

# 실물옵션 모형을 이용한 RPS와 배출권거래제 연계의 신재생에너지 투자효과\*

박 호 정\*\*

---

## 〈요 약〉

---

2012년부터 RPS 제도가 시행됨에 따라 신재생에너지 분야에서의 투자가 활발히 이루어질 것으로 예상된다. 신재생에너지를 통한 기업의 온실가스 감축투자는 장기적으로 기술진보와 국내 전력가격에도 영향을 미치는 중요한 요소이다. 한편, 국내에 온실가스 감축정책 수단으로 배출권거래제가 논의 중인 바, 유사한 성격의 두 제도가 기업의 환경투자 의사결정에 미치는 영향을 분석하도록 한다. 투자의 비가역성과 배출권 및 REC 가격의 불확실성을 고려하는 실물옵션 모형을 이용하여, 게이트웨이의 설정을 통한 배출권과 REC의 호환성이 보장될 때에 투자 인센티브를 분석하였다. 환경투자를 통해 온실가스 감축이 충분히 클 경우에는 투자에 대한 게이트웨이의 긍정적인 효과가 확인되는 것으로 나타났다. 신재생에너지 투자효과에 대한 보다 엄밀한 분석을 위하여 향후 발전사 데이터의 구축을 통해 실증분석이 추가로 이루어져야 할 것이다.

주제어 : 신재생에너지공급의무화제도, 배출권거래제, 환경투자, 실물옵션

---

\* 본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

\*\* 고려대학교 식품자원경제학과 부교수.

\*\*\*\*\*

The primary purpose of Renewable Portfolio Standard (RPS) is to facilitate investment in renewable energy technology. Since emission trading program has similar purpose, it is conceivable to attempt to link RPS and emission trading program through interlinked markets. RPS in Korea with single REC and emission allowance markets has particular advantages for constructing linkages between two markets. This paper provides a real option model to examine investment effects of linkage of RPS to the trading program. Emission permit price and REC price are assumed to follow stochastic processes and renewable investment is irreversible. The result shows that linked market provides further incentive for renewable investment by raising managerial flexibility for power companies.

Keywords : RPS, emission trading program, investment, real option

---

JEL 분류 : N7, D8, C

## I. 서 론

화석연료 사용으로 인한 인위적인 온실가스의 배출을 저감하고자 하는 국제 사회 노력의 일환으로서, 시장 메커니즘을 이용하여 가능한 최소의 비용으로 주어진 온실가스 감축목표를 달성하고자 하는 다양한 정책수단이 시행되고 있다. 온실가스 배출권거래제, 탄소세, 신재생에너지공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard: RPS) 등의 정책취지는 기본적으로 정부의 직접규제방식보다는 시장친화적인 정책수단을 이용하여 사회적 관점에서 최소의 비용으로 온실가스를 감축하고 그 성과에 대한 경제적 인센티브를 제공하고자 하는데 있다.

국내에서는 이미 신재생에너지의 보급 확대를 위해서 차액보조금제도(Feed-in-Tariff: FIT)를 시행하고 있다. 그리고 「신·재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 개정안」을 통해 2012년부터 현재의 발전차액지원제도를 대체하여 RPS 제도를 시행하고 있다. 이에 따라 RPS 하에서는 신·재생에너지 전력의 구매의무량이 2012년 2% 기준에서 2022년까지 10% 증가할 예정이다.

장기적 관점에서 RPS는 기업의 CO<sub>2</sub> 감축투자를 유발시키는 가운데, 상대적으로 비용효율적인 CO<sub>2</sub> 감축노력은 경제적 인센티브를 제공해 줄 수 있는 이른바 동태적 효율성(dynamic efficiency)의 달성에 기여할 것으로 기대된다. 이와 같은 기업의 CO<sub>2</sub> 감축투자는 또한 전력공급에 대한 에너지포트폴리오를 개선시킴으로써, 전력가격에도 영향을 줄 것으로 전망된다. Fisher (2006)는 부분 균형모형을 이용하여 RPS로 인한 전력가격 증감효과는 신재생 및 화석연료로부터의 발전공급 탄력성에 의존함을 보여준 바 있다. 즉, 신재생에서의 전력공급이 화석연료 발전의 공급보다 탄력적으로 이루어질 경우에는 RPS로 전력가격의 하락이 기대된다. 물론 이와 같은 전력공급의 탄력성을 제고하는 핵심적인 요인은 CO<sub>2</sub> 감축투자의 확대에 있다.

기업은 장기적인 시각에서 오염물질의 감축을 위한 환경투자를 고려할 수 있

는데, 이 때 투자편익의 현재가치와 투자비용의 현재가치를 비교하여 동태적 최적화를 만족하는 수준에서 투자가 이루어지게 된다. 환경투자를 통해 동태적 효율성을 제고시키는 노력은 궁극적으로 기술개발을 촉진시켜 사회 전체의 후생을 증가시킬 수 있다는 점도 중요하게 고려되어야 한다.<sup>1)</sup>

현재 국내에서는 CO<sub>2</sub> 감축수단으로 배출권거래제와 RPS의 도입이 이루어지고 있지만, 이들 제도가 특히 발전비용 상승에 따른 전력가격의 조정으로 이어질지에 대해서는 아직 불확실하다. 경제적 정채수단이 소기의 성과를 달성하기 위해서는 오염의 사회적 비용의 전부 또는 일부를 오염자가 책임진다는 오염자 부담원칙이 성실하게 이행되어야 한다. 오염자부담원칙의 실현은 에너지 공급체계상 저탄소의 친환경적인 소비행위로 전환하고, 온실가스 감축기술의 투자에 대한 인센티브를 제공해준다.<sup>2)</sup> 따라서 온실가스의 실제적 감축을 이끌어 내으로써 2020년 대비 30% 감축의 국가온실가스감축목표를 성공적으로 이행하기 위해서는 국내 CO<sub>2</sub> 배출의 약 25%를 차지하는 전력생산 및 소비 부문의 조정이 필요하며, 그 핵심관건은 오염의 사회적 비용을 적정하게 부과하는 것이 필요하다. 이 경우 CO<sub>2</sub> 감축수단이 장기전력수요에 미치는 결국 전력가격 인상 정도에 영향을 받을 것이다.

전력가격 인상은 또한 배출권거래제의 경우 단기적으로는 발전부하에 영향을 받지만 장기적으로는 CO<sub>2</sub> 감축을 위한 기술편입 규모에 영향을 준다. RPS의 경우에는 중기적으로는 신재생에너지와 화석연료 공급의 상대적 탄력성에 따라 전력가격이 인상 내지 하락할 수 있는데, 신재생에너지원이 제한된 곳에서는 비교적 증가할 가능성이 크다(Fisher, 2006; Kydes, 2007).<sup>3)</sup>

1) 환경정책의 평가 기준에서 동태적 효율성 외에 정태적 효율성(static efficiency)을 들 수 있다. RPS 제도에서 정태적 효율성은 각 발전소의 신재생원에서의 한계발전가격이 동등해지는 수준에서 REC 가격이 결정됨을 의미한다.

2) 김지효 외 (2011)에 의하면 우리나라의 소비자들은 재생에너지에 대한 지불의사액이 지역별로 낮게는 약 800원/월에서 높게는 1,800원/월 정도로 추정되었는데, 이는 친환경에너지에 대한 소비자의 수용성을 나타낸다고 할 수 있다.

3) Fisher (2006)는 부분균형모형을 이용하여 RPS로 인한 전력가격 증감효과는 신재생 및 화

이러한 점에서 RPS와 배출권거래제가 두 제도 하에서 획득되는 REC와 배출권을 통해 연계되는 것이 필요하다(Gillenwater, 2007). 각 주나 회원국마다 신재생에너지 의무구매기준과 기술여건이 상이한 미국이나 EU의 경우에는 권역을 통합하여 RPS 제도를 운영하는 것 자체가 힘들기 때문에, RPS와 배출권거래제의 연계체계가 까다롭다.<sup>4)</sup> 하지만, 우리나라의 경우에는 RPS가 전국적으로 동일한 기준에 의해서 운영되기 때문에, 이를 2015년부터 시행예정인 국내 배출권거래제와 연계하는 것이 기술적으로 가능하다. 온실가스 감축을 목적으로 하는 배출권거래제와 신재생에너지에 고유하게 목적을 둔 RPS라는 배경이 다른 두 제도 하에서 발생하는 배출권과 REC의 호환을 위해서는 거래기준의 표준화 작업이 추가적으로 필요하지만, 이러한 과정을 통해 국내 배출권 시장과 REC 시장이 충분한 거래유동성을 확보하여 거래활성화에도 도움이 될 수 있을 것이다.

또한 REC 시장과 배출권 시장의 연계를 통한 거래유동성의 증가와 기업의 신속적인 의사결정이 가능해짐에 따라, 장기적인 관점에서는 온실가스 감축을 위한 투자가 증가할 수 있다. 즉, 환경정책의 성과평가 중의 한 요소인 동태적 효율성을 제고할 수 있는 여지가 더욱 증가하게 된다(Millman and Prince, 1989).

영국의 경우 RPS와 유사한 RO(Renewable Obligation)와 UK ETS의 단방향 연계를 통해, RO 목표량을 초과한 공급업자는 CO<sub>2</sub> 톤으로 전환하여 배출권으로 판매할 수 있도록 허용한 바 있다. 하지만, 영국이 UK ETS에서 EU ETS로 전

---

석연료로부터의 발전공급 탄력성에 의존함을 보여준 바 있다. 신재생에서의 전력공급곡선이 화석연료 발전의 공급곡선보다 상당히 가파르다면(즉, 신재생 공급이 비탄력적이라면), RPS는 전력가격을 인상시키는 계기가 될 수 있다. 예를 들면, 풍력, 수력 등 풍부한 신재생에너지 지원의 확보가 어려운 지역에서는 RPS 공급곡선이 비탄력적이므로 RPS는 전력가격을 인상하게 되는 요인이 될 수 있다.

4) 미국의 경우를 예로 들면, 신재생으로부터의 의무발전비중이 워싱턴 주는 2020년까지 15%, 캘리포니아 주는 2010년까지 20%, 네바다 주는 2025년까지 25% 등 기준연도와 목표설정이 상이하여 각 지역에서의 REC 가격의 증감압력이 다르게 작용하고 있다.

환한 후에는 RO와 배출권이 연계되지는 않고 있다. 한편 일본과 미국의 일부에서는 이미 시행하고 있는 RPS와 향후 도입될 배출권거래제의 연계에 대한 논의는 이루어지고 있지만, 실제 사례는 아직 보고되지 않고 있다(정경화, 2010).

본 논문의 목적은 RPS와 배출권거래제가 소위 게이트웨이를 통해 연계될 경우, 기업(발전사)의 온실가스 감축투자 유인에 대한 영향을 분석하는데 있다. 발전사의 입장에서는 배출권거래제와 RPS가 제각기 시행되기보다는 적절한 시장연계를 통해 배출권과 REC의 교환이 허용되는 신축성을 선호할 수 있다. 이와 같은 신축성은 또한 신재생에너지의 투자 활성화에도 기여할 수 있다. 예를 들면, 태양광 발전 투자로 REC를 획득하였지만, REC 대비 배출권 가격이 충분히 높을 때 이를 배출권 시장에서 거래할 수 있음으로써 발전사의 준수비용을 줄이는데 도움이 된다.

본 연구에서는 게이트웨이 설정을 통해 RPS와 배출권거래제 간의 연계가 있을 시에 온실가스 감축에 대한 투자결정에 미치는 영향을 이론적 모형을 통해 살펴보도록 한다. 모형의 특징으로는 첫째, 배출권과 REC 간의 교환이 게이트웨이를 통해 가능하다고 본다. 둘째, 배출권 가격과 REC 가격의 불확실성을 고려한다. 셋째, 온실가스 감축을 위한 설비투자의 비가역성을 고려하도록 한다. 이상의 특징을 반영할 수 있는 적절한 투자모형으로서 RPS와 배출권거래제 하에서 개별 기업단위에서 투자결정을 위한 실물옵션(real option)을 개발하도록 한다. 박호정(2005)에서는 배출권거래제 도입시 환경투자에 대한 효과를 실물옵션으로 분석하였으며, 특히 배출권의 이월(banking)효과를 살펴보았다. 최근에는 이동수정기호(2011)에서 CO<sub>2</sub> 감축대안으로서, RPS와 이산화탄소포집처리기술의 경제성을 비교분석하기 위한 실물옵션 연구를 수행한 바 있다. Fuss *et al.*(2012)도 유사하게 RPS 경제성을 실물옵션 모형을 이용하여 분석하였으며, REC 가격 변동성을 고려하여 적절한 에너지 포트폴리오를 구성하는 방안을 제시하였다. 하지만, 상기 논문들은 모두 배출권거래제와 RPS의 시장연계를 고려하지 않고, 각각의 제도 하에서의 투자옵션을 분석하였다는 점에서 본 연구와 차이가 있다.

이하 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 RPS와 배출권거래제의 연계에 따른 신재생에너지 발전투자에 대한 효과를 분석하기 위한 실물옵션 모형을 개발, 제시하고 있다. 현재 국내에서 RPS와 배출권거래제 모두 시행되고 있지 않은 관계로 실증적인 분석 대신, 이론모형에 대한 간략한 수치사례를 제시한다. 요약 및 결론은 제Ⅲ장에서 다룬다.

## Ⅱ. RPS와 배출권거래제 연계 하에서의 투자모형

본 연구에서 대상으로 하는 기업은 기본적으로 화석연료를 이용하는 화력발전사이다. 해당 발전사는 RPS와 배출권거래제에 의해 규제를 받으며, 화력발전 과정에서 배출되는 온실가스를 저감하기 위해 설비투자를 고려할 수 있다. 아래의 투자모형은 발전원으로 채택하는 연료에 따라 정량적 수치가 달라질 수 있지만 정성적 결과는 변함이 없다. 모형에 사용되는 주요 변수 및 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$p$  : 배출권가격 (원/CO<sub>2</sub>톤)

$s$  : REC 가격 (원/MWh)

$m$  : 신재생발전 중 REC로의 배정비율 ( $0 \leq m \leq 1$ )

$\theta$  : 배출권 전환시의 인정율 ( $0 \leq \theta \leq 1$ )

$A_j$  : CO<sub>2</sub> 감축량 (투자 전  $A_0$ , 투자 후  $A_1$ ,  $A_0 < A_1$ )

$\bar{a}$  : 의무감축량

$\omega$  : 환산계수 (MWh/CO<sub>2</sub>톤)

배출권은 CO<sub>2</sub> 톤당 가격으로 거래되는 것에 반해, REC는 발전량을 단위로 거래되고 있다. 따라서 환산계수  $\omega$ 를 적용하여 게이트웨이의 설정을 통해 신재생

발전에서 획득한 온실가스 감축의 일부( $0 < m < 1$ )를 RPS에 할당하고 나머지는 배출권으로 전환할 수 있다고 하자. 신재생발전 REC의 배출권 전환시에는 인정을  $\theta$ 가 적용되어 교환된다고 가정한다. 전환에 따르는 할인효과가 없으면  $\theta = 1$ 로 설정된다. 매 기간 당 발전사의 의무감축량은  $\bar{a}$ 이며, 감축실적이  $A_j$ 일 때 잉여감축량인  $A_j - \bar{a}$ 는 배출권 내지 REC 형태로 시장에서 거래될 수 있다.

배출권 가격과 RPS 하에서의 REC 가격은 다음과 같은 기하학적 브라운 운동(geometric Brownian motion)을 따른다고 가정한다.

$$dp(t) = \alpha_p p(t)dt + \sigma_p p(t)dz \tag{1}$$

$$ds(t) = \alpha_s s(t)dt + \sigma_s s(t)dz \tag{2}$$

$i = p, s$ 에 대해  $dz$ 는  $E(dz) = 0$ ,  $Var(dz) = dt$ 를 만족하는 표준적인 위너 과정(Wiener process)을 따른다.  $\alpha_i$ 와  $\sigma_i$ 는 배출권과 REC 가격의 증가율과 변동율을 나타내며, 시간에 대해 일정한 상수로 가정한다. 식 (1)이나 식 (2)에 기댓값을 취하면  $E(dz) = 0$ 이므로 가격은 지수적으로 증가하지만, 기댓값을 취하기 전에는 위너 과정 때문에 확률적 변동성을 갖는다.  $t = 0$ 에서 배출권의 초기 가격이  $p_0$ 이면 배출권 가격은  $p(t) = p_0 \exp(\alpha_p t + \sigma_p z_p^2 - 0.5\sigma_p^2 t)$ 로 나타난다. 한편 배출권 가격과 REC 가격 간에 상관계수가  $\psi$ 이다.

잉여감축실적의 배출권 및 REC 할당에 대한 발전사의 목적함수는 다음과 같이 주어진다.

$$V(p, m) = \max_m E_0 \int_0^\infty [(1-m)p(A_0 - \bar{a})\theta + ms(A - \bar{a})\omega - s\bar{R}] e^{-\rho t} dt \tag{3}$$

$\rho$ 는 위험조정된 할인율이며,  $E_0$ 는 시점  $t = 0$ 에서의 기대연산자를 나타낸다. 배출권거래제 하에서는 의무감축량  $\bar{a}$ 가 주어지며, RPS 하에서  $\bar{R}$ 의 신재생발전비중에 대한 최소기준이 요구된다.



식 (3)은 배출권 및 REC의 가격  $p$ 와  $s$ 가 주어질 때 신재생 발전을 통한 온실가스 감축을 RPS와 배출권에 얼마나 할당할지에 대한 목적함수를 설명하는 것으로서, 최적 결정변수는  $m$ 이 된다. 식 (3)은 결정변수  $m$ 에 대해 선형이므로, 이른바 뱅뱅해(bang-bang solution)를 가진다. 즉,  $s\omega > p\theta$ 이면  $m = 1$ 이며,  $s\omega < p\theta$ 이면  $m = 0$ 의 값을 갖는다. 이러한 뱅뱅해는 결정변수  $m$ 에 대해 MRAP(Most Rapid Approach)를 따른다는 일반적인 결과가 나와 있으므로, 이하의 논의에서는 온실가스 감축을 위한 시설투자의 최적시점을 구하는데 초점을 두도록 한다.

온실가스 감축을 위한 최적투자 시점인  $\tau^*$ 에 규모  $I$ 의 투자를 통해 온실가스 감축을  $A_1$ 으로 증대시킬 수 있다( $A_0 < A_1$ ). 따라서  $\tau^*$ 는 투자의 최적시점으로 이에 해당되는 투자를 촉발시키는 최적투자분기점(optimal investment threshold)은 확률변수인  $p$ 와  $s$ 에 의해 결정된다. 분석의 단순화를 위해 REC 가격에 대한 배출권의 상대가격인  $\tilde{p} = p/s$ 를 정의할 때, 아래에서 보여주는 바와 같이 이 역시 GBM을 따름을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 d\tilde{p} &= (1/s)dp - (p/s^2)ds - (1/s^2)dps + (p/s^3)(ds)^2 \\
 &= (1/s)(\alpha_p p dt + \sigma_p p dz) - (p/s^2)(\alpha_s s dt + \sigma_s s dz) \\
 &\quad - (1/s^2)(\sigma_p \sigma_s p s \psi dt) + (p/s^3)(\sigma_s^2 s^2 dt) \\
 &= \tilde{p}(\alpha_p - \alpha_s + \sigma_s^2 - \sigma_p \sigma_s \psi) dt + \tilde{p} \sigma_p dz - \tilde{p} \sigma_s dz \\
 &= \alpha \tilde{p} dt + \sigma_p \tilde{p} dz - \sigma_s \tilde{p} dz
 \end{aligned} \tag{4}$$

위에서  $\alpha = \alpha_p - \alpha_s + \sigma_s^2 - \sigma_p \sigma_s \psi$ 로 정의된다. 식 (4)의 결과를 이용해서 식 (3)을 재정리하면  $V(\tilde{p})$ 에 대한 다음과 같은 확률적 동태최적화 모형을 갖는다.

$$V(\tilde{p}) = \max_m E_0 \int_0^\infty \{ (A - \bar{a})[(1 - m)\tilde{p}\theta + m\omega] - \bar{R} \} e^{-\rho t} dt \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \quad d\tilde{p}(t) = \alpha \tilde{p}(t) dt + \sigma_p \tilde{p}(t) dz(t) \tag{6}$$

식 (4)와 결합하여 Ito' s lemma를 이용해서 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 dV(\tilde{p}) &= V_{\tilde{p}}d\tilde{p} + (1/2)V_{\tilde{p}\tilde{p}}d\tilde{p}^2 \\
 &= V_{\tilde{p}}(\alpha\tilde{p}dt + \sigma_p\tilde{p}dz_1 - \sigma_s\tilde{p}dz_2) \\
 &\quad + V_{\tilde{p}\tilde{p}}(\alpha^2\tilde{p}^2dt^2 + \sigma_p^2\tilde{p}^2dz^2 + \sigma_s^2\tilde{p}^2dz^2 + 2\alpha\sigma_p\tilde{p}^2dtdz \\
 &\quad\quad - 2\alpha\sigma_s\tilde{p}^2dtdz - 2\sigma_p\sigma_s\tilde{p}^2dzdz) \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서  $dt^2 \rightarrow 0$ ,  $dtdz_i \rightarrow 0$ ,  $dz_i^2 = dt$ 의 성질을 이용하여 재전개한 후, 기댓값을 취하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 (1/dt)E(dV(\tilde{p})) &= \alpha\tilde{p}V_{\tilde{p}} + \sigma_p^2\tilde{p}^2V_{\tilde{p}\tilde{p}} + \sigma_s^2\tilde{p}^2V_{\tilde{p}\tilde{p}} \\
 &= \alpha\tilde{p}V_{\tilde{p}} + \sigma^2\tilde{p}^2V_{\tilde{p}\tilde{p}}
 \end{aligned}$$

위에서  $\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_s^2$ 이다. 이상의 결과를 반영하여 정리하면 아래의 HJB 방정식(Hamilton-Jacobi-Bellman equation)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 rV(\tilde{p}) &= (A_0 - \bar{a})(1 - m)\tilde{p}\theta + (A_0 - \bar{a})m\omega - \bar{R} \\
 &\quad + \alpha\tilde{p}V_{\tilde{p}}(\tilde{p}) + \frac{1}{2}\sigma^2\tilde{p}^2V_{\tilde{p}\tilde{p}}(\tilde{p}) \quad (8)
 \end{aligned}$$

식 (8)의 편미분방정식(partial differential equation)에 대한 해는 특정해와 일반해의 합으로 구해지는데, 그 결과는 식 (9)와 같다.

$$V(\tilde{p}) = \frac{(A_0 - \bar{a})(1 - m)\tilde{p}\theta}{\rho - \alpha} + \frac{(A_0 - \bar{a})m\omega - \bar{R}}{\rho} + \Phi\tilde{p}^\beta \quad (9)$$

첫 번째 항은 온실가스 감축초과 m실적을 배출권으로 인정받을 경우 편익의 순현재가치이며, 두 번째 항은 REC로 인정받을 때 편익의 현재가치이다. 마지막 항인  $\Phi\tilde{p}^\beta$ 는 식 (8)의 동차방정식의 해인데,  $\beta$ 는 아래 특성방정식의 근으로

서 양(+ )의 값을 취한다(Dixit and Pindyck, 1994).

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \beta (\beta - 1) + \alpha \beta - \rho = 0 \quad (10)$$

$\beta$ 가 1 이상의 값을 가지므로,  $\tilde{p}$ 가 증가하면  $\Phi \tilde{p}^\beta$  역시 증가한다. 즉, REC에 대한 배출권의 상대가격이 증가하면  $\Phi \tilde{p}^\beta$ 는 지수적으로 증가하는 것을 알 수 있는데, 이를 투자의 옵션가치(option value)로 해석한다. 투자의 비가역성으로 인해 투자옵션이 행사되면 투자의 옵션가치는 더 이상 존재하지 않게 된다.

온실가스 감축투자가 이루어지면 감축규모가  $A_0$ 에서  $A_1$ 으로 증가하게 되는데, 이 때 발전사의 가치함수  $W(\tilde{p})$ 는 위에서 동일한 방식으로 구할 수 있다.

$$W(\tilde{p}) = \frac{(A_1 - \bar{a})(1 - m)\tilde{p}\theta}{\rho - \alpha} + \frac{(A_1 - \bar{a})m\omega - \bar{R}}{\rho} \quad (11)$$

투자옵션은 이미 행사되었으므로,  $V(\tilde{p})$ 와는 달리  $W(\tilde{p})$ 에서는  $\Phi \tilde{p}^\beta$ 는 존재하지 않는 것을 알 수 있다. 투자의 최적분기점인  $\tilde{p}^*$ 는 두 개의 경계조건인 아래 식을 통해 구할 수 있다.

$$V(\tilde{p}) = W(\tilde{p}) - I \quad (12)$$

$$\partial V(\tilde{p}) / \partial \tilde{p} = \partial W(\tilde{p}) / \partial \tilde{p} \quad (13)$$

식 (12)의 좌변은 온실가스 감축투자를 하기 전의 가치함수이며, 우변은 투자 이후의 가치함수에서 투자비용만큼을 제한 것이다. 따라서 식 (12)는 비용과 편익이 일치하는 조건을 의미하는데, 이를 비용편익일치조건(value-matching condition)이라 한다. 식 (13)은 한계비용과 한계편익이 일치하는 일종의 최적화 조건으로서, 최적투자분기점인  $\tilde{p}^*$ 에 대한 급격한 전환이 없도록 해주는 한계비용편익일치조건(smooth-pasting condition)에 해당된다. 미지수가  $\Phi$ 와  $\tilde{p}^*$ 의

두 개이며, 방정식이 식 (12)와 식 (13) 두 개이므로 두 미지수의 식별이 정확하게 이루어질 수 있다. 투자의 최적분기점은 다음과 같이 구해진다.

$$\tilde{p}^* = \left[ I - (A_1 - A_0) \frac{m\omega}{\rho} \right] \frac{\rho - \alpha}{(A_1 - A_0)(1 - m)\theta} \frac{\beta}{\beta - 1} \quad (14)$$

투자 최적분기점이 유효하기 위해서는 양(+)의 값을 가지도록  $I > (A_1 - A_0)m\omega/\rho$ 의 조건을 만족해야 한다. 만일  $I < (A_1 - A_0)m\omega/\rho$ 라면 온실가스 감축투자비용이 감축편익 현재가치보다 작기 때문에 신재생에너지에 대한 투자가 즉각적으로 이루어지는 것이 바람직한 사소한 문제(trivial problem)로 귀결된다. 한편 투자옵션의 상수항은 다음과 같다.

$$\Phi = \widetilde{p^{*- \beta}} \left[ \frac{(A_1 - A_0)(1 - m)\tilde{p}^*\theta}{\rho - \alpha} + (A_1 - A_0)m \frac{\omega}{\rho} - I \right] \quad (15)$$

최적분기 수준인  $\tilde{p}^*$ 의 결정을 전통적인 순현재가치(NPV)와 비교할 수 있다. 옵션가치를 고려하지 않을 때에는  $\widetilde{p_{NPV}}$  수준에서도 투자가 이루어질 수 있는데, 이 때  $\widetilde{p_{NPV}}$ 은 기업의 아래 가치함수를 통해 구한다.

$$V(\tilde{p})|_{NPV} = \frac{(A_0 - \bar{a})(1 - m)\tilde{p}\theta}{\rho - \alpha} + \frac{(A_0 - \bar{a})m\omega - \bar{R}}{\rho}$$

위 식을  $V(\tilde{p})|_{\sigma=0} = W(\tilde{p}) - I$ 를 이용하여  $\tilde{p}$ 를 결정한다. 여기에서  $\widetilde{p_{NPV}} < \tilde{p}$ 가 항상 성립함을 알 수 있다.  $\widetilde{p_{NPV}}$ 는 고전적인 비용편익분석에서  $NPV = 0$ 을 만족하는 수준에 해당하는데, 불확실성이 고려됨으로써 투자분기점이 증가, 즉 투자시기가 지연되는 효과를 가짐을 알 수 있다.

$\partial \tilde{p}^*/\partial \theta < 0$ 로서, 즉 REC를 배출권으로 전환할 때의 가치 인정율이 증가하면 투자를 위한 REC 대비 배출권 가격의 최적분기 수준이 감소한다. 이는 그렇지 않은 경우보다 투자가 조기에 이루어질 수 있음을 의미한다.

투자비용과 최적분기점과의 관계를 보면,  $\partial \tilde{p}^*/\partial I > 0$ 으로서, 투자비용  $I$ 가 증가하면  $\tilde{p}^*$ 가 증가하여, 투자 최적시점  $\tau^*$ 가 지연되는 것을 알 수 있다. 즉, 비가역성을 갖는 대규모의 투자에 비용이 많이 소요될 때에는 불확실한 상황에서 투자시기를 조금 더 지연하는 것이 바람직하다. 현재의 상태가 투자 이전일 때에 투자를 하지 않고 현 상태를 계속 유지하려는 성향이 있다는 점에서, 이를 지연효과(hysteresis effect)라 부른다.

이와 같은 지연효과는 투자비용뿐만 아니라, 불확실성이 증가할 때에도 유사하게 발견된다. 특성방정식의 성질에서  $\partial \beta/\partial \sigma < 0$ 임을 알 수 있는데, 이는  $\partial \tilde{p}^*/\partial \sigma = (\partial \tilde{p}^*/\partial \beta)(\partial \beta/\partial \sigma) > 0$ 이므로, 변동성의 증가, 즉 불확실성의 증가는 투자시기를 늦추는 효과를 가진다.

결과  $I > (A_1 - A_0)m\omega/\rho$ 의 조건이 만족되면,  $\partial \tilde{p}^*/\partial m < 0$ 로서, RPS와 배출권거래제의 게이트웨이를 통해서 온실가스감축 투자가 보다 원활히 이루어진다.

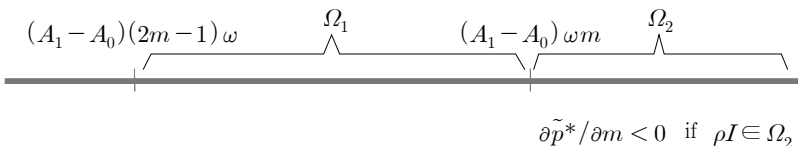
위 결과는 식 (14)를  $m$ 에 대해 미분하여 다음을 구함으로써 쉽게 확인될 수 있다.

$$\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial m} = \frac{\beta}{\beta - 1} \frac{\rho - \alpha}{(A_1 - A_0)(1 - m)^2 \theta \rho} [(A_1 - A_0)(2m - 1)\omega - \rho I]$$

최적투자분기점의 유효조건인  $I > (A_1 - A_0)m\omega/\rho$ 을 만족하는 이상,  $m < 1$ 이기 때문에 위 식에서  $\partial \tilde{p}^*/\partial m < 0$ 이 항상 성립함을 알 수 있다.

<그림 1>에서  $\Omega_2 = ((A_1 - A_0)\omega m, \infty)$ 의 구간에  $\rho I$ 가 위치할 경우에는 게이트웨이의 존재가 기업의 온실가스 투자를 촉진시킬 수 있음을 의미한다.

<그림 1> 투자임계가격에 대한 REC 전환율  $m$ 의 효과

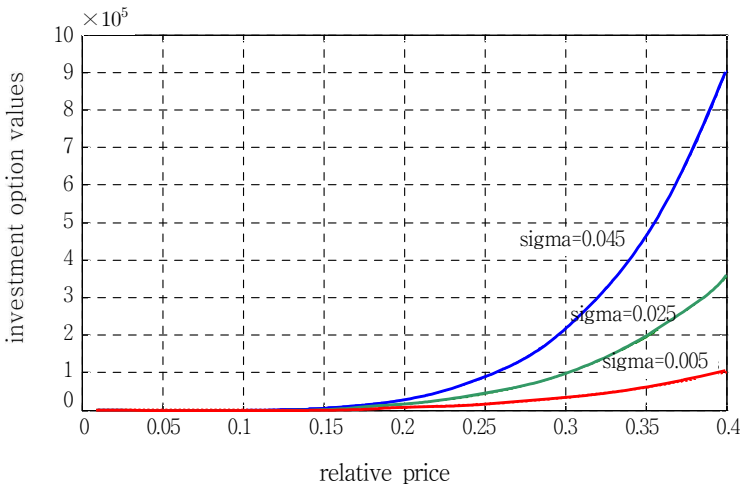


게이트웨이가 차단되어  $m = 1$ 로서 신재생발전의 전부가 REC로만 사용될 수 있을 경우에는  $\tilde{p}^*$ 가 감소, 즉, REC 가격이 증가함으로써 투자 시점이 보다 지연됨을 알 수 있다. 이는 게이트웨이를 통해서 기업의 온실가스 옵션가치  $\Phi p^\beta$ 가 증가하기 때문이다.

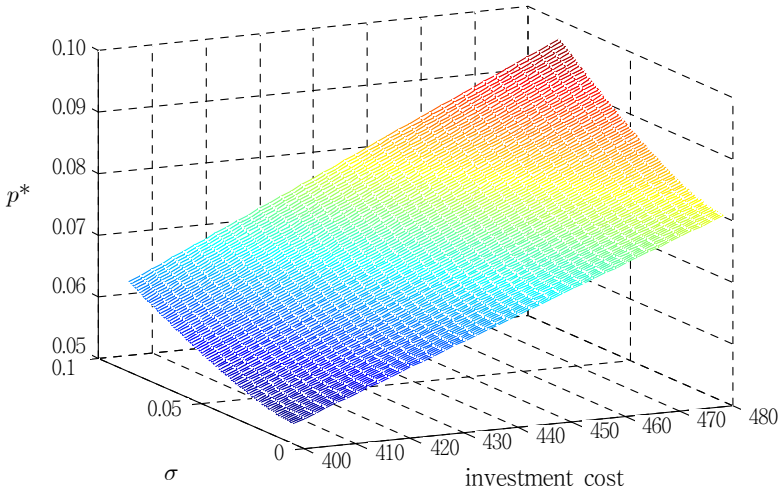
아래에서는 현재 국내에서 배출권거래제가 시행되고 있지 않으므로, 가상적인 수치를 적용하여 시뮬레이션을 수행하도록 한다. 투자비용  $I = 400$ 억 원, 풍력 발전 투자 이전의 온실가스 감축규모가 연간 700톤, 투자 이후 감축규모가 연간 300톤으로 증가하여  $A_1 = 1,000$ 톤이라고 하자. 할인율은  $\rho = 0.05$ 이며, 그 외  $\theta = 1$ ,  $w = 0.08$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $\sigma = 0.005$ 로 가정하였다. 기본값으로 배출권의 CER 전환율을  $m = 0.5$ 로 설정하되, 이에 대한 민감도를 추가적으로 살펴보도록 한다. 이들 수치는 양(+)<sup>1)</sup>의 임계가격 수준을 보장하는 조건을 만족한다.

<그림 2>는 변동성에 대한 투자옵션  $\Phi p^\beta$ 의 민감도를 보여주는데, 변동성이 증가할수록 투자옵션의 가치가 증가함을 알 수 있다. 투자옵션의 증가는 이후 살펴보겠지만, 변동성이 증가할 때 투자의 본원적 가치인 식 (9)의 우변의 첫 번째

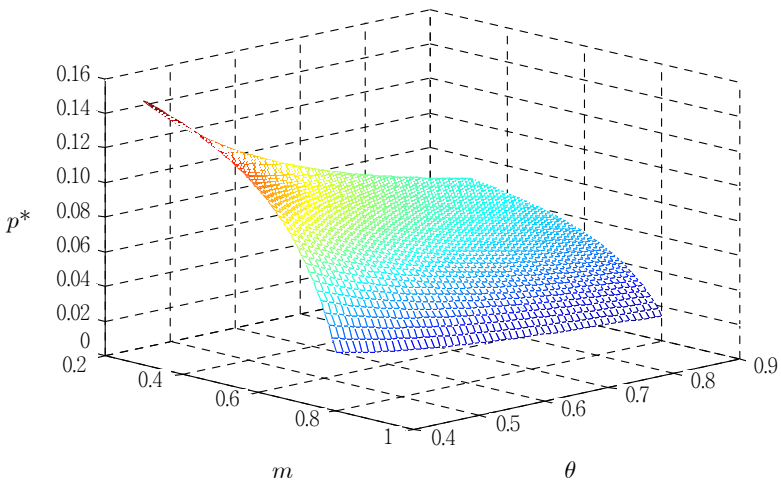
<그림 2> 변동성( $\sigma$ )에 따른 투자옵션  $\Phi p^\beta$ 의 민감도 분석



〈그림 3〉 투자임계가격  $\tilde{p}^*$ 의  $\sigma$  및  $I$ 에 대한 민감도 분석



〈그림 4〉 투자임계가격  $\tilde{p}^*$ 의  $m$  및  $\theta$ 에 대한 민감도 분석



두 항이 바뀌지 않는 한, 투자의 지연효과를 증대시키게 된다.

앞에서 전제로 한 수치를 이용할 때 투자임계가격인 REC 대비 배출권 가격이  $\tilde{p}^* = 0.0534$ 로 나타났다. <그림 3>에서  $\tilde{p}^*$ 와 변동성의 관계를 살펴보면, 변동성이 클수록 투자임계가격이 증가하는 것을 알 수 있는데, 불확실성의 증대에 따라 투자의 지연효과 역시 커지기 때문이다. 온실가스 감축투자비용이 증가할 경우에도  $\tilde{p}^*$ 이 증가하는데, 이는 투자비용 증가로 투자의 기회비용이 증가하여 옵션가치가 상승하기 때문이다.

유사하게 <그림 4>는  $\tilde{p}^*$ 와  $m$  및  $\theta$ 와의 관계를 설명해 준다. 신재생발전 중 REC로의 전환비용이 커질수록 투자임계가격이 낮아져서 그렇지 않은 경우보다 투자가 빨리 이루어지는 것이 최적임을 알 수 있다. 또한 배출권전환에 따른 할인폭이 커지면( $\theta$ 가 작아질수록) 투자임계가격이 높아져서 투자가 지연된다. 마지막으로, 만일 게이트웨이가 허용되지 않아  $m = 1$ 일 경우에는 최적투자분기점이 낮아지게 되는, 즉 REC 가격이 증가함으로써 REC 시장에서의 투자 인센티브가 현저히 감소하여 투자시기가 상당히 지연됨을 알 수 있다. 이와 같은 결론이 나오는 직관적인 이유는, RPS와 배출권거래제의 연계시에는 신재생에너지 투자를 이행하는 발전사 내지 공급업자의 REC 내지 배출권 판매에 대한 신축성이 증가하는 옵션가치가 내재되어 있기 때문이다.

### Ⅲ. 요약 및 결론

온실가스 감축과 고유가에 대한 대응방안의 일환으로 신재생에너지의 보급확대에 대한 고민과 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(진상현·김성욱, 2011). 신재생에너지 보급을 위한 시장정책의 일환으로서 2012년부터 RPS가 본격적으로 시행되고 있는데, 이에 따라 RPS를 통해 신재생에너지 전력의 구매의무량은 2012년 2%에서부터 출발하여 2022년까지 10%로 증가할 계획이다. 이와 같은



RPS가 온실가스 감축투자에 미치는 영향을 살펴보는 것은 전력시장을 장기적으로 이해하는데 있어서 중요한 과제이다. 전력가격은 장기적으로 화석연료와 신재생에너지의 전력공급 탄력성에 따라 증가하거나 또는 하락할 수 있는데, 이때 후자의 탄력성을 증대시키기 위해서는 신재생에너지의 역량을 확충해야 한다.

한편, 국내적으로는 2012년부터 RPS가 시행되는 가운데, 2015년부터 배출권거래제의 시행도 예정되어 있다. 성격적으로 유사한 이들 제도가 배출권과 REC 거래를 통해 상호 연계될 경우 기업의 온실가스 감축투자, 즉 신재생에너지 확대를 위한 투자가 더욱 촉진될 수 있다.

RPS 설계에 따른 다양한 경제적 효과를 분석한 국내 연구는 아직 미흡한 실정이다.<sup>5)</sup> 본 논문은 온실가스 감축정책의 성과를 평가하는데 있어서 주요한 기준 중의 하나인 투자제고 효과를 RPS와 배출권거래제의 연계라는 상황을 설정하여 살펴보는데 목적이 있다.

본 연구에서는 배출권거래제와 RPS의 연계시에 기업의 온실가스 감축투자에 대한 의사결정이 어떻게 영향을 받는지, 기업의 동학적 투자결정모형을 이용하여 분석하였다. 투자의 비가역성과 배출권 및 REC 가격의 불확실성을 반영하기 위하여 실물업선 모형을 활용하였다. 분석 결과 배출권 및 REC 거래의 게이트웨이가 허용될 경우에 온실가스 감축투자로 인한 배출량의 삭감이 충분한 경우에는 투자가 보다 촉진될 수 있음을 살펴보았다.

아직까지 국내적으로 양 제도가 시행되고 있지 않아 실제적인 데이터의 활용이 가능하지 않아 가상적인 시뮬레이션에 그친 본 연구는 이후 관련 데이터의 축적을 통해 실증적으로 보강될 수 있을 것이다. RPS와 관련한 다양한 연구과제가 추후 이루어지는 것도 필요하다. 신재생에너지 의무공급기준을 충족하기 위한 신재생에너지로부터의 발전공급은 전력가격의 인상으로 작용할 수 있는데, 이는 기저발전 내지 첨두부하 발전의 기준에 따라 가격인상 정도가 달라질 수

---

5) 반면 배출권거래제의 환경투자 효과를 특히 실물업선 관점에서 분석한 연구는 다수가 있다. 탄소세와 배출권거래제를 상호 비교한 Zhao (2003), 이월 가능한 배출권의 투자효과를 분석한 Park (2012) 등 실물업선을 적용한 연구가 비교적 많은 편이다.

있다. 따라서 정책설계에 의한 가격인상 효과와 이를 반영한 에너지 포트폴리오의 구성비가 달라질 수 있기 때문에, 관련 연구를 통해 국내에 적합한 형태의 제도가 설계되어야 할 것이다.

한편, FIT와 RPS의 효과를 상호 비교해 보는 것도 의의가 있을 것이다. 두 제도의 적용경험이 있는 국가를 대상으로 한 패널분석 결과 Dong (2012)에서는 FIT가 RPS보다 평균적으로 1,800MW 정도 더 투자효과가 있는 것으로 나타났다. 하지만 또한 정부재정 측면에서는 RPS가 FIT보다 바람직한 것으로 평가되기도 하기 때문에, 양 제도의 과급효과를 종합적으로 분석해 볼 필요가 있을 것이다.

### ◎ 참고 문헌 ◎

1. 김지효·박정규·김진수·허은영, “RPS 도입시 재생에너지 전력에 대한 소비자 선호연구: 지역별 차이를 중심으로”, 「자원·환경경제연구」, 제20권 제4호, 2011, pp. 797~826.
2. 박호정, “배출권가격 불확실성을 고려한 기업의 환경투자 실행옵션 연구”, 「경제학연구」, 제53집 제4호, 2005, pp. 173~199.
3. 이동수·정기호, “실물옵션을 활용한 화력발전회사의 CO<sub>2</sub> 감축대안의 경제성 평가: CCS와 RPS 이행의 비교”, 「자원·환경경제연구」, 제20권 제1호, 2011, pp. 61~98.
4. 정경화, “배출권거래제도와 신재생에너지 공급의무화제도 연계방안 연구”, 에너지경제연구원 기본연구보고서 10-15, 2010.
5. 진상현·김성욱, “신재생에너지 보급사업의 에너지원별 산업과급효과에 관한 연구”, 「자원·환경경제연구」, 제20권 제2호, 2011, pp. 309~333.
6. Dixit, A. and R. Pindyck, Investment under Uncertainty, Princeton University Press, 1994.
7. Dong, C. G., “Feed-in Tariff vs. Renewable Portfolio Standard: An Empirical Test of Their Relative Effectiveness in Promoting Wind Capacity Development,” *Energy Policy*, 42, pp. 476~485.

8. Fisher, C., How Can Renewable Portfolio Standards Lower Electricity Prices? Resources For the Future, RFF DP 06-20-REV, 2006.
9. Fuss, S., J. Szolgayova, N. Khabarov, and M. Obersteiner, "Renewables and Climate Change Mitigation: Irreversible Energy Investment under Uncertainty and Portfolio Effects," *Energy Policy*, 59-68, 2012.
10. Gillenwater, M., "Redefining RECs (Part2): Untangling Certificates and Emission Markets," *Energy Policy*, 36(2), 2008, pp. 2120~2129.
11. Kydes, A. S., "Impacts of a Renewable Portfolio Generation Standard on US Energy Markets," *Energy Policy*, 35, 2007, pp. 809~814.
12. Millman, S. R. and R. Prince, "Firm Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control," *Journal of Environmental Economics and Management*, 17, 1989, pp. 247~265.
13. Nishio, K. and H. Asano, "Supply Amount and Marginal Price of Renewable Electricity under the Renewable Portfolio Standard in Japan," *Energy Policy*, 34, 2006, pp. 2373~2387.
14. Park, H., "Real Option Analysis for Effects of Emission Permit Banking on Investment under Abatement Cost Uncertainty," *Economic Modelling*, 29, 2012, pp. 1314~1321.
15. Zhao, J., "Irreversible Abatement Investment under Cost Uncertainties: Tradable Emission Permits and Emission Charges," *Journal of Public Economics*, 87(12), 2003, pp. 2765~2789.

접수일(2011년 7월 23일), 수정일(2012년 3월 26일), 게재확정일(2012년 6월 8일)