

## RPS와 환경규제가 탄소저감기술 R&D에 미치는 영향에 대한 이론적 분석

정경화\*

### 요 약

본 연구에서는 에너지정책(RPS)과 환경규제(배출규제/배출권거래제)가 동시에 도입될 때 최종소비재시장과 배출권시장에 존재하는 과정기업들의 환경규제 수단별 탄소저감기술 R&D 투자 유인을 이론적으로 분석한다. 과정기업들의 R&D 투자는 최종소비재시장과 배출권시장에 영향을 미치며, 이러한 간접효과는 환경규제수단에 따라 그 효과가 매우 상이하다. 배출규제와 유상할당방식의 배출권거래제는 무상할당방식의 배출권거래제보다 더 많은 탄소저감기술 R&D를 유인한다. 이것은 무상할당방식의 경우 탄소저감기술 R&D 투자가 배출권가격을 하락시켜 경쟁기업의 생산량을 증가시키기 때문이다.

주요 단어 : R&D 투자, 신재생에너지의무할당제도, 배출권거래제, 배출규제  
경제학문헌목록 주제분류 : L13, L50, Q28

\* 에너지경제연구원 연구위원. jeongkyo@keei.re.kr

## I. 서 론

우리나라는 2012년부터 신재생에너지의무할당제도(Renewable Portfolio Standard, 이하 RPS)와 온실가스·에너지 목표관리제가 본격적으로 시행될 예정이다.<sup>2),3)</sup> 또한 2015년부터는 배출권거래제가 시행될 예정이다.<sup>4)</sup>

RPS는 신재생에너지를 이용한 전력생산에 대한 목표량을 설정하는 것이다. 신재생에너지전력 의무공급업자는 의무량에 상응하는 전력을 신재생에너지 발전을 통하여 충당하거나 신재생에너지인증서를 구매하여 충족시켜야 한다. 온실가스·에너지 목표관리제는 일정규모 이상의 온실가스를 배출하거나 에너지를 소비하는 업체와 공공기관에 대해 온실가스 감축 및 에너지 절감 목표를 설정하고, 이를 달성토록 의무화시킨 직접규제의 한 종류이다. 반면 시장에 기반한 배출권거래제(Emission Trading System: ETS)는 온실가스를 배출하는 업체에 일정수준의 배출권을 부여하여 그 수준보다 적게 배출하는 업체는 잉여 배출권을 시장에 판매하고, 반대로 할당된 수준보다 많이 배출하는 업체는 부족분을 시장에서 구매해서 배출의무를 달성하는 제도이다. 현재 우리나라는 2015년 이후 연간 일정규모 이상의 온실가스를 배출하는 사업장은 배출권거래제를, 그 이하인 사업장은 온실가스·에너지 목표관리제를 시행할 것으로 예상되고 있다.<sup>5)</sup>

에너지정책 및 환경규제는 기업들의 에너지효율향상 및 탄소저감기술에 대한 R&D 투자에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 다양한 환경정

- 
- 2) '신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 일부개정 법률안' 2010년 3월 국회 통과
  - 3) "저탄소녹색성장기본법" 2010년 1월 제정
  - 4) "온실가스 배출권 할당 및 거래에 관한 법률 제정안" 2011년 04월 12일 국무회의 의결
  - 5) 국내 목표관리제 시행방안을 살펴보면, 2011년 12월 31일 기준 온실가스 배출량이 25,000 CO<sub>2</sub> ton 이상인 사업장은 목표관리제의 대상이 된다. 이러한 대상업체 지정 기준은 2012년 1월 1일 20,000 CO<sub>2</sub> ton, 2014년 1월 1일 15,000 CO<sub>2</sub> ton으로 변경된다.

책수단별 R&D 투자유인에 대한 평가는 매우 중요하다. 이에 따라 많은 기존 연구에서 배출권거래제, 탄소세, 배출직접규제 등 다양한 환경정책과 R&D 유인간의 관계를 규명한 결과 배출권거래제나 탄소세를 도입하는 경우의 R&D 유인이 배출량에 대한 직접규제보다 더 큰 것으로 분석하였다(Milliman and Prince 1989, Downing and White 1986, Jung et al. 1996). Jung et al.(1996)은 다양한 환경규제수단이 도입되는 경우 산업 단계에서의 신규 탄소저감기술에 대한 투자유인을 분석한 결과, 기업크기, 산업규모, 또는 산업의 저감비용구조 등에 따라 정책별 투자유인이 상이한 것으로 분석하였다. 동 연구는 완전경쟁시장에 존재하는 이질적인 산업에 분석의 중점을 둔 것으로 기존연구(Milliman and Prince, 1989)에서 기업 차원의 투자유인을 분석한 것과 차별성이 있다. 반면 Montero(2002a)에서는 과점시장에서 기업의 환경 R&D 투자유인 수준을 이론적으로 분석하였으며, 배출규제 및 성과규제와 같은 직접규제의 경우에 배출권거래제보다 R&D 유인이 큰 것으로 결론지었다. 또한 Montero(2002b)는 시장경쟁구도에 중심을 두고 다양한 환경규제수단이 R&D에 미치는 효과에 대해 분석하였다. 최종소비재가 전략적 대체재인 경우에는 배출규제, 탄소세, 배출권거래제(경매)가 가장 큰 R&D 유인이 있으나, 최종소비재가 전략적 보완재인 경우에는 탄소세 또는 배출권거래제(경매)가 가장 많은 R&D를 유발하는 것으로 분석하였다.

이와 같이 기존 연구들에서는 완전경쟁시장 또는 과점시장에 참여하는 기업을 고려하면서 다양한 환경규제수단에 따라 탄소저감기술에 대한 R&D 투자유인의 순위를 분석하였으나 RPS 또는 발전차액지원제도(Feed-in Tariff)와 같은 에너지정책의 도입을 고려하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 과점시장(Cournot)에서 경쟁하는 두 개 기업이 신재생에너지의무할당제도(RPS)의 도입과 더불어 환경직접규제인 배출규제, 시장에 기반한 무상할당방식의 배출권거래제, 또는 유상할당방식의 배출권거래제 등의 환경규제가 동시에 도입되는 경우에 탄소저감기술에 대한 R&D 투자의 유인 순위를 이론적으로 분석한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 RPS 및 환경규제수단별 R&D 유인의 순위를 살펴보기 위한 기본적인 모델을 설명한다. 제3장에서는 규제자가 일정 수준의 배출량을 목표로 설정하는 배출규제와 무상할당방식의 배출권거래제, 유상할당방식의 배출권거래제 등 3가지 환경규제수단이 RPS와 더불어 시행되는 경우에 R&D 투자가 기업의 수익에 미치는 효과에 대한 가치를 구하여 기업의 R&D 유인 순위를 살펴본다. 제4장에서는 특정 수요함수와 비용함수를 가정하고 다양한 R&D 수준과 신재생에너지할당 수준을 고려하여 환경규제수단별 R&D 유인순위를 비교한다. 마지막으로 제5장에서 본 연구의 결론을 논한다.

## II. 모델

본 연구에서는 에너지 및 환경규제를 받고 있는 두 개 기업( $i, j$ )을 고려한다. 기업  $i$ 와  $j$ 는 한계비용 및 탄소저감기술 R&D 비용을 모두 포함하여 배출량 목표 설정 및 배출권 할당에 있어 대칭적(symmetry)이라고 가정한다. 기업  $i$ 는  $q_i$ 를 생산하며, 역수요함수(inverse demand function)  $P = P(Q)$ 를 가지고 있다. 여기서  $P$ 는 최종생산재의 시장가격이고, 총생산량은  $Q = q_i + q_j$ 이다.

기업  $i$ 가  $q_i$ 를 생산하는데 있어 투입연료는 화석연료와 신재생에너지를 사용할 수 있으나, 화석연료의 투입비용이 신재생에너지비용보다 낮기 때문에 RPS 도입 이전에 기업  $i$ 는 신재생에너지를 투입하지 않는다고 가정한다. 모델의 단순화를 위해 일반성의 저해 없이 기업  $i$ 의 화석연료 한계생산비용은 영(0)이고, RPS 도입에 따른 신재생에너지의 투입은  $G_i(\overline{q_{Ri}})$ 의 비용을 발생시킨다고 가정한다. 단, 신재생에너지 비용( $G$ )은  $G' > 0$ ,  $G'' > 0$ 의 특성을

갖는다.  $\overline{q_{Ri}}$ 는 규제자가 목표로 하는 신재생에너지를 이용한 전력량을 의미하며, 일반적으로 총 전력 생산량에 대하여 공급비중을 정하기 때문에  $\overline{q_{Ri}} = \overline{\alpha} q_i$ 인 것으로 가정한다.

에너지 및 환경규제가 없는 경우에 기업  $i$ 는 생산량  $q_i$ 만큼 탄소를 배출하는 것으로 가정한다.<sup>6)</sup> 이러한 탄소배출량은 에너지효율향상이나 탄소저감을 위한  $C_i(r_i)$ 의 비용으로 감축될 수 있다. 여기서  $r_i$ 는 환경규제가 없는 경우 발생하는 배출량( $q_i$ )에서 배출감축노력을 한 이후의 배출량( $e_i$ )을 뺀 기업  $i$ 의 탄소감축량을 의미한다( $r_i = q_i - e_i$ ). 따라서 기업  $i$ 의 탄소저감비용은  $C_i(q_i - e_i)$ 으로 나타낼 수 있다. 탄소저감비용( $C$ )은  $C' > 0$ ,  $C'' > 0$ 를 가지고 있는 일반적인 비용함수를 가정한다.

기업  $i$ 는 연구개발(R&D)을 통해 탄소저감기술을 개발하여 탄소배출량을 감축할 수 있다.<sup>7)</sup> R&D 투자가  $K_i$ 만큼 이루어지는 경우 탄소저감비용은  $C_i(q_i - e_i)$ 에서  $k_i C_i(q_i - e_i)$ 로 줄어들게 된다. R&D 함수는  $k_i = f_i(K_i)$ 으로,  $f(0) = 1$ ,  $f(\infty) > 0$ ,  $f' < 0$ ,  $f'' > 0$ ,  $f''' \leq 0$ 를 따른다. 탄소저감을 위한 R&D 투자비용은  $v_i K_i$ 이다.

환경규제가 도입되는 경우 총배출량의 상한은  $\overline{E} = e_1 + e_2$ 으로 제한된다. 규제자가 탄소감축을 위해 도입한 정책의 목표는 정책수단에 관계없이 총배출량을 정해 놓고 그 보다 낮게 배출하는 것이다. 따라서 배출규제 및 배출권

6) 탄소배출량은 일반적으로 연료별/설비별 에너지소비량에 대해 연료별/설비별 배출계수(톤 CO<sub>2</sub>/Joules)를 곱하여 산정한다. 기업의 생산량 증가는 일반적으로 에너지소비량을 증가시키고, 이러한 연료소비량에 비례하여 배출량이 증가하게 된다. 본 연구에서는 RPS가 도입되어 있는 상황에서 환경규제수단별 탄소저감기술 R&D 유인에 대하여 상대적인 순위를 비교하기 때문에 생산량( $\beta q_i$ ,  $0 < \beta$ )에 비례하여 탄소가 배출된다고 가정될 수 있다. 여기서  $\beta$ 의 크기는 각 환경규제수단별 R&D 유인 순위에 영향을 미치지 않기 때문에 1로 가정한다.

7) 본 연구에서 탄소저감기술에 대한 투자는 에너지효율향상기술이나 새로운 탄소저감기술로 한정하며, 신재생에너지기술에 대한 투자는 포함되지 않는다.

거래제(무상/유상)는 R&D가 이루어지기 이전이나 이후에도 목표 배출량( $\bar{E}$ )을 배출하는 것으로 설계된다.

본 연구에서는 환경규제수단에 따라 모델이 2 단계 또는 3 단계 게임으로 이루어진다. 배출규제의 경우 2 단계이며, 1 단계에서 두 기업은 R&D 투자수준( $K_i, K_j$ )을 결정한 뒤, 2 단계에서 물량경쟁( $q_i, q_j$ )을 한다. 이에 따라 최종소비재 시장균형 및 배출량이 두 번째 단계에서 결정된다. 반면 배출권거래제(무상/유상)의 경우에는 3 단계로 이루어져 있으며, 1 단계에서 기업들은 R&D 투자수준( $K_i, K_j$ )을 결정한다. 2 단계에서 배출량 수준( $e_i, e_j$ )을 결정한다. 이에 따라 배출권의 균형시장가격( $\sigma$ )이 결정된다. 3 단계에서 물량경쟁( $q_i, q_j$ )을 한다.

각 환경정책수단의 R&D 수준은  $\pi_i(K_i) - v_i K_i$ 를 극대화하여 구할 수 있다. 여기서  $\pi_i(K_i)$ 는 탄소저감기술 R&D 투자수준이  $K_i$ 인 경우에 발생하는 기업  $i$ 의 수익이다.  $\pi_i(K_i) - v_i K_i$ 를 전미분하여 도출한  $d\pi_i(K_i)/dK_i = v_i$ 에서 최적의 R&D 수준( $K_i^*$ )을 구할 수 있다. Montero(2002a)처럼 최적의 R&D 수준( $K_i^*$ )을 구하는 대신 기업  $i$ 의 수익함수( $\pi_i$ )를  $k_i$ 로 전미분( $|d\pi_i/dk_i|$ )하여 각 환경규제수단별 R&D 유인 순위를 살펴본다.

$$\frac{d\pi_i}{dK_i} = \frac{d\pi_i}{dk_i} f'(K_i) = v_i \quad (1)$$

식 (1)은  $f' < 0$  and  $f'' > 0$  이기 때문에  $K^*$ 는  $d\pi_i/dk_i$ 의 절대값이 커질수록 크다는 것을 의미한다. 따라서 A 정책 도입 시 R&D 투자가 기업의 수익에 미치는 가치를 나타내는  $|d\pi_i^A/dk_i|$ 가 B 정책이 도입되는 경우의 R&D 투자가 기업의 수익에 미치는 가치를 나타내는  $|d\pi_i^B/dk_i|$  보다 모든  $k_i$ 에 대하여 더 큰 경우는 A 정책이 B 정책보다 R&D 투자를 더 많이 유인한다고 판단할 수 있다. 그러나 일부  $k_i$ 에 대해서만  $|d\pi_i^A/dk_i| > |d\pi_i^B/dk_i|$ 인 경우에는  $k_i$ 나  $f$ 의 값에 따라서 A정책이 B정책보다 R&D 투자를 더 많이, 더 적

계, 또는 같은 수준으로 이끌 수 있다.

모든  $k_i$ 에 대하여  $|d\pi_i^A/dk_i| > |d\pi_i^B/dk_i|$ 인 경우에 A 정책이 B 정책보다 더 많은 R&D 유인이 있다는 것은 새로운 기술  $\tilde{k}$ 를 개발하는 경우에 발생하는 기업들의 이익변화가  $\Delta\pi_i^A(\tilde{k}) > \Delta\pi_i^B(\tilde{k})$ 라는 것과 같다. 이를 증명하면 다음과 같다. 식 (1)로부터  $\Delta\pi_i^l(\tilde{k})$ 는 다음과 같이 도출될 수 있다 ( $l = A, B$ ).

$$\Delta\pi_i^l(\tilde{k}) = \int_0^{K(\tilde{k})} (d\pi^l/dK)dK = \int_{\tilde{k}}^1 |d\pi^l/dk| f'(K(k)) dk. \quad (2)$$

따라서 모든  $k_i$ 에 대하여  $|d\pi_i^A/dk_i| > |d\pi_i^B/dk_i|$ 이면  $\Delta\pi_i^A(\tilde{k}) > \Delta\pi_i^B(\tilde{k})$ 이다.

본 연구에서 수익극대화 문제는 후진귀납법(backward induction)을 이용하여 해결한다. 배출규제는 먼저 물량경쟁 수익극대화 문제를 해결하여 최적의 판매량( $q^*$ )을 구한 뒤 기업의 R&D 수준( $K^*$ )을 결정한다. 배출권거래제는 기업의 수익극대화를 통해 최적의 판매량( $q^*$ )을 구한 뒤, 균형 배출량( $e^*$ )과 배출권 균형시장가격( $\sigma^*$ )을 구한다. 마지막으로 1단계의 R&D 투자수준( $K^*$ )을 결정하기 위한 수익극대화 문제를 해결한다.

### Ⅲ. 균형

본 장에서는 총발전량에 대하여 신재생에너지 목표를 달성해야 하는 RPS 제도와 더불어 탄소배출량을 일정수준으로 규제하는 배출규제, 배출권거래제(무상할당), 배출권거래제(유상할당) 등 3가지 환경규제수단이 도입되는 경우의 기업들의 수익극대화 문제를 해결하고  $|d\pi/dk|$ 의 크기를 구하여 환경규

제수단별 R&D 유인 순위를 비교한다.

### 1. RPS와 배출규제

먼저 RPS와 더불어 배출규제하에 있는 기업  $i$ 는 다음의 수익을 극대화한다.

$$\pi_i = P(Q)q_i - k_i C_i(q_i - e_i) - G_i(\overline{q_{Ri}}), \quad (3)$$

단, 배출량은  $e_i \leq \overline{e_i}$ 이며, 여기서  $\overline{e_i}$ 는 기업  $i$ 에 허용된 배출량이다. 기업  $i$ 는 허용되는 배출량까지 배출할 수 있기 때문에 배출규제시 배출량은  $e_i = \overline{e_i}$ 이 된다. 또한 신재생에너지전력 할당은  $\overline{q_{Ri}} = \overline{\alpha_i} q_i$ 를 만족해야 한다. 따라서 식 (3)에  $e_i = \overline{e_i}$ 과  $\overline{q_{Ri}} = \overline{\alpha_i} q_i$ 를 대입하여 1계 미분함수(FOC)를 구하면 다음과 같다.

$$P(Q) + P'(Q)q_i - k_i C_i'(q_i - \overline{e_i}) - G_i'(\overline{\alpha_i} q_i) = 0, \quad (4)$$

단,  $Q = q_i + q_j$ 이다. Envelope theorem을 이용하여 기업  $i$ 의 최적 생산량과 배출량을 고정하고 수익함수를  $k_i$ 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$-\frac{d\pi_i}{dk_i} = C(q_i - \overline{e_i}) - P'(Q)q_i \frac{dq_j}{dk_i}. \quad (5)$$

식 (5)의 오른쪽 첫 번째 항은 탄소저감기술 R&D 투자로 인해 발생하는 직접효과로써, 배출 감축량( $q_i - e_i$ )이 증가할수록 높아지며 양의 부호를 가진다. 따라서 감축목표가 높을수록 동 항은 커진다. 반면 두 번째 항은 R&D 투자가 미치는 간접효과로써 기업  $j$ 의 생산량에 미치는 영향에 해당된다.  $dq_j/dk_i$ 의 크기에 의해 간접효과의 부호가 결정된다. 기업  $i$ 의 R&D 투자

( $K_i$ )가 많을수록  $k_i$ 가 작아지며, 작은  $k_i$ 는 기업  $i$ 의 한계저감비용( $k_i C_i'$ )을 낮추고 기업  $j$ 의 상대적인 비용을 상승시키게 되어 생산량을 감소시킨다 ( $dq_j/dk_i > 0$ ).<sup>8)</sup>

식 (5)에  $dq_j/dk_i$ 를 대입하고 기업  $i$ 와  $j$ 가 대칭적(symmetry)이라는 가정을 이용하여 다음 식을 도출할 수 있다.

$$\left| \frac{d\pi}{dk} \right| = C(q - \bar{e}) - \frac{P' q C'(P' + P'' q)}{(k C'' + \bar{\alpha} G'' - P')(3P' + 2P'' q - k C'' - \bar{\alpha} G'')} \quad (6)$$

최종소비재의 유일한 해와 순수 내쉬균형을 위한 일반적인 조건  $p' + p'' q < 0$ 를 가정하면, 식 (6)의 오른쪽 두 번째 항(간접효과)은 양의 부호를 가진다.<sup>9)</sup>

## 2. RPS와 배출권거래제(무상할당)

RPS와 더불어 무상할당방식의 배출권거래제가 도입되어 있는 시장에서 기업  $i$ 는 다음의 수익을 극대화한다.

$$\pi_i = P(Q) q_i - k_i C_i(q_i - e_i) - G_i(\bar{q}_{Ri}) - \sigma(e_i - \epsilon_i), \quad (7)$$

단,  $\epsilon_i$ 는 기업  $i$ 가 무상으로 할당받은 배출권이고,  $\sigma$ 는 균형 배출권가격이다. 또한 신재생에너지전력 할당은  $\bar{q}_{Ri} = \bar{\alpha}_i q_i$ 를 만족해야 한다.

8)  $dq_j/dk_i$  도출은 부록 (A) RPS & 배출규제 참조

9) 완전경쟁시장에서는 1개 기업의 R&D 투자가 경쟁관계에 있는 기업의 생산량에 영향을 미치지 못하기 때문에  $dq_j/dk_i = 0$ 이 된다. 반면 과점시장인 경우에는 시장지배력이 있는 기업들이 R&D 투자를 통하여 경쟁기업의 상대적인 생산비용과 생산량에 영향을 미칠 수 있다.

먼저 3 단계에서 기업  $i$ 는 최종소비재의 균형 판매량을 결정한다. 식 (7)의 1계 미분함수(FOC)는 다음과 같다.

$$P(Q) + P'(Q)q_i - k_i C'_i(q_i - e_i) - G'_i(\bar{\alpha}_i q_i) = 0. \quad (8)$$

식 (8)에서 구한  $\hat{q}_i(e_i)$ 를 기업  $i$ 의 균형 생산량이라고 가정하면, 2 단계에서 기업  $i$ 는  $P(\hat{Q})\hat{q}_i - k_i C'_i(\hat{q}_i - e_i) - G'_i(\bar{\alpha}_i \hat{q}_i) - \sigma(e_i - \epsilon_i)$ 를  $e_i$ 로 미분하여 균형 배출권가격을 도출한다. Envelope theorem을 이용하여 배출권시장에서의 균형을 구하면 다음과 같다.

$$k_i C'_i(\hat{q}_i - e_i) = k_j C'_j(\hat{q}_j - e_j) = \sigma, \quad (9)$$

$$e_i + e_j = \bar{E}. \quad (10)$$

균형에서 기업  $i$ 와  $j$ 의 배출량의 합계는 규제자가 정한 총배출량( $\bar{E}$ )과 같아야 한다. 기업  $i$ 의 최적 생산량과 배출량을 고정하고 기업  $i$  수익함수를  $k_i$ 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$-\frac{d\pi_i}{dk_i} = C(q_i - e_i) - P'(Q)q_i \frac{dq_j}{dk_i} + \frac{d\sigma}{dk_i}(e_i - \epsilon_i). \quad (11)$$

식 (11)의 오른쪽 첫 번째 항(직접효과)은 양의 부호를 가지고, 두 번째 항은 최종소비재시장에서 발생하는 간접효과로써  $dq_j/dk_i$ 가 부호를 결정한다. 반면, 세 번째 항은 배출권시장에서 발생하는 간접효과를 나타낸다. R&D가 커질수록 배출권 가격은 하락( $d\sigma/dk_i > 0$ )하나 대칭적인 두 기업에 대한 배출권의 초기할당이  $\epsilon = e = \bar{e}$ 이기 때문에 세 번째 항은 제거된다. 따라서 RPS와 무상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우의 탄소저감기술 R&D 투자가 기업의 수익에 미치는 효과는 다음과 같이 정리될 수 있다.<sup>10)</sup>

10)  $dq_j/dk_i$  도출은 부록 (B) RPS & 배출권거래제(무상할당) 참조

$$\left| \frac{d\pi}{dk} \right| = C(q-e) - \frac{P' q C'}{2(3P' + 2P'' q - kC'' - \bar{\alpha} G'')}. \quad (12)$$

$p' + p'' q < 0$  가정에 의해 두 번째 항은 음의 부호를 가진다( $dq_j/dk_i < 0$ ). 이것은 기업  $i$ 의 탄소저감기술 R&D 투자가 기업  $j$ 의 상대적인 비용도 감소시켜 생산량( $q_j$ )을 증가시키는 것을 의미한다. 즉, 기업  $i$ 의 탄소저감기술 R&D 투자가 배출권 시장가격을 낮추게 되어 기업  $i$ 와 기업  $j$ 의 한계저감 비용이 낮아진다. 이에 따라 기업  $j$ 의 생산량이 증가된다. 이러한 결과는 기업  $i$ 의 R&D 투자가 기업  $j$ 의 생산량을 감소시키는 배출규제와 상반된 것이다.

**정리 1.** RPS가 도입되어 있는 불완전경쟁시장에 무상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우의 탄소저감기술 R&D 유인수준은 배출규제시의 R&D 유인보다 작다.

증명 : 규제자가 탄소감축을 위해 도입한 정책의 목표는 정책수단에 관계없이 총배출량을 정해 놓고 그 보다 같거나 낮게 배출하는 것이다. 따라서 배출규제 및 배출권거래제는 R&D가 이루어지기 이전이나 이후에 목표 배출량( $\bar{E}$ ) 이상 배출할 수 없도록 설계된다. 이것은 배출규제의 직접효과와 무상할당방식의 배출권거래제의 직접효과가 같다는 것을 의미한다. 반면 배출규제의 간접효과는 양(+ )인 반면 무상할당방식의 배출권거래제의 간접효과는 음(-)을 갖기 때문에 배출규제의 R&D 유인이 무상할당방식의 배출권거래제도 보다 크다고 할 수 있다(각 정책수단별  $dq_j/dk_i$ 의 도출은 부록 참조).

### 3. RPS와 배출권거래제(유상할당)

RPS와 유상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우( $\epsilon_i = 0$ )에 기업  $i$ 는 다음의 수익을 극대화한다.

$$\pi_i = P(Q)q_i - k_i C_i(q_i - e_i) - G_i(\overline{q_{Ri}}) - \sigma e_i, \quad (13)$$

단,  $\sigma$ 는 규제자가 배출권( $\overline{E}$ )을 할당한 이후의 배출권 균형시장가격이다. 또한 기업  $i$ 의 신재생에너지전력 할당은  $\overline{q_{Ri}} = \overline{\alpha_i q_i}$ 를 만족해야 한다.

최종소비재와 배출권시장에서의 1계 미분함수들이 무상할당방식의 경우와 동일하다. RPS와 유상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우에 기업  $i$ 의 탄소저감기술 R&D 투자가 기업의 수익에 미치는 효과는 식 (14)에서 보이고 있다. 이는 식 (13)에 대해  $k_i$ 로 미분하고 절댓값을 취하여 구할 수 있다.

$$\left| \frac{d\pi}{dk} \right| = C(q - e) - \frac{P' C' q - C'(3P' + 2P''q - \overline{\alpha} G'')e}{2(3P' + 2P''q - kC'' - \overline{\alpha} G'')} \quad (14)$$

식 (14)의 오른쪽 두 번째 항은 무상할당방식과 같이 탄소저감기술 R&D 투자가 배출권 가격을 내리고 경쟁관계에 있는 기업의 생산량을 증가시키기 때문에 음의 부호를 가진다( $dq_j/dk_i < 0$ ). 반면 세 번째 항은 R&D 투자가 배출권시장에 미치는 효과를 나타내며, 유상할당 시 모든 기업들이 배출권을 구매해야 하기 때문에 양의 부호를 갖는다( $d\sigma/dk_i > 0$ ).<sup>11)</sup>

**정리 2.** RPS가 도입되어 있는 불완전경쟁시장에 유상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우의 탄소저감기술 R&D 유인이 무상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우의 R&D 유인보다 크다.

11)  $d\sigma/dk_i$  도출은 부록 (C) RPS & 배출권거래제(유상할당) 참조

증명 : 기업  $i$ 의 R&D 투자가 배출권가격을 하락시켜 기업  $j$ 의 생산량을 증가시키기 때문에 식 (14)의 두 번째 항은 무상할당방식과 같이 음의 부호를 갖는다. 반면 유상할당방식에서는 모든 기업들이 배출권을 구매해야 하기 때문에 기업  $i$ 의 R&D가 배출권시장에 미치는 효과를 나타내는 세 번째 항이 양의 부호를 갖게 되어 무상할당방식보다 더 많은 R&D를 유발한다.

**정리 3.** RPS가 도입되어 있는 불완전경쟁시장에 유상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우의 탄소저감기술 R&D는 배출규제의 R&D보다 더 많이, 더 적게, 또는 같은 수준으로 유발된다.

증명 : 선형수요함수인 경우 2차미분이 영( $P'' = 0$ )이 되기 때문에 R&D 투자가 최종소비재시장과 배출권시장에 미치는 총 간접효과는 양의 부호를 갖는다. 따라서  $P'$ ,  $C''$ ,  $G''$ 의 크기에 따라서 식 (14)의 두 번째와 세 번째 항의 합계가 식 (6)의 두 번째 항보다 클 수도 작을 수도 있다. 이에 따라 배출규제와 유상할당방식의 배출권거래제의 R&D 유인 순위는 분명하지 않다.

**정리 4.** 불완전경쟁시장에 환경규제가 도입되는 경우에 신재생에너지 할당량이 커질수록 탄소저감기술 R&D 투자는 더 많이, 더 적게, 또는 같은 수준으로 이루어진다.

증명(그래픽) : RPS가 탄소저감기술 R&D 투자에 미치는 효과는 분명하지 않다. 일반수요함수에서는 신재생에너지 의무할당량( $\bar{\alpha}$ )이 커질수록 탄소저감기술 R&D가 감소하나, 탄력적인 수요인 경우에는 일부  $k$ 와  $\bar{\alpha}$ 에 있어 R&D 투자가 증가한다.(부록 <부도 1> 참조).

## IV. Numerical Example

본 장에서는 특정 수요함수와 비용함수를 가정하고 다양한 수준의 탄소저감기술 R&D와 신재생에너지 의무할당량을 고려하여 환경규제수단별 탄소저감기술 R&D 유인 순위( $|d\pi/dk|$ )를 비교한다. 역수요함수는  $P(Q) = a - bQ$ , 단  $Q = q_i + q_j$ 이다. R&D 투자가  $K$ 만큼 이루어진 이후 탄소저감비용은  $k(q - e)^2$ , 단  $k = f(K)$ , 이고 신재생에너지 비용은  $(\bar{\alpha}q)^2$ 이다. <표 1>과 <표 2>에서 각각 일반적인 수요와 탄력적인 수요를 가정하고 탄소저감기술 R&D는  $k = 1, 0.75, 0.5$ , 신재생에너지 의무할당량은  $\bar{\alpha} = 0.2, 0.1, 0.05$ 으로 고정하고 환경규제수단별 R&D 유인수준을 비교한다.<sup>12)</sup>

<표 1>에서는 일반적인 수요( $b = 2$ )인 경우의 탄소저감기술 R&D에 대한 유인효과를 보인다. 여기서 총배출량을 2단위로 고정하기 때문에 R&D 투자가 발생하기 이전에 각 기업의 배출량( $e$ )은 1단위가 된다. R&D 투자가 기업의 이익에 미치는 직접효과는 R&D 투자비용을 나타내기 때문에 항상 양(+)의 부호를 가진다. 반면 R&D 투자가 최종소비재시장과 배출권시장에 미치는 효과를 나타내는 간접효과는 배출규제와 유상할당방식의 배출권거래제의 경우 양(+)의 부호를 가지나, 무상할당방식의 배출권거래제의 경우에는 음(-)의 부호를 갖는다. 신재생에너지 의무할당량 수준이 높을수록 탄소저감기술 R&D의 유인은 낮아진다(부록 <부도 1> 참조). 배출규제와 유상할당방식의 배출권거래제가 무상할당방식의 배출권거래제보다 R&D를 더 많이 유인한다. 반면 배출규제와 유상할당방식의 배출권거래제가 R&D에 미치는 효과 비교는 분명하지 않다.

<표 2>에서 탄력적 수요( $b = 0.05$ )인 경우에 각 환경규제수단별 R&D 유인효과를 보이고 있다. 이 경우에 총배출량은 16단위로 각 기업은 8단위를 배출할 수 있다. 탄력적인 수요는 기업들의 시장지배력을 약하게 만들기 때문에

12) 신재생에너지 비중( $\bar{\alpha}$ )은 우리나라를 포함하여 국제적인 신재생에너지 보급목표를 고려하여 선택한다. 우리나라는 2020년 신재생에너지 전력비중 8%, 미국 2025년 전체 전력대비 신재생에너지 비중 25%, EU 2020년 재생에너지 보급비중 20%(스웨덴 49%, 덴마크 30%, 독일 18.7%, 영국 15%), 일본 2020년 10%, 중국 2020년 20% 등이다.

간접효과보다는 직접효과가 전체적인 R&D 유인효과에 영향을 많이 미치게 된다. 일반적인 수요( $b = 2$ )와 다르게 유상할당방식의 배출권거래제가 가장 많은 R&D를 유인하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 특정한 예에서는 신재생에너지 의무할당량 수준이 높을수록 탄소저감기술 R&D의 유인은 낮아진다. 그러나 일정 수준 이상의 신재생에너지 할당비중( $\alpha^* < \bar{\alpha}$ )은 탄소저감기술 R&D를 증가시키는데, 이러한 R&D 효과는 낮은 수준의 신재생에너지 할당비중( $\bar{\alpha} < \alpha'' < \alpha^*$ )에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다(부록 <부도 1> 참조). 따라서 신재생에너지 의무할당량과 탄소저감기술 R&D 유인효과는 분명하지 않다.

〈표 1〉 R&D 유인 비교(일반수요)

정책	a	b	k	$\sigma$	e	q	P(Q)	효과		
								직접	간접	계
<b>RPS 5% (<math>\bar{\alpha} = 0.05</math>)</b>										
배출규제	10	2	1	-	1	1.50	4.00	0.25	0.19	0.44
ETS(무상)	10	2	1	1.00	1	1.50	4.00	0.25	-0.19	0.06
ETS(유상)	10	2	1	1.00	1	1.50	4.00	0.25	0.19	0.44
배출규제	10	2	0.75	-	1	1.53	3.87	0.28	0.25	0.53
ETS(무상)	10	2	0.75	0.80	1	1.53	3.87	0.28	-0.22	0.07
ETS(유상)	10	2	0.75	0.80	1	1.53	3.87	0.28	0.21	0.49
배출규제	10	2	0.5	-	1	1.57	3.72	0.33	0.34	0.67
ETS(무상)	10	2	0.5	0.57	1	1.57	3.72	0.33	-0.26	0.07
ETS(유상)	10	2	0.5	0.57	1	1.57	3.72	0.33	0.23	0.56
<b>RPS 10% (<math>\bar{\alpha} = 0.1</math>)</b>										
배출규제	10	2	1	-	1	1.50	4.01	0.25	0.18	0.43
ETS(무상)	10	2	1	0.99	1	1.50	4.01	0.25	-0.19	0.06
ETS(유상)	10	2	1	0.99	1	1.50	4.01	0.25	0.19	0.43
배출규제	10	2	0.75	-	1	1.53	3.88	0.28	0.24	0.52
ETS(무상)	10	2	0.75	0.79	1	1.53	3.88	0.28	-0.22	0.06
ETS(유상)	10	2	0.75	0.79	1	1.53	3.88	0.28	0.21	0.49
배출규제	10	2	0.5	-	1	1.57	3.73	0.32	0.34	0.66
ETS(무상)	10	2	0.5	0.57	1	1.57	3.73	0.32	-0.25	0.07
ETS(유상)	10	2	0.5	0.57	1	1.57	3.73	0.32	0.23	0.55
<b>RPS 20% (<math>\bar{\alpha} = 0.2</math>)</b>										
배출규제	10	2	1	-	1	1.49	4.06	0.24	0.17	0.41
ETS(무상)	10	2	1	0.97	1	1.49	4.06	0.24	-0.18	0.06
ETS(유상)	10	2	1	0.97	1	1.49	4.06	0.24	0.19	0.42
배출규제	10	2	0.75	-	1	1.52	3.93	0.27	0.23	0.50
ETS(무상)	10	2	0.75	0.78	1	1.52	3.93	0.27	-0.21	0.06
ETS(유상)	10	2	0.75	0.78	1	1.52	3.93	0.27	0.21	0.48
배출규제	10	2	0.5	-	1	1.55	3.79	0.31	0.32	0.62
ETS(무상)	10	2	0.5	0.55	1	1.55	3.79	0.31	-0.24	0.06
ETS(유상)	10	2	0.5	0.55	1	1.55	3.79	0.31	0.23	0.54

RPS와 환경규제가 탄소저감기술 R&D에 미치는 영향에 대한 이론적 분석

〈표 2〉 R&D 유인 비교(탄력적 수요)

정책	a	b	k	$\sigma$	e	q	P(Q)	효과		
								직접	간접	계
<b>RPS 5% (<math>\bar{\alpha} = 0.05</math>)</b>										
배출규제	10	0.05	1	-	8	12.07	8.79	16.52	0.06	16.58
ETS(무상)	10	0.05	1	8.13	8	12.07	8.79	16.52	-1.14	15.39
ETS(유상)	10	0.05	1	8.13	8	12.07	8.79	16.52	1.20	17.73
배출규제	10	0.05	0.75	-	8	13.29	8.67	28.02	0.14	28.15
ETS(무상)	10	0.05	0.75	7.94	8	13.29	8.67	28.02	-2.13	25.89
ETS(유상)	10	0.05	0.75	7.94	8	13.29	8.67	28.02	1.84	29.86
배출규제	10	0.05	0.5	-	8	15.58	8.44	57.52	0.49	58.01
ETS(무상)	10	0.05	0.5	7.58	8	15.58	8.44	57.52	-5.12	52.41
ETS(유상)	10	0.05	0.5	7.58	8	15.58	8.44	57.52	3.03	60.55
<b>RPS 10% (<math>\bar{\alpha} = 0.1</math>)</b>										
배출규제	10	0.05	1	-	8	11.98	8.80	15.85	0.05	15.91
ETS(무상)	10	0.05	1	7.96	8	11.98	8.80	15.85	-1.10	14.75
ETS(유상)	10	0.05	1	7.96	8	11.98	8.80	15.85	1.40	17.25
배출규제	10	0.05	0.75	-	8	13.17	8.68	26.77	0.13	26.90
ETS(무상)	10	0.05	0.75	7.76	8	13.17	8.68	26.77	-2.04	24.73
ETS(유상)	10	0.05	0.75	7.76	8	13.17	8.68	26.77	2.17	28.94
배출규제	10	0.05	0.5	-	8	15.38	8.46	54.53	0.45	54.99
ETS(무상)	10	0.05	0.5	7.38	8	15.38	8.46	54.53	-4.86	49.68
ETS(유상)	10	0.05	0.5	7.38	8	15.38	8.46	54.53	3.73	58.26
<b>RPS 20% (<math>\bar{\alpha} = 0.2</math>)</b>										
배출규제	10	0.05	1	-	8	11.66	8.83	13.39	0.04	13.43
ETS(무상)	10	0.05	1	7.32	8	11.66	8.83	13.39	-0.96	12.43
ETS(유상)	10	0.05	1	7.32	8	11.66	8.83	13.39	2.06	15.45
배출규제	10	0.05	0.75	-	8	12.72	8.73	22.25	0.11	22.35
ETS(무상)	10	0.05	0.75	7.08	8	12.72	8.73	22.25	-1.73	20.51
ETS(유상)	10	0.05	0.75	7.08	8	12.72	8.73	22.25	3.28	25.53
배출규제	10	0.05	0.5	-	8	14.63	8.54	44.01	0.35	44.36
ETS(무상)	10	0.05	0.5	6.63	8	14.63	8.54	44.01	-3.95	40.07
ETS(유상)	10	0.05	0.5	6.63	8	14.63	8.54	44.01	5.98	49.99

## V. 결 론

본 연구에서는 에너지정책(RPS)과 환경규제가 기업들의 탄소저감기술 R&D에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 일정수준의 배출목표를 정하여 목표를 달성하도록 직접 규제하는 배출규제와 시장에 기반한 배출권거래제를 시행하는 경우 무상할당하는 방식과 유상할당하는 방식 등 3가지 환경규제수단을 고려하였다. 연구 결과 과점기업들의 탄소저감기술 R&D 투자는 최종소비재시장과 배출권시장에 영향을 미치며, 이러한 R&D의 간접효과는 환경규제의 유형에 따라 매우 상이하다. 배출규제와 유상할당방식의 배출권거래제는 무상할당방식의 배출권거래제보다 더 많은 R&D를 유인한다. 이것은 배출규제를 도입하는 경우에는 탄소저감기술 R&D 투자가 경쟁관계에 있는 기업의 상대적인 비용을 상승시키고 생산량을 감소시키는 반면, 무상할당방식의 배출권거래제는 탄소저감기술 R&D 투자가 배출권가격의 하락을 유인하여 경쟁관계에 있는 기업의 생산량을 증가시키기 때문이다. 유상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우에는 모든 기업들이 배출권을 구매해야 하기 때문에 배출권시장에서 발생하는 양(+ )의 간접효과가 있으며, 이러한 효과는 R&D 투자가 최종소비재시장에 미치는 음(-)의 간접효과보다 더 크기 때문에 유상할당방식의 R&D 유인이 무상할당방식보다 크다.

RPS와 더불어 환경규제의 도입은 기업들의 에너지효율향상 및 탄소저감기술에 대한 R&D 투자에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 환경규제 수단별 R&D 투자유인에 대한 평가는 매우 중요하다. 기존연구에서는 환경규제 수단별 기업의 탄소저감기술에 대한 R&D 투자 유인 순위를 분석하였으나 환경규제와 더불어 RPS가 동시에 도입되는 상황을 고려하지 않았다. 이에 본 연구에서 에너지정책(RPS)과 환경규제(배출규제/배출권거래제)가 동시에 도

입되는 경우에 환경규제수단별 기업의 탄소저감기술 R&D 투자유인을 분석하였다는데 그 의의가 있다.

다만 본 연구에서는 에너지정책 및 환경규제가 동시에 도입되는 상황에서 환경규제수단별 탄소저감기술 R&D에 대한 유인 순위만을 비교하였다는 점에서 한계가 있다. 환경규제와 더불어 에너지정책(RPS)이 동시에 도입되는 경우에 기업은 탄소저감기술 R&D뿐만 아니라 신재생에너지기술 R&D를 동시에 고려하게 될 것이다. 신재생에너지에 대한 R&D 투자는 에너지효율 또는 탄소저감기술 R&D에 대한 투자유인을 감소시킬 수 있기 때문에 환경규제수단별 R&D 유인이 달라질 수 있다. 따라서 탄소저감기술과 더불어 신재생에너지기술에 대한 기업의 R&D 경쟁에 대한 심도 깊은 논의가 본 연구를 기반으로 한 후속 연구가 될 것이다.

접수일(2011년 8월 22일), 게재확정일(2011년 9월 8일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- Downing P. B., and L. W. White. 1986. Innovation in Pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management* 13 : 18-29.
- Jung, C., K. Krutilla, and R. Boyd. 1996. Incentives for Advanced Pollution Abatement Technology at the Industry Level: An evaluation of policy Alternatives. *Journal of Environmental Economics and Management* 30 : 95-111.
- Milliman, S. R. and R. Prince. 1989. Firm Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control. *Journal of Environmental Economics and Management* 17 : 247-265.
- Montero, J.P. 2002a. Permits, Standards and Technology Innovation. *Journal of Environmental Economics and Management* 44 : 23-44.
- Montero, J.P. 2002b. Market Structure and Environmental Innovation. *Journal of Applied Economics* 5(2) : 293-325.

## &lt;부 록&gt;

## (A) RPS &amp; 배출규제

RPS와 배출규제가 도입되는 경우 기업  $i$ 와  $j$ 의 1계 미분함수는 다음과 같다.

$$P(Q) + P'(Q)q_i - k_i C'_i(q_i - \bar{e}_i) - G'_i(\bar{\alpha}_i q_i) = 0, \quad (A1)$$

$$P(Q) + P'(Q)q_j - k_j C'_j(q_j - \bar{e}_j) - G'_j(\bar{\alpha}_j q_j) = 0. \quad (A2)$$

식 (A1)과 식 (A2)을 각각  $k_i$ 에 대하여 전미분하면 다음과 같다.

$$P' \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dk_i} + P'' q_i \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - C'_i - (k_i C''_i + \bar{\alpha}_i G''_i) \frac{dq_i}{dk_i} = 0, \quad (A3)$$

$$P' \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dk_i} + P'' q_j \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - (k_j C''_j + \bar{\alpha}_j G''_j) \frac{dq_j}{dk_i} = 0. \quad (A4)$$

식 (A3)에서 식 (A4)을 빼고, 식 (A4)을 정리하면 각각 다음과 같다.

$$(P' - k_i C''_i - \bar{\alpha}_i G''_i) \frac{dq_i}{dk_i} - C'_i - (P' - k_j C''_j - \bar{\alpha}_j G''_j) \frac{dq_j}{dk_i} = 0. \quad (A5)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dk_i} + (2P' + P'' q_j - k_j C''_j - \bar{\alpha}_j G''_j) \frac{dq_j}{dk_i} = 0. \quad (A6)$$

식 (A5)를  $dq_i/dk_i$ 에 대하여 정리하여 식 (A6)에 대입하면  $dq_j/dk_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dq_j}{dk_i} = \frac{C'(P' + P''q)}{(kC'' + \bar{\alpha}G'' - P')(3P' + 2P''q - kC'' - \bar{\alpha}G'')} \quad (A7)$$

식 (A7)을 본문 식 (5)의 오른쪽 두 번째 항에 대입하면 식 (6)을 구할 수 있다.

(B) RPS & 배출권거래제(무상할당)

RPS와 무상할당방식의 배출권거래제가 도입되는 경우 기업  $i$ 와  $j$ 의 최종 소비재시장의 1계 미분함수는 각각 다음과 같다.

$$P(Q) + P'(Q)q_i - k_i C'_i(q_i - e_i) - G'_i(\bar{\alpha}_i q_i) = 0, \quad (B1)$$

$$P(Q) + P'(Q)q_j - k_j C'_j(q_j - e_j) - G'_j(\bar{\alpha}_j q_j) = 0. \quad (B2)$$

Envelope theorem을 이용하여 기업  $i$ 와  $j$ 의 수익함수를 각각  $e_i$ 와  $e_j$ 로 미분하여 배출권시장의 균형을 구하면 식 (B3)과 같다. 기업  $i$ 와  $j$ 의 배출량 합계는 규제자가 정한 총배출량( $\bar{E}$ )과 같아야 한다.

$$k_i C'_i(q_i - e_i) = k_j C'_j(q_j - e_j) = \sigma. \quad (B3)$$

$$e_i + e_j = \bar{E}. \quad (B4)$$

식 (B1) ~ 식 (B4)을 각각  $k_i$ 에 대하여 전미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P' \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_i}{dk_i} + P'' q_i \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) \\ - C'_i - k_i C''_i \left( \frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) - \bar{\alpha}_i G''_i \frac{dq_i}{dk_i} = 0, \end{aligned} \quad (B5)$$

$$P' \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) + P' \frac{dq_j}{dk_i} + P'' q_j \left( \frac{dq_i}{dk_i} + \frac{dq_j}{dk_i} \right) - k_j C_j'' \left( \frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) - \bar{\alpha}_j G_j'' \frac{dq_j}{dk_i} = 0, \quad (B6)$$

$$C_i' + k_i C_i'' \left( \frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = k_j C_j'' \left( \frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) = 0, \quad (B7)$$

$$\frac{de_i}{dk_i} + \frac{de_j}{dk_i} = 0. \quad (B8)$$

식 (B5)에서 식 (B6)을 빼고, 식 (B6)을 정리하면 각각 다음과 같다.

$$(P' - k_i C_i'' - \bar{\alpha}_i G_i'') \frac{dq_i}{dk_i} - C_i' + k_i C_i'' \left( \frac{de_i}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right) - (P' - k_j C_j'' - \bar{\alpha}_j G_j'') \frac{dq_j}{dk_i} = 0, \quad (B9)$$

$$(P' + P'' q_j) \frac{dq_i}{dk_i} + k_j C_j'' \frac{de_j}{dk_i} + (2P' + P'' q_j - k_j C_j'' - \bar{\alpha}_j G_j'') \frac{dq_j}{dk_i} = 0. \quad (B10)$$

기업  $i$ 와  $j$ 는 대칭적(symmetry)이라는 가정과 식 (B7)과 식 (B8)로부터 다음 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{de_i}{dk_i} = \frac{1}{2} \frac{dq_i}{dk_i} - \frac{1}{2} \frac{dq_j}{dk_i} + \frac{C_i'}{2k_i C_i''}, \quad (B11)$$

$$\frac{de_j}{dk_i} = \frac{1}{2} \frac{dq_j}{dk_i} - \frac{1}{2} \frac{dq_i}{dk_i} - \frac{C_j'}{2k_j C_j''}. \quad (B12)$$

식 (B11)에서 식 (B12)을 빼면 다음과 같다.

$$\frac{de_i}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} = \frac{dq_i}{dk_i} - \frac{dq_j}{dk_i} + \frac{C_i'}{k_i C_i''}. \quad (B13)$$

식 (B13)을 식 (B9)에 대입하면  $\frac{dq_i}{dk_i} = \frac{dq_j}{dk_i}$  임을 알 수 있다.  $\frac{dq_i}{dk_i} = \frac{dq_j}{dk_i}$  과 식 (B12)를 식 (B10)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$(3P' + 2P''q_j - k_j C_j'' - \bar{\alpha}_j G_j'') \frac{dq_j}{dk_i} - \frac{C'}{2} = 0. \quad (B14)$$

식 (B14)와 기업  $i$ 와  $j$ 는 대칭적이라는 가정을 이용하여  $dq_j/dk_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dq_j}{dk_i} = \frac{C'}{2(3P' + 2P''q - kC'' - \bar{\alpha}G'')}. \quad (B15)$$

식 (B15)을 본문 식 (11)의 오른쪽 두 번째 항에 대입하고 무상할당의 경우 균형에서 배출권 초기할당이 배출량과 같다는 것( $\epsilon = e$ )을 적용하면 식 (12)을 구할 수 있다.

### (C) RPS & 배출권거래제(유상할당)

식 (9)의  $\sigma$ 를  $k_i$ 로 전미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma}{dk_i} = C'_i + k_i C_i'' \left( \frac{dq_i}{dk_i} - \frac{de_i}{dk_i} \right) = k_j C_j'' \left( \frac{dq_j}{dk_i} - \frac{de_j}{dk_i} \right). \quad (C1)$$

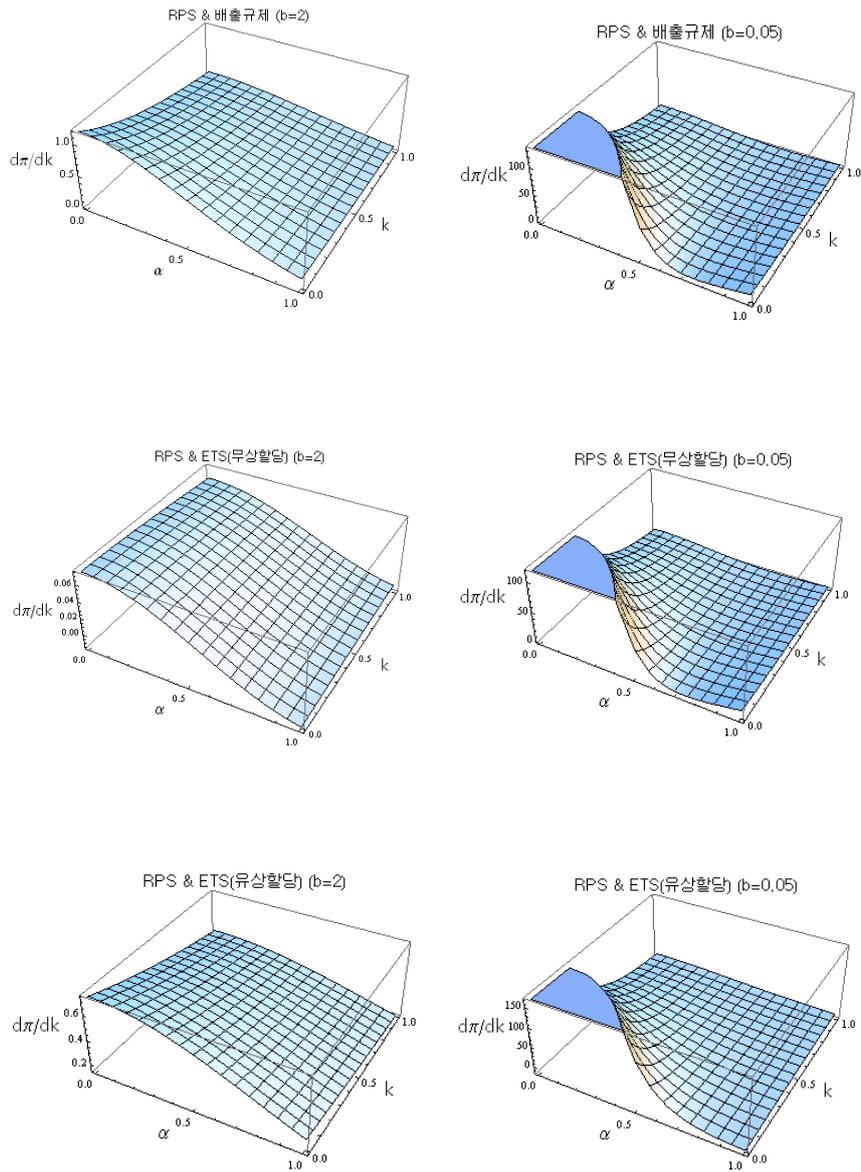
식 (C1)에 식 (B12)과 식 (B15)을 대입하여  $d\sigma/dk_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d\sigma}{dk_i} = \frac{C' (3P' + 2P''q - \bar{\alpha}G'')}{2(3P' + 2P''q - kC'' - \bar{\alpha}G'')}. \quad (C2)$$

여기서  $P' + P''q < 0$ 을 적용하면  $d\sigma/dk_i > 0$ 임을 알 수 있다. 식 (C2)를 식 (11)의 세 번째 항에 대입하면 식 (14)을 구할 수 있다.

RPS와 환경규제가 탄소저감기술 R&D에 미치는 영향에 대한 이론적 분석

〈부도 1〉 RPS & 환경규제수단별 R&D 유인 비교



ABSTRACT

## R&D Incentives with RPS and Environment Regulations

Kyonghwa Jeong\*

This paper studies firm's incentives to invest carbon technology innovation under energy and environmental regulations such as RPS and emission standards or emission trading schemes in an oligopoly market. Unlike a competitive market, strategic effects of R&D on output market and emission market arise, which vary across different environment policies. Emission standards and ETS with auctions provide greater incentives than those offered by ETS with free allocation.

Key Word : innovation, RPS, environmental regulations, oligopoly market  
JEL Code : L13, L50, Q28

---

\* Research Fellow, Korea Energy Economics Institute, jeongkyo@keei.re.kr