and, in the spot market trading, power producers are exposed to the uncertainty of REC spot price. In this study, real option analysis is conducted to analyze the optimal threshold of REC spot price for the conversion of REC trading method by power producer considering the uncertainty of REC spot price. We calculated the optimal threshold of REC spot price that can convert the trading method of REC from spot market to fixed price contract. In conclusion, the spot market trading is a rational trading method when considering the uncertainty of REC price, but the fixed price bidding is a rational trading method when not considering the uncertainty of REC price.

**Keywords :** Power Producer, Solar Power Plant, Fixed Price, REC, Real Option

---

Received: February 27, 2020. Accepted: March 5, 2020.

\* Research Fellow, Daejeon Sejong Research Institute, First author(e-mail: toju11@dsi.re.kr)

\*\* Manager, SK Telecom, Corresponding author(e-mail: for385@hanmail.net)

## I. 서론

신재생에너지의 개발 및 촉진을 위한 법·제도의 역사는 22년 정도 되었다. 1988년 시행된 「대체에너지개발촉진법」<sup>1)</sup>은 ‘에너지원의 다양화를 도모하여 국민경제의 건전한 발전과 국민생활의 안정에 이바지’하려는 목적으로 제정되었다. 이후 UN기후변화협약의 발표 및 ‘대체에너지’ 개발 기술이 진보됨에 따라 「대체에너지개발촉진법」은 1998년 「대체에너지개발 및 이용·보급 촉진법」<sup>2)</sup>으로 전문 개정되었다. 동 법령은 법령명에도 나와 있는 바와 같이 대체에너지의 개발뿐만 아니라, 이용 및 보급을 촉진하여 에너지원의 다양화, 대체에너지 산업의 활성화 및 인체나 환경에 해로운 가스의 배출 저감을 목적으로 제정되었다. 그리고 2004년에는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법(이하 ‘신재생에너지법’)<sup>3)</sup>으로 대체에너지 관련법이 전면 개정되었는데, 이는 대체에너지를 신에너지 및 재생에너지로 구분하고, 신·재생에너지 산업의 활성화, 에너지의 안정적인 공급 및 온실가스 배출의 감소를 위한 목적으로 전면 개정되었다.

신재생에너지법에 의거하여 신재생에너지의 이용 및 보급 촉진을 위한 정책수단의 대표적인 예로는 발전차액지원제도(Feed-in-Tariff, FIT) 및 신재생에너지 공급의무화제도(Renewable Energy Portfolio Standard, RPS)가 있다. 2002년 도입된 FIT는 발전사업자가 신재생에너지로 생산한 전기의 거래 가격이 ‘기준 가격’보다 낮은 경우 그 차액(발전차액)을 보조금 지원방식으로 직접 지원하는 제도이다. FIT는 신재생에너지 보급 및 시장형성에는 중요한 수단이나, 장기간(15~20년)에 걸쳐 보조금을 직접적으로 지급해야 하는 구조이고, 2011년부터 정부의 재정부담이 급격히 늘어남에 따라 예산상 문제가 발생하였다(주현수, 2014).

2012년부터는 직접적으로 보조금을 지급하지 않고, 발전사업자가 자신이 공급하는 에너지의 일정 비율을 신재생에너지로 공급 및 판매하도록 하는 RPS를 시행하였다. RPS하에서 의무이행 대상 발전사업자는 직접 신재생에너지를 공급하거나, 신재생에너

1) 「대체에너지개발촉진법(법률 제3990호)」은 1987년 12월 4일 제정되었으며, 1988년 1월 1일부터 시행되었다.

2) 「대체에너지개발 및 이용·보급 촉진법(법률 제5446호)」은 1997년 12월 13일 제정되었으며, 1988년 6월 14일부터 시행되었다.

3) 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법(법률 제7284호)」은 2004년 12월 31일 제정되었으며, 2005년 7월 1일부터 시행되었다.

지 ‘공급인증기관’들이 신재생에너지를 시장에 공급 후 발급받는 ‘신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificates, REC)’를 구매하여 목표를 달성한다.

2017년부터는 태양광 발전사업자들의 안정적인 투자를 위해 태양광 발전전력과 REC를 일정 기간 동안 고정된 가격으로 구매하는 ‘RPS 고정가격계약 경쟁입찰 제도(이하 ‘고정가격계약’)’가 시행되었다. 고정가격계약하에서 경쟁입찰은 1년에 2번 이루어지는데, 입찰 전 공급의무자들이 의뢰한 구매물량을 태양광 발전사업자가 ‘RPS 고정가격계약 경쟁입찰 시스템’을 통해 입찰하는 구조이다(전력거래소, 2018).

전술한 바와 같이 국내의 신재생에너지 법·제도 시행의 역사가 22년 정도 되었기에, 법·제도의 변화에 따라 신재생에너지의 개발, 이용 및 보급에 대한 연구도 지속적으로 이루어졌다. 하지만 RPS 및 고정가격계약은 비교적 최근에 도입된 정책이며, 고정가격계약은 국내의 특수성이 감안된 제도이기에 선행연구들도 국내 연구가 대부분이다. 선행연구를 검토한 결과, RPS 제도하에서의 신재생에너지 시설투자에 대한 경제성(김경식·선우석호, 2011; 이동수 외, 2012; 이경현 외, 2012; 이용봉·김정호, 2015; 선우석호, 2016; 김종완·박상철, 2016; 남영식·강희찬, 2017; 박호정·남영식, 2018; 문용마, 2018 & 2019), REC 가중치(김강원, 2014; 이경민 외, 2016; 김하양 외, 2019) 및 REC 요금제도 개편(송정호 외, 2018)과 관련된 연구가 주를 이루었다.

방법론적 관점에서 신재생에너지 투자와 실물옵션 방법론을 연계한 연구로는 수력(Frode, 2007; Kumbaroğlu et al., 2008; Kim et al., 2017), 태양광(김경식·선우석호, 2011; Deter and Kotani, 2013; Zhang et al., 2014), 풍력(이동수 외, 2012; Deter and Kotani, 2013; Abadie and Chamorro, 2014; Li et al., 2018; 문용마, 2018 & 2019) 및 연료전지(남영식·강희찬, 2017; 박호정·남영식, 2018)에 관한 연구들이 있다.

실물옵션 관련 선행연구에서는 계통한계가격(System Marginal Price, SMP), 배출권 가격, LNG 가격, 발전수익 및 발전소 가치 등 다양한 요소의 확률과정을 고려하여 투자 경제성 분석을 실시하였다. REC 가격의 불확실성을 반영한 연구로는 박호정(2012), 문용마(2018) 및 문용마(2019)가 있다. 박호정(2012)은 화력 발전 투자에 있어서 배출권 시장과 REC 시장의 연계 효과를 배출권 가격 및 REC 가격의 확률과정을 반영하여 분석하였다. 그리고 문용마(2018) 및 문용마(2019)는 풍력 발전 투자에 있어서 발전수익의 불확실성을 고려하여 투자 경제성을 분석하였으며, 발전수익의 한 요소로서 SMP 및

REC 가격을 반영하였다. 남영식·강희찬(2017) 및 박호정·남영식(2018)은 연료전지 발전시설 투자에 대한 경제성을 분석하였는데, 두 경우 모두 REC 가격은 고정된 상태에서 ‘SMP 가격’ 및 ‘LNG 가격’의 확률과정(남영식·강희찬, 2017), ‘SMP 가격’의 확률과정(박호정·남영식, 2018)을 고려하여 분석하였다.

본 연구는 REC 현물시장 가격의 확률과정에 기반한 불확실성을 고려하여 REC 거래 방식의 최적 전환 시점을 분석한다는 측면에서 기존 연구와 차별성을 가진다. 대부분의 기존 연구가 신재생에너지 관련 시설투자 여부에 대한 의사결정을 분석한 것에 반해, 본 연구에서는 신재생에너지 발전사업에 참여하고 있는 발전사업자의 수입 창출 방식 전환에 대한 분석을 진행한다는 측면에서도 차별성을 가진다 할 수 있다. 또한 본 연구는 최근 REC 현물시장 가격 하락의 특성을 반영하여 REC 거래 방식 전환 이슈를 분석한다는 측면에서 의미를 가진다.

연구의 구성은 다음과 같다. II장에서는 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점을 분석할 수 있는 실물옵션 모형에 대한 설명을 진행하였으며, III장에서는 분석에 활용된 주요 분석 자료를 설명하였다. IV장에서는 분석 모형 및 자료를 통해 도출된 분석 결과를 제시하였으며, 최적 전환 시점을 판단할 수 있는 임계 가격을 주요 분석 결과로 제시하였다. 마지막으로 V장에서는 분석 결과를 기반으로 한 결론 및 제언을 제시하였다.

## II. 분석 모형

본 연구에서는 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점을 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려하여 분석하기 위해 실물옵션 모형을 활용하였다. 실물옵션 모형은 비가역성(irreversibility)과 불확실성(uncertainty)이 투자 의사결정에 영향력을 미칠 때 투자자의 최적 의사결정에 대한 기준을 제시할 수 있는 분석방법이다. 실물옵션 모형은 순현재가치법(Net Present Value, NPV)과 상호보완적으로 활용되는 투자 경제성 분석방법으로 NPV보다는 상대적으로 수리적 복잡성이 요구되지만, 분석결과를 통해 투자와 관련된 불확실성을 고려하여 투자자가 보다 엄밀한 관점에서 합리적 의사결정을 내릴 수 있는 정보를 제공한다.

본 연구의 의사결정 대상은 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식이며, 거래 방식은 현

물시장 거래(기존 거래 방식)와 고정가격계약제 거래(변경된 거래 방식)로 구성된다. REC를 현물시장에서 거래할 경우 거래 당사자는 REC의 현물시장 가격 변동성에 노출되므로, 이를 REC 거래 방식 전환에 대한 불확실성으로 고려하였다. 태양광 발전사업자는 REC 거래 방식에 따른 수입을 고려하여 거래 방식을 전환할 수 있으므로, 거래 방식 변경 전 및 후의 REC 거래 수입을 목적식으로 설정하고 REC 현물시장 가격의 확률과정을 조건식으로 하는 분석 모형을 구축하였다. 먼저 REC 현물시장 거래 시 태양광 발전사업자의 REC 거래에 대한 사업가치(project value)  $V_1$ 은 식 (1)과 같으며, 이때  $E_0$ 는  $t = 0$ 에서의 기대연산자를 의미한다.

$$V_1(p_{rec}(t)) = \text{Max } E_0 \int_0^T (\delta p_{rec}(t)q) e^{-rt} dt \quad (1)$$

$p_{rec}(t)$  :  $t$ 기의 REC 현물시장 거래 가격

$q$  : 태양광 발전시설 연간 발전량

$\delta$  : 태양광 발전 REC 가중치

$r$  : 연간 할인율

$T$  : REC 거래 기간

$p_{rec}(t)$ 의 확률과정은 식 (2)와 같이 기하 브라운 운동(Geometric Brownian Motion, GBM)을 반영하였으며,  $\alpha$ 와  $\sigma$ 는  $p_{rec}(t)$ 의 기대 증가율(drift rate)과 순간 변동률(instantaneous volatility rate)을 의미하고  $dw(t)$ 는 위너 증분(Wiener increment)으로 순간 변동률의 무작위성을 결정하는 역할을 한다.

$$dp_{rec}(t) = \alpha p_{rec}(t)dt + \sigma p_{rec}(t)dw(t) \quad (2)$$

$\alpha$  :  $p_{rec}(t)$ 의 기대 증가율

$\sigma$  :  $p_{rec}(t)$ 의 순간 변동률

식 (1) 및 식 (2)를 고려하여 REC 현물시장 거래의 사업가치  $V_1$ 을 식 (3)과 같이 전개할 수 있으며, 식 (3)의  $p_{rec}$ 는  $t = 0$ 에서의 REC 현물시장 가격을 의미한다.

$$V_1(p_{rec}) = \int_0^T (\delta p_{rec} q) e^{-(r-\alpha)t} dt = \frac{\delta p_{rec} q}{r-\alpha} [1 - e^{-(r-\alpha)T}] \quad (3)$$

다음으로 고정가격계약 거래 시 태양광 발전사업자의 REC 거래에 대한 사업가치  $V_2$ 는 식 (4)와 같으며,  $p_f$  및  $p_{smp}$ 는 각각 고정가격계약 거래 시의 총 거래 가격 및 SMP를 의미한다. 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격  $p_f$ 는 전력판매 금액에 해당하는 SMP와 REC 가격의 합으로 이루어져 있으므로, 고정가격계약 거래 시 REC 가격은  $p_f$ 에서  $p_{smp}$ 를 제외한 값으로 나타낼 수 있다.<sup>4)</sup>

$$V_2(p_f, p_{smp}) = \int_0^T [\delta(p_f - p_{smp})q] e^{-rt} dt = \left[ \frac{\delta(p_f - p_{smp})q}{r} \right] [1 - e^{-rT}] \quad (4)$$

$p_f$ : 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격

$p_{smp}$ : SMP

신·재생에너지공급의무화제도 2019년 하반기 고정가격계약 경쟁입찰 공고에 따르면, 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격은 입찰 대상자가 입찰한 ‘SMP+IREC가격(원/MWh)<sup>5)</sup>’으로 결정된다. ‘SMP+IREC가격(원/MWh)’은 경쟁입찰 공고에 제시된 상한 가격의 제한을 받으며, 본 연구에서는 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격을 경쟁입찰 공

- 
- 4) 이때  $p_f$ 는 고정가격계약 거래 시 반영되는 총 거래 가격이므로, 시간의 흐름에 따른 변화가 반영되지 않는 상수의 특성을 가진다. 본 연구는 REC 현물시장 가격의 하락 추세를 고려하여 REC 거래 방식 전환 문제를 분석하는 것에 초점을 맞추고 있으므로, SMP 또한 최근 평균 가격으로 반영하여 상수로 취급하였다.
- 5) 고정가격계약 경쟁입찰 시 계약 방식은 ‘SMP+IREC가격(원/MWh)’와 ‘SMP+IREC가격×가중치(원/MWh)’가 있다. ‘SMP+IREC가격(원/MWh)’는 입찰자의 입찰가격에 기반하며, ‘SMP+IREC가격×가중치(원/MWh)’는 전력거래소(KPX)의 상한가격 산정위원회의 의견을 받아 한국에너지공단(KEA)의 RPS 운영위원회에서 제시한 기준 SMP와 입찰 참여서 신청 내용을 기준으로 산정된 가중치로 산출된다. 본 연구에서는 ‘SMP+IREC가격(원/MWh)’를 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격으로 간주하며, 경쟁입찰 공고에 제시된 상한가격을 기준 총 거래 가격  $p_f$ 로 한다.

고에 제시된 상한가격으로 간주한다.

태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시기를 분석하기 위해서는 거래 방식 전환의 가치를 의미하는 옵션가치 또한 고려해야 한다. REC 거래 방식의 경우 현물시장 거래는 기존 거래 방식으로, 고정가격계약 거래는 전환 이후 거래 방식으로 간주하였으며, 거래 방식 전환에 대한 옵션가치  $F$ 는 식 (5)와 같다.<sup>6)</sup> 기존의 대부분 실물옵션 분석에서는 불확실성이 반영된 요소의 값이 증가할수록 행위 주체의 의사결정에 대한 가치를 의미하는 옵션가치가 증가한다. 하지만 본 연구에서는 불확실성이 반영된 REC 현물시장 가격이 높아질수록 현물시장 거래에서 고정가격계약 거래로 전환할 유인이 낮아지므로, REC 현물시장 가격이 높아질수록 거래 방식 전환에 대한 가치인 옵션가치가 낮아져서 식 (5)와 같은 형태를 가진다.

$$F(p_{rec}) = Ap_{rec}^{-\beta} \quad (5)$$

식 (5)는 이토 보조정리(Ito's lemma)와 해밀톤-자코비-벨만(Hamilton-Jacobi-Bellman, HJB) 방정식에 의해 식 (6)<sup>7)</sup>과 같이 정리할 수 있다.<sup>8)</sup>

$$rF(p_{rec}) = \alpha p_{rec} F(p_{rec})_{p_{rec}} + \sigma p_{rec}^2 F(p_{rec})_{p_{rec}p_{rec}} \quad (6)$$

식 (5)에 제시된 거래 방식 전환에 대한 옵션가치  $F$ 를 식 (6)에 대입하면 다음의 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{2}\sigma^2\beta^2 + \left(\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha\right)\beta - r = 0 \quad (7)$$

- 
- 6) 옵션가치의 특성은  $A > 0, \beta > 0$ 인 경우에 만족한다.
  - 7) 식 (6)의  $F(p_{rec})_{p_{rec}}$  는 옵션가치  $F$ 의  $p_{rec}$  에 대한 1계 미분율,  $F(p_{rec})_{p_{rec}p_{rec}}$  는 옵션가치  $F$ 의  $p_{rec}$  에 대한 2계 미분율을 의미한다.
  - 8) 이토 보조정리는 확률 미분방정식에서의 테일러 전개로 이해될 수 있으며, 해밀톤-자코비-벨만(HJB) 방정식은 현재의 가치를 현재의 보상과 미래의 기대가치로 나타낸다. 이들 내용에 대한 부가적인 설명은 박호정(2018)의 2장 이토 보조정리 및 HJB 방정식을 참고할 수 있다.



특성근(characteristic root)  $\beta$ 에 대한 2차식으로 구성된 식 (7)을 통해, 2개의  $\beta$  ( $\beta_1 > \beta_2, \beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ )가 해로 도출될 수 있으며, 이에 따라 옵션가치는  $F(p_{rec}) = A_1 p_{rec}^{-\beta_1} + A_2 p_{rec}^{-\beta_2}$ 와 같이 나타낼 수 있다. REC 거래 방식 전환에 대한 옵션가치는 REC 현물시장 가격이 증가할수록 감소하므로,  $p_{rec}$ 가 무한대( $\infty$ )에 가까워질 때  $\lim_{p_{rec} \rightarrow \infty} F(p_{rec}) = 0$ 을 만족해야 한다. 하지만 특성근  $\beta$ 가 0보다 작을 경우에는 이 조건이 만족되지 못하므로 2개의  $\beta$ 값 중 양의 해만 적용 가능하며( $A_2 = 0$ ), 이때  $\beta$ 는 식 (8)과 같다.

$$\beta = \left( \frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right) + \sqrt{\left( \frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (8)$$

태양광 발전사업자 입장에서 REC 거래 방식의 최적 전환 시점은 변경된 거래 방식 선택 시의 순사업가치<sup>9)</sup>와 옵션가치가 동일한 등가조건(value matching condition), REC 현물시장 가격  $p_{rec}$ 에 대한 한계 순사업가치와 한계 옵션가치가 동일한 한계조건(smooth pasting condition)에서 결정된다. 등가조건 및 한계조건은 식 (9) 및 식 (10)과 같다.

$$\text{등가조건: } F = V_2 - V_1 \quad (9)$$

$$\text{한계조건: } F_{p_{rec}} = V_{2, p_{rec}} - V_{1, p_{rec}} \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)을 동시에 만족하는  $p_{rec}^*$ 를 REC 현물시장 임계 가격(이하 ‘임계 가격’)이라 하며, 이는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

9) REC 거래 방식 전환 시 공식적인 전환비용은 없으므로, 본 연구에서는 거래 방식 전환비용은 발생하지 않는 것으로 간주한다.

$$p_{rec}^* = \left( \frac{\beta}{\beta+1} \right) \left( \frac{r-\alpha}{1-e^{-(r-\alpha)T}} \right) \left[ \left( \frac{p_f - p_{smp}}{r} \right) (1 - e^{-rT}) \right] \quad (11)$$

임계 가격  $p_{rec}^*$ 는 REC 현물시장 가격  $p_{rec}$ 의 불확실성을 고려했을 때 고정가격계약 거래로 전환 시 태양광 발전사업자가 이전 거래 방식보다 더 많은 REC 거래 수입을 확보할 수 있는 기준 가격을 의미한다. 이는 REC 현물시장 가격  $p_{rec}$ 가 임계 가격  $p_{rec}^*$  이하 일 때 태양광 발전사업자가 고정가격계약 거래로 전환하는 것이 합리적임을 의미한다.<sup>10)</sup>

$\left( \frac{\beta}{\beta+1} \right)$ 은 REC 현물시장 가격  $p_{rec}$ 의 불확실성이 임계 가격에 미치는 영향을 의미하므로, 식(11) 중  $\left( \frac{\beta}{\beta+1} \right)$ 을 제외한 나머지 구성요소들은  $p_{rec}$ 의 불확실성이 반영되지 않은 임계 가격으로 분석결과에서  $p_{rec, npv}^*$ 로 제시한다.

### III. 분석 자료

본 연구에서는 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점을 거래 방식 전환에 따른 REC 거래 수입을 비교하여 분석하므로, REC 현물시장 가격을 주요 분석 자료로 활용하였다.<sup>11)</sup> REC 현물시장 가격은 태양광 및 비태양광으로 구분되어 제시되었으나 2016년 3월부터 통합 REC 가격으로 공표되고 있어, 분석에 활용된 REC 현물시장 가격은 2016년 3월 이후의 가격을 적용하였다.<sup>12)</sup>

고정가격계약 거래 시에는 입찰자들의 입찰 가격에 기반하여 총 거래 가격이 결정되

- 
- 10) 실물옵션 분석에서 불확실성이 반영된 요소의 값이 증가할수록 행위 주체의 의사결정에 대한 가치인 옵션가치가 증가하는 경우에는 해당 요소의 값이 임계 가격 이상일 때 의사결정을 내리는 것이 합리적이라 할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 불확실성이 반영된 요소인 REC 현물시장 가격이 낮아질수록 REC 거래 방식을 현물시장 거래에서 고정가격계약 거래로 전환할 유인이 커지므로, REC 현물시장 가격이 도출된 임계 가격 이하일 경우에 거래 방식 전환이 합리적인 것으로 해석될 수 있다. 본 연구의 분석 결과 해석 방식은 일반적인 실물옵션 분석 결과 해석 방식과 다르기 때문에 분석 결과 해석 시 본 각주의 설명을 참고할 필요가 있다.
  - 11) 태양광 발전시설 운영 시 전력판매 수입 및 발전시설 운영비용 또한 발생하지만, 이와 관련된 수입 및 비용은 거래 방식 전환 여부와 상관없이 동일하기 때문에 분석 시 활용하지 않았다.
  - 12) REC 현물시장 가격은 지역에 따라 육지 및 제주도로 구분하여 제시하고 있으며, 본 연구에서는 지역별 통합 가격을 적용하였다.

는데, 이때 입찰 가격에는 상한가격이 존재한다. 본 연구에서는 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격을 입찰 가격의 상한가격으로 간주하며, 2019년 하반기 고정가격계약 경쟁 입찰 공고에 제시된 상한가격을 총 거래 가격으로 적용하였다.<sup>13)</sup> 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격  $p_f$ 의 구성 요소 중 하나인 SMP( $p_{smp}$ )는 2019년 월평균 통합 가격을 적용하였다.

REC 현물시장 거래 시에는 한정된 거래 기간이 존재하지 않지만, 고정가격계약 거래 시에는 20년이라는 제한된 기간이 존재하므로 거래 기간은 20년<sup>14)</sup>으로 적용하였다. 연간 할인율은 이철용·이민규(2019)에서 제시된 사업용 태양광 발전설비 원가구조 분석 시 한국 사례의 할인율 5.5%를 적용하였다. 주요 분석 자료는 <표 1>과 같이 정리할 수 있다.

<표 1> 주요 분석 자료

구분	값	비고
현물시장 가격 ( $p_{rec}$ )	64,938(원/MWh) <sup>15)</sup>	- 2019년 1월~11월 월평균 가격 - 자료: 신재생원스톱 사업정보 통합포털 - 참고: REC 현물시장 가격의 확률과정 관련 파라미터 도출 시 2016년 3월~2019년 11월 자료를 활용하였으며, 2019년 월평균 가격은 현재 REC 가격으로 간주함
고정가격계약 총 거래 가격 ( $p_f$ )	180,560(원/MWh)	- 2019년 하반기 고정가격계약 경쟁입찰 공고에 제시된 상한가격
계통한계가격 (SMP, $p_{smp}$ )	91,040(원/MWh)	- 2019년 1월~11월 월평균 가격 - 자료: 전력통계정보시스템
고정가격계약 거래 기간 ( $T$ )	20년	- 2019년 하반기 고정가격계약 경쟁입찰 공고에 제시된 태양광 고정가격계약 시 거래 기간
할인율( $r$ )	5.5%	- 이철용·이민규(2019)에 제시된 할인율

13) 입찰 가격에 대한 설명은 분석모형에 제시된 설명을 참고할 수 있다. 고정가격계약 거래 시 입찰 가격의 상한가격은 기준 거래 가격으로 간주하였다.

14) 고정가격계약 거래는 태양광 및 태양광 연계 ESS 사업자가 참여할 수 있으며, 태양광의 경우 20년, 태양광 연계 ESS의 경우 15년으로 거래 기간이 다르다. 본 연구에서는 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점을 분석하기 때문에 20년을 거래 기간으로 하였다.

15) 발전량 대비 REC 환산식에 따르면, 1REC는 1MWh와 같은 단위로 해석될 수 있으므로, 입계 가격 도출 시 REC 현물시장 가격의 단위는 ‘원/MWh’로 적용한다.

REC 거래 방식 전환에 따른 거래 수입의 불확실성은 REC 현물시장 가격의 확률과정으로 반영하였으며, 이와 관련된 파라미터는 2016년 3월부터 2019년 11월까지의 REC 현물시장 가격 시계열 자료를 통해 산출하였다.<sup>16)</sup>

본 연구의 분석 모형에서는 REC 현물시장 가격의 확률과정을 GBM으로 간주하였기 때문에, 실제 분석에 활용된 자료가 GBM의 확률과정을 가지는지에 대한 검증이 필요하다. 이에 대한 검증은 단위근 검정(unit root test)으로 할 수 있으며, 단위근을 가질 경우 REC 현물시장 가격이 GBM의 확률과정을 따른다고 할 수 있다. REC 현물시장 가격에 대한 단위근 검정을 실시한 결과 REC 현물시장 가격에 단위근이 존재하는 것으로 나타났다으며, 이를 통해 REC 현물시장 가격은 GBM의 확률과정을 따른다고 할 수 있다. 단위근 검정 결과<sup>17)</sup>는 <표 2>와 같다.

<표 2> 단위근 검정 결과

구분	t-값	p-값
ADF 검정 통계	0.035033	0.9567
임계값	1%	-3.588509
	5%	-2.929734
	10%	-2.603064

#### IV. 분석 결과

본 연구에서는 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점 결정의 기준을 분석 모형에서 설명한 임계 가격  $p_{rec}^*$ 로 제시하였으며, REC 현물시장 가격이  $p_{rec}^*$  이하일 경우 REC 거래 방식을 현물시장 거래에서 고정가격계약 거래로 전환하는 것이 합리적인 것으로 해석할 수 있다.

16) 분석 모형에 제시된 변수들은 연단위 평균 값으로 구성되어 있어, REC 현물시장 가격의 확률과정과 관련된 파라미터는 월단위 자료에 기반하여 산출한 뒤 연단위 자료로 변환하였다. REC 현물시장 가격의 시계열 자료를 활용하여 확률과정 관련 파라미터를 산출하므로, 표본 수 확보 측면에서 월단위 자료를 기본으로 하였다.

17) 단위근 검정은 E-views8을 통해 실시하였으며, 상수항을 고려하여 ADF(Augmented Dickey Fuller) 검정방식으로 진행하였다.

REC 임계 가격  $p_{rec}^*$ 를 산출하기 위해서는 REC 현물시장 가격  $p_{rec}$ 의 확률과정에 대한 파라미터가 필요하다. 확률과정 파라미터에 해당하는 기대 증가율  $\alpha$  및 순간 변동률  $\sigma$ 는 분석 자료에서 설명한 바와 같이 2016년 3월부터 2019년 11월까지의  $p_{rec}$  시계열 자료를 통해 산출하였으며, 관련 파라미터 산출 시 Tsay(2001)에 제시된 방식을 적용하였다.  $y_t = \ln\left(\frac{p_t}{p_{t-1}}\right)$ 일 때  $E_{y_t}$ 를  $y_t$ 의 평균이라 하고  $S_{y_t}$ 를  $y_t$ 의 표준편차라고 하면 기대 증가율  $\alpha$  및 순간 변동률  $\sigma$ 는 다음 식 (12) 및 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으며, 기대 증가율  $\alpha$ 는 -0.1691, 순간 변동률  $\sigma$ 는 0.2520로 나타났다.<sup>18)</sup>

$$\alpha = E_{y_t} + \frac{S_{y_t}^2}{2} \quad (12)$$

$$\sigma = S_{y_t} \quad (13)$$

할인율 5.5%, 고정가격계약 총 거래 가격( $p_f$ ) 180,560(원/MWh), SMP( $p_{smp}$ ) 91,040(원/MWh), 기대 증가율( $\alpha$ ) -0.1691, 순간 변동률( $\sigma$ ) 0.2520인 경우의 임계 가격  $p_{rec}^*$ 를 기준 임계 가격으로 간주할 수 있으며, 분석 결과 51,235(원/MWh)로 나타났다. 이는 REC 현물시장 가격  $p_{rec}$ 의 가격 불확실성을 고려한다면 REC 현물시장 가격이 51,235(원/MWh) 이하일 경우 태양광 발전사업자가 REC 거래 방식을 현물시장 거래에서 고정가격계약 거래로 전환하는 것이 합리적임을 의미한다. 2019년(1월~11월) 월평균 REC 현물시장 가격 64,938(원/MWh)을 최근 REC 현물시장 가격으로 간주할 때 해당 가격이 기준 임계 가격 이상이므로, 이 분석 결과는 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려할 경우 현재 시점에서 태양광 발전사업자가 REC 거래 방식을 현물시장 거래로 유지하는 것이 합리적이라고 해석할 수 있다.

본 연구에서는 임계 가격  $p_{rec}^*$ 에 영향을 미칠 수 있는 요소들에 대한 민감도 분석 또한 실시하였다. 먼저 할인율에 대한 민감도 분석 결과를 살펴보면, 다음 <표 3>과 같다.

18) 식 (12) 및 식 (13)에 제시된 식은 연단위 자료 적용 시의 기대 증가율  $\alpha$  및 순간 변동률  $\sigma$ 의 산출방법이며, 본 연구에서는 월단위 자료에 기반하므로 파라미터 산출 시 단위 변환을 적용하였다.

〈표 3〉 민감도 분석 결과(할인율 기준)

할인율(%)	$p_{rec}^*$ (원/MWh)	$p_{rec}^*/p_{rec}$
3.5	38,781	0.5972
4.5	45,633	0.7027
5.5	51,235	0.7890
6.5	55,822	0.8596
7.5	59,583	0.9175

<표 3>에 제시된 분석 결과는 할인율이 증가할수록 임계 가격  $p_{rec}^*$ 가 증가함을 보여 준다. REC 현물시장 가격이 임계 가격 이하일 때 고정가격계약 거래에 대한 전환 유인이 존재하므로, 거래 방식 전환 여부 결정의 기준이 되는 임계 가격 수준이 높아진다는 것은 전환 시점이 앞당겨지는 것으로 해석할 수 있다.

할인율 변화에 따른  $p_{rec}^*$ 의 구성 항목 변화를 살펴보면, 할인율이 증가할수록 식 (11)에 제시된  $p_{rec}^*$ 의 3개 항목 중  $\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)$ (이하 ‘첫 번째 항목’)과  $\left(\frac{r-\alpha}{1-e^{-(r-\alpha)T}}\right)$ (이하 ‘두 번째 항목’)은 증가하지만,  $\left[\left(\frac{p_f}{r}\right)(1-e^{-rT})\right]$ (이하 ‘세 번째 항목’)은 감소하는 것으로 나타났다. 할인율 증가에 따른 첫 번째 항목과 두 번째 항목의 증가 규모가 세 번째 항목의 감소 규모보다 큰 것으로 나타나, 할인율 증가 시 임계 가격 또한 증가함을 확인할 수 있다. <표 3>의 분석 결과 중  $p_{rec}^*/p_{rec}$ 는 각 할인율하에서 산출된  $p_{rec}^*$ 에 최근 REC 현물시장 가격을 나눈 값이다. 최근 REC 현물시장 가격이 임계 가격  $p_{rec}^*$ 보다 낮을 경우 REC 거래 방식을 고정가격계약 거래로 전환하는 것이 합리적이며, 이때  $p_{rec}^*/p_{rec}$ 는 1 이상의 값을 가진다. <표 3>에서 각 할인율하에서의  $p_{rec}^*/p_{rec}$ 는 모두 1 이하로 나타났다으며, 이는 태양광 발전사업자가 REC 거래 방식을 현물시장 거래로 유지하는 것이 합리적임을 의미한다.

다음으로 고정가격계약 거래 기간에 대한 민감도 분석 결과를 살펴보면, <표 4>와 같다.

<표 4>에 제시된 분석 결과는 고정가격계약 거래 기간이 증가할수록 임계 가격  $p_{rec}^*$ 가 증가함을 보여준다. 고정가격계약 거래 기간 변화에 따른  $p_{rec}^*$ 의 구성 항목 변화를 살펴보면, 거래 기간이 증가할수록  $p_{rec}^*$ 의 3개 항목 중 첫 번째 항목은 변화가 없으며 두

〈표 4〉 민감도 분석 결과(고정가격계약 거래 기간 기준)

거래 기간(년)	$p_{rec}^*$ (원/MWh)	$p_{rec}^*/p_{rec}$
10	35,947	0.5536
15	44,188	0.6805
20	51,235	0.7890
25	56,942	0.8769
30	61,422	0.9459

번째 항목은 감소하고 세 번째 항목은 증가하는 것으로 나타났다. 거래 기간 증가에 따른 두 번째 항목의 감소 규모보다 세 번째 항목의 증가 규모가 큰 것으로 나타나, 거래 기간 증가 시 임계 가격 또한 증가함을 확인할 수 있다. <표 4>에서 각 할인율하에서의  $p_{rec}^*/p_{rec}$ 는 모두 1 이하로 나타났으며, 이는 <표 3>의 결과와 마찬가지로 태양광 발전 사업자가 REC 거래 방식을 현물시장 거래로 유지하는 것이 합리적임을 의미한다.

다음으로 고정가격계약 거래 시 REC 가격에 대한 민감도 분석 결과를 살펴보면 <표 5>와 같으며, 이때 REC 가격은 총 거래 가격  $p_f$ 에서  $SMP(p_{smp})$ 를 제외한 가격을 의미한다.

〈표 5〉 민감도 분석 결과(고정가격계약 거래 시 REC 가격 기준)

거래 가격(원/MWh)	$p_{rec}^*$ (원/MWh)	$p_{rec}^*/p_{rec}$
기준 가격 대비 10% 감소	46,112	0.7101
기준 가격 대비 5% 감소	48,673	0.7495
기준 가격	51,235	0.7890
기준 가격 대비 5% 증가	53,797	0.8284
기준 가격 대비 10% 증가	56,359	0.8679

<표 5>에 제시된 분석 결과는 고정가격계약 거래 시 REC 가격이 증가할수록 임계 가격  $p_{rec}^*$ 가 증가함을 보여준다. REC 가격 변화에 따른  $p_{rec}^*$ 의 구성 항목 변화를 살펴보면, REC 가격이 증가할수록  $p_{rec}^*$ 의 3개 항목 중 첫 번째 항목과 두 번째 항목은 변화가 없으며 세 번째 항목은 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 REC 가격 증가 시 임계 가

격 또한 증가함을 확인할 수 있다. <표 5>에서 각 REC 가격하에서의  $p_{rec}^*/p_{rec}$ 는 모두 1 이하로 나타났으며, 이는 <표 3> 및 <표 4>의 결과와 마찬가지로 태양광 발전사업자가 REC 거래 방식을 현물시장 거래로 유지하는 것이 합리적임을 의미한다.

할인율과 고정가격계약 거래 기간 및 REC 가격에 대한 임계 가격  $p_{rec}^*$ 의 민감도 분석 결과와 최근 REC 현물시장 가격을 종합적으로 비교한 결과, 최근 REC 현물시장 가격 수준에서는 태양광 발전사업자들이 REC 거래 방식을 고정가격계약 거래가 아닌 현물시장 거래로 유지하는 것이 합리적인 것으로 나타났다.

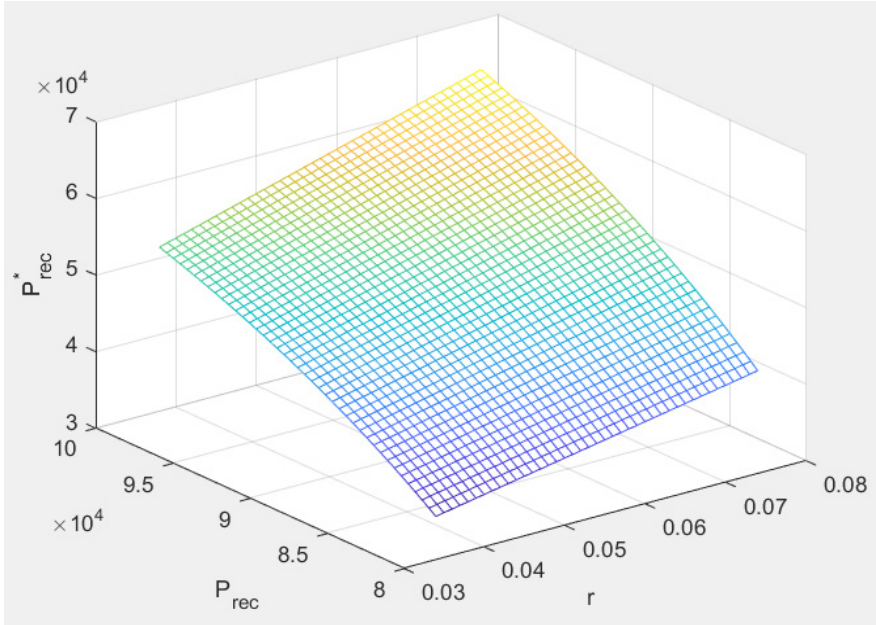
본 연구에서는 REC 현물시장 가격의 불확실성이 반영되지 않은 임계 가격  $p_{rec, npv}^*$ 에 대한 분석 또한 진행하였다. 이때 기준 임계 가격은 246,080(원/MWh), 최근 REC 현물시장 가격에 대한 기준 임계 가격의 비율  $p_{rec, npv}^*/p_{rec}$ 는 3.7895로 산출되었다. 할인율과 고정가격계약 거래 기간 및 REC 가격에 대한 민감도 분석 또한 실시하였으며, 그 결과 모든 민감도 분석 범위에 있어서  $p_{rec, npv}^*/p_{rec}$ 가 1 이상인 것으로 나타났다. 이는 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려하지 않을 경우, 태양광 발전사업자가 REC 거래 방식을 현물시장 거래에서 고정가격계약 거래로 전환하는 것이 합리적임을 의미한다.

본 연구의 민감도 분석 결과를 통해 REC 현물시장 가격의 불확실성 반영 여부에 따라 태양광 발전사업자의 최적 REC 거래 방식이 달라질 수 있음을 확인할 수 있다.

민감도 분석 결과에 대한 직관적인 이해를 돕기 위해 REC 현물시장 가격 불확실성을 반영한 경우의 임계 가격 변화를 3차원 그래프로 시각화하였으며, 할인율( $r$ ) 및 고정가격계약 거래 시 REC 가격( $p_{rec}$ ) 변화에 따른 임계 가격 변화는 <그림 1>과 같다. <그림 1>에 제시된 분석 결과를 통해, 할인율( $r$ ) 및 고정가격계약 거래 시 REC 가격( $p_{rec}$ )의 일부 조합( $r(0.075)$ ,  $p_{rec}$ (기준 가격 대비 20% 증가))에서는 REC 현물시장 가격의 불확실성을 반영하더라도 최적 REC 거래 방식이 고정가격계약 거래임을 확인할 수 있다. 이를 통해 REC 현물시장 가격 하락 등으로 최근 REC 현물시장 가격 수준이 낮아진다면, 고정가격계약 거래가 태양광 발전사업자의 최적 REC 거래 방식이 되는 경우가 더 많아질 것으로 예상할 수 있다.



〈그림 1〉 민감도 분석 결과 그래프



## V. 결론 및 제언

본 연구에서는 태양광 발전사업자의 REC 거래 방식 최적 전환 시점에 대한 분석을 통해, 거래 방식 전환의 기준이 되는 REC 현물시장 임계 가격  $p_{rec}^*$ 를 산출하였다. 임계 가격  $p_{rec}^*$  산출 시 다양한 상황에서의 임계 가격 정보를 제공하기 위해, 할인율과 고정가격계약 거래 기간 및 REC 가격 변화에 따른 민감도 분석 또한 실시하였다.

민감도 분석 결과, 태양광 발전사업자가 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려하여 REC 거래 방식을 결정할 경우 현물시장 거래를 유지하는 것이 바람직하며, REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려하지 않을 경우 고정가격계약 거래로 전환하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 이는 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려할 경우 태양광 발전사업자 입장에서 REC 거래 방식 전환에 대한 의사결정이 보다 신중하게 이루어질 필요가 있음을 의미한다.

본 연구의 분석 결과는 태양광 발전사업자들의 REC 거래 방식 선택에 관한 시사점을 제시할 수 있다. 태양광 발전사업자는 발전시설 운영에 따른 수입 보전을 위해, 전력생산 규모에 비례하여 발급받은 REC를 현물시장에서 거래하여 전력판매 수입 외에 추가 수입을 확보할 수 있으나, 최근 들어 REC 현물시장 하락세가 지속되면서 소형 태양광 발전사업자를 중심으로 발전시설 운영에 관한 어려움을 호소하고 있는 실정이다. 태양광 발전사업자는 REC 거래를 위해 현물시장 거래 외에 고정가격계약 거래에도 참여할 수 있으나, 고정가격계약 경쟁입찰의 경우 매년 높아지는 경쟁률로 인해 참여하지 못하는 발전사업자들이 여전히 많다.

민감도 분석 결과에 따르면 REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려할 경우 현재 REC 현물시장 가격 수준에서는 태양광 발전사업자들의 REC 거래 방식으로 현물시장 거래가 바람직한 것으로 나타났다. 그러나 REC 현물시장 가격의 하락세가 이어지거나 민감도 분석 요소(할인율, 고정가격계약 거래 기간 및 REC 가격)의 범위 조합에 따라, REC 현물시장 가격의 불확실성을 고려하더라도 고정가격계약 거래가 향후 REC의 최적 거래 방식이 될 것으로 예상된다. 이를 고려할 때 고정가격계약 제도에 참여하지 못하는 소형 태양광 발전사업자들에 대한 대책 마련이 필요하다 할 수 있다.

정부는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 고정가격계약 경쟁입찰 용량 확대, REC 현물시장 매도 및 매입의 상한한 한도 축소 등의 대책을 마련하고 있으나, REC 수급상황이 개선될 수 있도록 중장기적 관점에서 REC 거래 제도를 개선할 필요가 있다. 특히 향후 REC 관련 제도 개선 시, 소형 태양광 발전사업자와 같은 공급자 입장뿐만 아니라 의무 이행 대상자인 수요자 입장도 고려한 개선 방안이 마련되어야 할 것이다.

본 연구는 REC의 고정가격계약 거래 시 총 거래 가격을 입찰자의 입찰금액이 아닌 2019년 하반기 공시 상한가격으로 설정하였다는 측면에서 분석의 한계를 가진다. 이를 보완하기 위해 고정가격계약 거래 시 REC 거래 가격에 대한 민감도 분석을 실시하여, 기준 가격 외에 다른 가격 수준에서의 임계 가격에 대한 정보를 제공하였다. 또한 본 연구에서는 REC 현물시장 가격이 GBM의 확률과정을 따르는 것으로 가정하였으나, 이 확률과정은 분석 자료의 범위 설정에 따라 평균회귀과정(Mean Reverting Process, MRP)을 따를 수도 있다. MRP의 확률과정을 따를 경우 분석해 도출이 어려우므로 수치 해석적 방법으로 임계 가격을 도출해야 하는 데, 각기 다른 확률과정을 고려한 REC 거

래 방식 최적 전환 시점 분석에 관한 연구가 차후에 진행될 경우 본 연구 결과와 비교하여 의미있는 시사점 도출이 가능할 것으로 기대된다.

REC 거래 방식 선택에 대한 태양광 발전사업자의 실제 의사결정은 종합적인 상황 판단을 통해 이루어지겠지만 거래 방식 선택에 따른 REC 거래 수입과 현물시장 가격의 불확실성을 고려하여 REC 거래 방식 최적 전환에 관한 기준을 제시했다는 점에서, 본 연구의 분석 결과는 발전사업자의 REC 거래 방식 선택 시 참고자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

## [References]

- 김강원·김발호, “ESS 부가 설치형 REC 가중치 산정에 관한 연구”, 『에너지공학』, 제23권 제4호, 2014, pp. 106~111.
- 김경남·선우석호, “태양광사업에 내재된 실물옵션 가치에 관한 연구: 아주에너지(주) 사례를 중심으로”, 『Korea Business Review』, 제15권 제2호, 2011, pp. 101~139.
- 김종완·박상철, “의무할당제도 개선을 통한 신재생에너지 산업의 발전 전략: 태양광, 풍력에너지 중심”, 『에너지공학』, 제25권 제4호, 2016, pp. 110~123.
- 김하양·김수덕·김현구, “경제성 평가를 통한 태양광발전기와 연계된 배터리 에너지저장장치 최적 용량 산정”, 『신재생에너지』, 제15권 제4호, 2019, pp. 39~46.
- 남영식·강희찬, “투입 및 산출 요소 확률과정을 고려한 연료전지 발전시설 최적 투자관리 연구”, 『경제학연구』, 제65권 제3호, 2017, pp. 77~108.
- 문용마, “Real Option 모형을 활용한 풍력발전 에너지 저장장치 추가의 최적 투자 분석”, 『경영과학』, 제36권 제1호, 2019, pp. 51~66.
- 문용마, “수익 불확실성하의 풍력발전 최적 투자 시점 분석: Real Option 모형을 활용”, 『한국경영과학회지』, 제43권 제3호, 2018, pp. 1~14.
- 박호정, “실물옵션 모형을 이용한 RPS와 배출권거래제 연계의 신재생에너지 투자효과”, 『자원·환경경제연구』, 제21권 제2호, 2012, pp. 301~319.
- 박호정, 『실물옵션과 투자분석』, 리얼포털, 2018.
- 박호정·남영식, “전력가격 평균회귀성을 고려한 연료전지 발전의 실물옵션 분석”, 『자원·환

- 경경제연구, 제27권 제4호, 2018, pp. 613~637.
- 신우석호, “REC 가격변동이 태양광투자에 미치는 영향에 대한 실증분석”, 「신재생에너지」, 제12권 제3호, 2016, pp. 156~164.
- 송정호·서근원·강윤묵, “태양광 발전시장 확대를 위한 용량요금제의 도입”, 「한국태양광발전학회지」, 제4권 제1호, 2018, pp. 35~41.
- 이경민·오혜진·강학모·정동열·최수임, “REC 가중치 변동에 따른 산림 내 임지잔재 경제성 분석”, 「산림경제연구」, 제23권 제2호, 2016, pp. 9~17.
- 이경현·박재희·진정운·권기린·최경현, “민감도 분석을 적용한 제주 연안 풍력단지 설계의 경제성 분석”, 「한국동력기계공학회지」, 제16권 제5호, 2012, pp. 13~19.
- 이동수·윤석준·김상민·정기호, “실물옵션을 이용한 해상풍력실증단지 사업의 경제성 평가”, 「에너지경제연구」, 제11권 제2호, 2012, pp. 1~26.
- 이동수·정기호, “실물옵션을 활용한 화력발전회사의 CO<sub>2</sub> 감축대안의 경제성 평가: CCS와 RPS 이행의 비교”, 「자원·환경경제연구」, 제20권 제1호, 2011, pp. 61~100.
- 이용봉·김정호, “태양광/풍력 연계 기반의 ESS 경제성 분석”, 「에너지공학」, 제24권 제3호, 2015, pp. 74~81.
- 이철용·이민규, “사업용(100kW) 태양광 발전설비 원가구조 분석: 한국, 독일, 중국 사례를 중심으로”, 「신재생에너지」, 제15권 제2호, 2019, pp. 31~41.
- 주현수, “RPS 제도 개선 및 효과”, 「전기저널」, 2014년 12월호, 2014, pp. 16~20.
- 전력거래소, 전력통계정보시스템, <http://epsis.kpx.or.kr>
- 전력거래소, 『태양광 발전사업 안내서』, 2018.
- 전력거래소·한국전력·한국에너지공단, 신재생 원스톱 사업정보 통합포털, <http://onerec.kmos.kr>
- Abadie, L. M., and J. M. Chamorro, “Valuation of Wind Energy Projects: A Real Options Approach,” *Energies*, Vol. 7, No. 5, 2014, pp. 3218~3255.
- Detert, N., and K. Kotani, “Real Options Approach to Renewable Energy Investments in Mongolia,” *Energy Policy*, Vol. 56, 2013, pp. 136~150.
- Kim, K. S., H. B. Park, and H. K. Kim, “Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, 2017, pp. 918~926.
- Kjaerland, F., “A Real Option Analysis of Investments in Hydropower - The Case of Norway,” *Energy Policy*, Vol. 35, No. 11, 2007, pp. 5901~5908.

- Kumbaroğlu, G., R. Madlener, and M. Demirel, “A Real Options Evaluation Model for the Diffusion Prospects of New Renewable Power Generation Technologies,” *Energy Economics*, Vol. 30, No. 4, 2008, pp. 1882~1908.
- Li, Y., M. Wu, and Z. Li, “A Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions under China Carbon Trading Market,” *Energies*, Vol. 11, No. 7, 2018, pp. 1817.
- Tsay, R. S., *Analysis of Financial Time Series*, 1st ed., Wiley, 2001.
- Zhang, M., D. Zhou, and P. Zhou, “A Real Option Model for Renewable Energy Policy Evaluation with Application to Solar PV Power Generation in China,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, 2014, pp. 944~955.