자원 · 환경경제연구 제 25 권 제 3 호
Environmental and Resource Economics Review
Volume 25, Number 3, September 2016 : pp. 403~419
DOI: http://dx.doi.org/10.15266/KEREA.2016.25.3.403

배출권거래제에서의 의사결정 순서와 불확실성 영향 분석

문진영*

요 약 : 배출권거래제는 기업으로 하여금 최저의 비용으로 감축을 유도하며 배출에 대한 불확실성이 없을 때 효율적인 것으로 알려져 있다. 본 연구는 배출에서의 불확실성이 기업의 배출권 구매와 감축에 미치는 영향을 분석하였다. 배출량이 확실한 경우보다 불확실할 때 기업이 더 많은 감축을 할 것인지는 한계기대벌금과 한계저감비용에 좌우되었다. 한계기대벌금이 한계감축비용보다 크다면, 기업은 배출량이 확실한 경우보다 더 많이 감축하고 불확실성의 증가에 따라 배출량도 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구는 또한 감축과 배출권 구매의 순서가 기업의 결정에 미치는 영향을 분석하였으나, 의사결정의 순서와 상관없이 기대배출량은 동일한 것으로 확인되었다.

주제어 : 배출권거래제, 불확실성, 배출권

JEL 분류 : C7, Q5

접수일(2016년 8월 22일), 수정일(2016년 9월 25일), 게재확정일(2016년 9월 28일)

* 대외경제정책연구원, 부연구위원(e-mail: jymoon@kiep.go.kr)

The Impacts of Decision Order and Uncertainty on Emissions Trading

Jin-Young Moon*

ABSTRACT : Cap-and-trade policies that allow firms to trade emission allowances are designed to reduce emissions at least cost and are shown to be efficient when there is no uncertainty over emissions. This paper examines how uncertainty in emissions affects firms' decisions about permit purchase and abatement. The results show that whether firms abate more under uncertainty compared to a case with no uncertainty depends on the expected penalty cost and marginal abatement cost. If the expected marginal penalty cost is greater than the marginal abatement cost, the firm will choose to reduce emissions and abate more under uncertainty. When the expected marginal penalty is greater than the marginal cost of abatement, increases in uncertainty result in reduced emissions. This paper also examines whether the order of abatement and permit trading and the realization of uncertainty affect firms' decisions. The results show that total expected emissions are the same regardless of the order of moves.

Keywords : Emissions trading, Uncertainty, Permits

Received: August 22, 2016. Revised: September 25, 2016. Accepted: September 28, 2016.
* Research Fellow, Korea Institute for International Economic Policy(e-mail: jymoon@kiep.go.kr)

I. 서 론

적은 비용으로 환경보호를 달성하기 위한 수단으로 시장에 기초한 수단이 주목을 받고 있다. EU-ETS (European Union Emissions Trading System)는 온실가스를 대상으로 2005년에 출범하여, 전세계에서 가장 큰 규모로 운영되고 있으며, 우리나라는 2014년 12월 23개 업종 520여개 업체에 온실가스 배출권을 할당하여 2015년 1월 1일부터 온실가스 배출권거래제를 시행하고 있다.

배출권거래제는 전반적인 배출한도(cap)를 설정하고 오염물질을 배출하는 개별 출처(sources)에게 배출권(allowance)을 나눠주고 부여받은 한도 내에서 배출을 허용한다. 배출권거래제에 참여하는 개별 기업은 배출권을 자유로이 거래할 수 있고, 배출한도 보다 추가 배출이 필요한 기업은 여유분의 배출한도를 가진 기업으로부터 배출권을 확보할 수 있도록 하고 있다.

Montgomery (1972)는 배출권거래제를 통해 최소의 비용으로 환경 관련 목표를 달성한다고 제시한바 있으나, 이는 정태(static) 모형과 완전경쟁, 배출비용에 대한 완전한 정보 등 여러 가정에 기초하고 있다. 그러나 현실적으로 여러 가지 시장의 불완전 요인은 환경 목표의 최소 비용 달성을 어렵게 한다(Taschini, 2010). 일례로 기업이 시장 지배력을 가지거나(Hahn, 1983; Misiolek and Elder, 1989), 배출권거래제에 거래비용이 있다면(Stavins, 1995), Montgomery가 제시한 결과를 달성할 수 없게 된다.

불확실성(uncertainty) 또한 마찬가지 요인이다. 감축시설의 오작동, 기술개발, 날씨 등 여러 불확실한 요인이 계획된 배출량과 실제 배출량과의 차이를 유발한다. 불확실한 요인이 구체화되면서 주어진 배출한도 달성이 더 쉬워지거나 어려워질 수도 있기 때문이다. 또한 배출한도가 주어진 기간(capped period) 동안 기업들은 여러 번 결정의 순간이 있고, 이를 통해 배출 전략을 수정할 수 있다. 배출한도 기간이 1년이라면, 기업은 일간 또는 주간 단위로 새로운 정보에 기초하여 자신들의 배출 전략을 반영할 수 있다.

이러한 불확실성과 역동성을 고려할 때, 배출한도를 가진 기업이 직면한 최적의 전략(optimal strategy)은 무엇이며, 기업의 배출권 거래나 배출량 결정의 순서가 균형(equilibrium)에 어떤 영향을 주는지를 분석할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 기업 의사결정의 순서를 감안하면서 배출권 거래에 있어서의 불확실한 요인이 최적인 배출 전략

에 미치는 영향을 분석함에 있다.

배출권 거래에서의 동태성은 배출권 이월(banking)이나 차입(borrowing)에서 다루어지고 있으며(Rubin, 1996; Schennach, 2000; Park 2012), 배출권 거래와 관련된 불확실성 문제도 다수의 논문에 분석된 바 있다(Ben-David et al., 2000; Zhao, 2003; Gupta and Maranas, 2003; Li 2016). 배출권 거래에 있어 기업의 의사결정을 다룬 Mrozek and Keeler (2004)도 배출권거래제를 두 기간 동안으로 나누어 분석을 하고 있으나 배출량이나 배출권 구매에 대한 순서를 세분화하여 분석하지 않았다.

따라서 본 연구는 배출량의 불확실성과 동태성이 기업의 행동에 미치는 영향을 분석함에 있어 배출권 거래와 배출량 결정의 순서를 고려하여 최적 배출량을 도출하는 기존 문헌과의 차별성을 가지고 있다. 즉, 배출권 거래제에 참여하는 기업의 의사결정 순서의 차이가 균형에 미치는 영향을 확인하고, 각 상황에서의 기업의 선택을 분석하였다. 본 연구는 다음 2장에서 분석모형을 설정하고, 3장은 기업의 의사결정 순서에 따른 결과를 제시하고, 4장에서 결론으로 정리하였다.

II. 배출권거래 모형의 설정

1. 모형 가정

오염물질을 배출하는 n개의 기업(i=1, 2, ⋯, n)이 있다고 가정하자. 기업 i는 배출권(allowable emissions)으로 a_i를 할당 받으며, 아무런 오염 물질 저감활동이 없을 때의 초기 배출량(initial emissions)은 E_i로 설정한다. 기업 i의 저감(abatement) 수준이 q_i일 경우, 해당 기업의 배출량은 초기배출량에서 저감 수준을 제한 부분이 된다: $e_i = E_i - q_i$. 기업 i의 저감비용 함수 $C^i(q_i)$는 두 번 연속 미분 가능(twice continuously differentiable)하며, 저감에 대해 증가함수이며 $(C_q^i = \partial C^i(q_i)/\partial q_i > 0)$ 볼록하다고 $(C_{qq}^i = \partial C_q^i/\partial q_i > 0)$ 가정한다. 개별 기업의 배출권 매매를 통한 순구매(net purchase)를 b_i라고 할 때, 기업은 배출권을 순매수$(b_i > 0)$하거나 순매도$(b_i < 0)$하며, 기업은 배출권시장의 배출권 가격(P)의 수취자(price takers)로 가정한다.

개별기업은 배출 수준과 배출권의 순구매를 한번씩 결정한다고 가정하자. 기업 i가

보유한 배출권(초기 배출한도와 배출권 순구매의 합)이 배출량보다 동일하거나 많을 경우 $(a_i + b_i \geq e_i)$, 기업 i는 배출권거래제 규정을 준수(compliance)하여, 벌금(penalty)을 낼 필요가 없다. 그러나 기업 i가 보유한 배출권보다 배출량이 많다면$(a_i + b_i < e_i)$, 기업 i는 $\phi \cdot (e_i - a_i - b_i)$만큼 벌금을 지불한다. 이때 배출한도 초과 단위당 벌금(ϕ)은 한계저감비용(marginal costs of abatement)보다 크다고 가정한다$(C_q^i < \phi$ for $0 \leq q_i \leq E_i)$. 배출권 가격은 배출권거래 시장의 균형에서 내생적으로 결정된다. 기업들은 한계저감비용이 동일해질 때까지 배출권을 거래하며, 이를 통해 배출권 가격이 결정된다. 개별기업의 목적함수는 배출 저감비용과 배출권 구매 및 벌금을 최소화함에 있으며, 기업 i의 비용은 다음과 같이 정의된다:

$$\Pi_i = C^i(E_i - e_i) + P \cdot b_i + I_i \cdot \phi \cdot (e_i - a_i - b_i)$$
$$\text{where } I_i = 1, \text{ if } e_i - a_i - b_i \geq 0, \text{ otherwise } I_i = 0.$$

세번째 항(term)은 기업 i의 배출한도보다 더 많이 배출한 경우에 양(positive)의 값을 가진다.

2. 기대벌금의 설정

실제 배출량(e_i)은 기대(expected) 배출량(m_i)과 변동(stochastic) 배출량(ε_i)의 합으로$(e_i = m_i + \varepsilon_i)$ 가정한다. ε_i는 확률변수(random variable)로서 모든 $i(\neq j)$에 있어 ε_i와 ε_j는 독립(independent)이라고 가정한다. 그리고 ε_i는 Mrozek and Keeler (2004)와 마찬가지로 $[-\psi, \psi]$ 범위에서 균등(uniformly)하게 분포하며, ε_i의 평균은 0으로 가정한다 $(E(\varepsilon_i) = 0)$.

기업의 최대 배출량이 보유 배출권 보다 적을 경우$(m_i + \psi \leq a_i + b_i)$, 벌금을 낼 필요는 없으나, 최저 배출량이 보유 배출권 보다 많을 경우$(m_i - \psi \geq a_i + b_i)$, 기업은 벌금을 내게 된다. 이 두 가지는 ε_i의 변동 범위내에서 확실하게 결정된다.

그러나 기업의 실현 가능한 배출량이 기대 배출량의 수준 전후로 변동한다면 $(m_i - \psi < a_i + b_i < m_i + \psi)$ 기업의 배출권거래제 위반(배출량이 보유 배출권을 초과) 여

부는 불확실해진다. 따라서 기대벌금(expected penalty, E(F_i))은 다음과 같이 정의된다:

$$E(F_i) = \phi \int_{a_i + b_i - m_i}^{\psi} \left[(m_i + \varepsilon_i - a_i - b_i) \left(\frac{1}{2\psi} \right) \right] d\varepsilon_i$$

여기서 대괄호안의 첫번째 항은 배출한도를 초과하는 배출량이며, 두번째 항은 ε_i의 확률밀도(probability density)이다. 기업이 배출한도를 준수하면 배출량$(m_i + \varepsilon_i)$은 $a_i + b_i$ 동일하기 때문에 적분의 하단은 $a_i + b_i - m_i$이다. 따라서 기대벌금은 다음과 같이 계산된다:

$$E(F_i) = \left(\frac{\phi}{4\psi} \right) (\psi + m_i - a_i - b_i)^2 \tag{1}$$

3. 의사결정 순서에 따른 세 가지 시나리오 설정

본 연구는 의사결정의 순서 측면에서 세 가지 경우로 구분한다. 먼저 기업이 배출권을 거래한 후에 저감하는 경우이다(case1). 또는 반대의 순서로 기업이 저감을 먼저 결정하고 배출권을 거래하는 경우로, 이는 두 가지로 다시 구분된다. 즉, 변동배출량(ε_i)이 실현되기 전에 배출권을 거래 하거나(case2), 변동배출량이 실현된 이후에 배출권을 거래한다(case3). 실제 배출량은 불확실하기 때문에 기업이 감축을 결정하며, 이는 기대 배출량 수준을 결정하는 것과 같다.

세 가지 모두 두 단계의 의사결정을 수반하여, 두 개의 부분게임(subgame)이다. 본 모형은 단순전략 부분게임 완전베이지안 내쉬균형[1]으로 풀어진다. 부분게임 완전 베이지안 내쉬균형에서 기업의 전략이 모든 부분게임에서 내쉬 균형에 이르도록 요구하며(Selten, 1965), 부분게임 균형을 찾기위해 후방귀납(backward induction)을 적용한다.

1) pure strategy subgame perfect Bayesian Nash equilibrium

III. 의사결정 순서별 모형 분석

1. 기업이 배출권을 거래하고 저감하는 경우(case1)

기업의 보유 배출권이 배출 가능한 수준 내에서 변동하는 경우($m_i - \psi < a_i + b_i < m_i + \psi$), 기업은 의사결정의 두 번째 단계(second stage)에서 감축비용과 기대벌금의 합을 최소로 하는 기대배출량(m_i)을 결정한다:

$$\min_{m_i} C^i(E_i - m_i) + \left(\frac{\phi}{4\psi}\right)(\psi + m_i - a_i - b_i)^2$$

감축비용 함수를 $C^i(q_i) = \frac{1}{2}\alpha_i q_i^2$로 적용하면, 1계 조건과 기대배출량이 유도된다:

$$\alpha_i(E_i - m_i) = \left(\frac{\phi}{2\psi}\right)(\psi + m_i - a_i - b_i),$$
$$m_i = \frac{2\psi\alpha_i E_i - \phi(\psi - a_i - b_i)}{2\psi\alpha_i + \phi}. \tag{2}$$

의사결정의 첫 번째 단계(first stage)에서 기업이 배출권 구매를 결정할 때, 식 (2)에서 도출된 m_i를 이용한다:

$$\min_{b_i} E\left(C^i(E_i - m_i)\right) + P \cdot b_i + \left(\frac{\phi}{4\psi}\right)(\psi + m_i - a_i - b_i)^2$$

목적함수에 식 (2)를 대입하고, 1계 조건을 통해 배출권의 순구매(net purchase of permits), b_i를 도출한다:

$$b_i = E_i + \psi - a_i - P\left(\frac{2\psi\alpha_i + \phi}{\alpha_i\phi}\right). \tag{3}$$

배출권거래제에 참여하는 모든 기업의 순구매를 합산($\Sigma_{(i=1)}^{n} b_i = 0$)을 식 (3)에 적용하면, 배출권 가격을 유도할 수 있다:

$$P^* = \frac{\Sigma_{i=1}^{n}(E_i + \psi - a_i)}{\Sigma_{i=1}^{n}\left(\frac{2\psi\alpha_i + \phi}{\alpha_i \phi}\right)}. \tag{4}$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면, 배출권 순구매의 해(solution)가 구해진다:

$$b_i^* = E_i + \psi - a_i - \left(\frac{\Sigma_{i=1}^{n}(E_i + \psi - a_i)}{\Sigma_{i=1}^{n}\left(\frac{2\psi\alpha_i + \phi}{\alpha_i}\right)}\right)\left(\frac{2\psi\alpha_i + \phi}{\alpha_i \phi}\right). \tag{5}$$

모형 도출의 단순화를 위해 모든 i에 대해 $\alpha_i = 1$이며, 모든 기업의 ψ가 동일하다($\Sigma_{i=1}^{n}\psi = n\psi$)고 가정하면, 총기대배출량(total expected emissions), $M(= \Sigma_{i=1}^{n} m_i)$은 식 (2)를 통해 유도된다:

$$M = \sum_{i=1}^{n} m_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{2\psi\alpha_i E_i - \phi(\psi - a_i - b_i)}{2\psi\alpha_i + \phi} = \frac{2\psi E - \phi n\psi + \phi A}{2\psi + \phi}. \tag{6}$$

식 (6)을 활용하여 A($= \Sigma_{i=1}^{n} a_i$)로 표현되는 총배출한도(total expected emissions)와 총기대배출량을 비교하는 것이 가능하다:

$$A - M = \frac{\psi(2A - 2E + \phi n)}{2\psi + \phi} \tag{7}$$

여기서 $\Sigma_{i=1}^{n} E_i = E$를 의미한다. 식 (7)의 분자가 양수이면, 총배출한도는 식 (8)과 같이 총기대배출량 보다 크게 된다:

$$A - M > 0, \text{ if } \frac{\phi}{2} > \frac{(E-A)}{n}. \tag{8}$$

모든 기업의 동일한 설정을 가정하면 $\frac{(E-A)}{n}$는 $E_i - a_i$같으며, 배출량이 확실한 경우, 기업은 배출량과 배출한도를 동일하게 설정$(e_i = a_i)$하여 저감수준은 $q_i = E_i - a_i$로 표현된다. 저감비용함수 $C^i(q_i) = \frac{1}{2}\alpha_i q_i^2$와 $\alpha_i = 1$를 가정한다면, 한계저감비용(q_i)는 $q_i = E_i - a_i$로 나타난다. 배출량이 불확실한 경우, 기업은 한계저감비용과 한계기대벌금(expected marginal penalty)이 동일한 수준에서 배출량을 결정한다. 따라서 저감수준을 배출량이 불확실한 경우에도 배출량이 확실한 경우와 동일하게 할 경우 기업은 동일한 한계저감비용$(E_i - a_i)$ 에 놓이나, 50%의 확률로 벌금에 직면한다. 이는 불확실한 배출 상황에서 q_i는 $E_i - m_i - \varepsilon_i$와 같고, ε_i는 0을 기준으로 동일하게 분포하기 때문에 기대벌금은 $\frac{\phi}{2}$가 된다.

따라서 한계기대벌금이 한계저감비용보다 크다면, 기업은 불확실성하에서 식 (8)과 같이 배출량을 줄이고 저감량을 늘리는 선택을 할 것이다. 한계저감비용과 동일한 배출권 가격은 상승하게 된다. 반대로 한계기대벌금이 한계저감비용보다 작다면, 기업은 배출을 늘리고, 저감량을 줄이게 된다:

$$A - M < 0, \text{ if } \frac{\phi}{2} < \frac{(E-A)}{n}.$$

한계기대벌금과 한계저감비용이 동일한 경우는 총배출한도와 총기대배출량이 동일하다:

$$A = M, \text{ if } \frac{\phi}{2} = \frac{(E-A)}{n}$$

2. 배출량 발생 이전에 배출권을 거래하는 경우(case2)

기업은 의사결정의 두 번째 단계에서 배출권 구매비용과 기대벌금을 최소로 하는 목적함수에서 배출권 순구매를 결정한다:

$$\min_{b_i} P \cdot b_i + \left(\frac{\phi}{4\psi}\right)(\phi + m_i - a_i - b_i)^2.$$

1계조건을 통해 배출권 가격이 유도되며 ($P = \left(\frac{\phi}{2\psi}\right)(\psi - a_i - b_i + m_i)$) 각 기업은 배출권 순구매를 결정한다:

$$b_i = \psi - a_i + m_i - P\left(\frac{2\psi}{\phi}\right). \tag{9}$$

식 (9)에 $\Sigma_{i=1}^{n} b_i = 0$을 적용하면, 배출권 가격이 식 (10)과 같이 유도된다:

$$P^* = \frac{\phi(n\psi - \Sigma_{i=1}^{n} a_i + \Sigma_{i=1}^{n} m_i)}{2n\psi}. \tag{10}$$

식 (10)을 다시 식 (9)에 대입하면, 균형수준에서의 배출권 순구매를 확인할 수 있다:

$$b_i^* = m_i - a_i + \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_1 - m_i). \tag{11}$$

각 기업은 의사결정의 첫 단계에서 다음과 같은 목적함수에서 기대배출량을 결정하게 된다:

$$\min_{m_i} E(C^i(E_i - m_i) + P \cdot b_i) + \left(\frac{\phi}{4\psi}\right)(\psi + m_i - a_i - b_i)^2. \tag{12}$$

저감비용함수$C^i(q_i)=\frac{1}{2}\alpha_i q_i^2$ 와 식 (10~11)을 식 (12)에 대입하면 다음과 같은 목적함수로 바뀌게 되며:

$$\min_{m_i}\ \frac{1}{2}\alpha_i(E_i-m_i)^2+\frac{\phi(n\psi-\sum_{i=1}^{n}a_i+\sum_{i=1}^{n}m_i)}{2n\psi}\left(m_i-a_i+\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i-m_i)\right)$$
$$+\left(\frac{\phi}{4\psi}\right)\left(\psi-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i-m_i)^2\right).$$

1계 조건은 식 (13)과 같다:

$$-\alpha_i(E_i-m_i)+\frac{\phi}{2n\psi}\left(m_i-a_i+\frac{A-M}{n}\right)+\frac{\phi(n\psi-A+M)}{2n\psi}\left(1-\frac{1}{n}\right)+\frac{\phi}{2\psi}\left(\psi-\frac{A-M}{n}\right)\frac{1}{n}=0 \tag{13}$$

총기대배출량(M)은 모든 기업에 대해 동일한 $\alpha_i(=1)$와 ψ를 가정하고 식 (13)을 모든 기업 i에 대해 합산하면 유도된다:

$$M=\frac{2\psi E-\phi n\psi+\phi A}{2\psi+\phi}. \tag{14}$$

식 (14)는 case1에서의 총기대배출량과 동일하기 때문에 총배출한도와 총기대배출량간의 관계는 식 (7)과 동일하다. 식 (14)를 식 (13)에 대입하면 기대배출량(m_i)이 유도된다:

$$m_i=\frac{2n\psi E_i+\phi a_i-\phi\psi n+\frac{\phi\psi(n-1)(2A-2E+\phi n)}{n(2\psi+\phi)}}{2n\psi+\phi}. \tag{15}$$

식 (14)는 식 (10~11)에 대입하면, 동일한 $\alpha_i(=1)$와 ψ를 가정하에서 case1의 배출권 가격과 동일해진다:

$$b_i = \frac{2\psi(nE_i - na_i + A - E)}{2n\psi + \phi}$$

$$P = \frac{\phi(n\psi - A + E)}{n(2\psi + \phi)}.$$

3. 배출량 발생 이후에 배출권을 거래하는 경우(case3)

기업은 의사결정의 두 번째 단계에서 배출권 구매비용과 벌금을 최소로 하는 목적함수에서 배출권 순구매를 결정한다:

$$\min_{b_i} P \cdot b_i + I_i \cdot \phi \cdot (e_i - a_i - b_i)$$

where $I_i = 1$, if $e_i - a_i - b_i \geq 0$, otherwise $I_i = 0$.

이때의 균형은 배출권의 총초과수요(total excess demand of permits), X에 달려있다:

$$X = \sum_{i=1}^{n}(e_i - a_i - b_i) = \sum_{i=1}^{n} e_i - \sum_{i=1}^{n} a_i$$

세 가지의 X로 구분이 된다. 첫째, X = 0이면, 총배출량은 총배출한도와 동일하여 배출시장의 균형이 존재하게 된다. 배출권의 순구매는 $b_i = e_i - a_i$로 정의되고 목적함수는 $P \cdot (e_i - a_i)$가 된다. 이때의 균형 배출권 가격은 $P \in [0, \phi]$로 나타낼 수 있다.

둘째, X > 0이면 배출권에 대한 초과 수요가 존재한다. 이때 적어도 한 기업은 보유한 배출권(초기 배출한도와 배출권 순구매의 합)보다 배출량이 더 많게 되고($I_i = 1$), 그 기업의 목적함수 1계 조건은 $P = \phi$ 가 된다. 기업은 벌금을 내거나 벌금비용을 배출권을 구매하는 것이 무차별하기 때문에 배출권의 구매 수준은 결정되지 않는다.

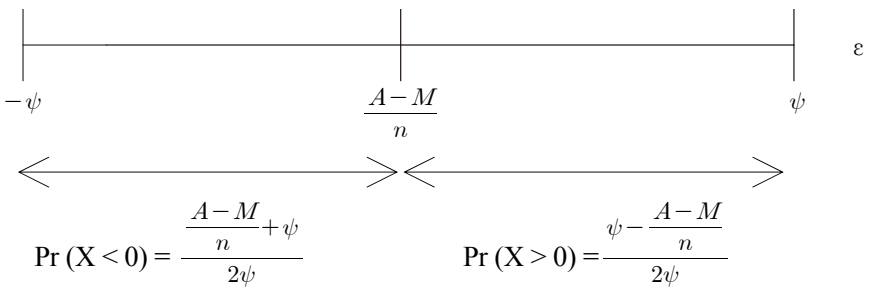
셋째, X < 0이면 배출권에 대한 초과 공급이 존재한다. 이 경우에도 적어도 한 기업은 보유한 배출권보다 배출량이 더 적게되어($I_i = 0$), 목적함수의 1계 조건은 $p = 0$가 된다. 기업은 제로 가격에 배출권을 매도하거나, 불필요한 배출권을 보유하고 있는 것이 무차별하기 때문에 배출권의 구매 수준은 X > 0인 경우처럼 결정되지 않는다.

각 기업의 배출권 초과수요는 $x_i = m_i + \varepsilon_i - a_i - b_i$와 같다고 하고, 기업이 불확실한 배출량에 대한 동일한 충격(shock)을 가진다($\Sigma_{i=1}^{n}\varepsilon_i = n\varepsilon$)고 가정할 경우, 배출권의 총초과수요는 다음과 같다:

$$X = \sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n}(m_i + \varepsilon_i - a_i - b_i) = M + n\epsilon - A \tag{16}$$

식 (16)을 통해 $\varepsilon > \frac{A-M}{n}$이면 배출권 초과수요가 존재한다. 따라서 <그림 1>에 서 확인되듯이 초과 수요가 존재할 확률은 $\Pr(X > 0) = \frac{\psi - \frac{A-M}{n}}{2\psi}$ 이며, 배출권의 초과 공급확률은 $\Pr(X < 0) = \frac{\frac{A-M}{n} + \psi}{2\psi}$ 로 나타낼 수 있다.

〈그림1〉 ε의 분포와 X의 확률



기업 의사결정 2단계에서의 배출권 거래 및 벌금비용은 X값에 따라 세 가지 경부로 구분되어 상정될 수 있다(<표 1 참고>). X > 0이면 배출권가격이 단위당 벌금과 동일($P = \phi$)하여, $\phi \cdot (m_i + \varepsilon_i - a_i)$만큼 배출권 거래 및 벌금 비용이 발생한다. X = 0 이면, 벌금 없이 배출권 거래비용 $P(m_i + \varepsilon_i - a_i)$만 발생하며, 이는 배출권 순구매가 $b_i = e_i - a_i = m_i + \varepsilon_i - a_i$이기 때문이다. X < 0이면 벌금도 없고, 배출권 가격도 0이므로 배출권 거래

비용 역시 0이 된다.

〈표 1〉 배출권 거래 및 벌금 비용

X > 0	X = 0	X < 0
$\phi \cdot (m_i + \varepsilon_i - a_i - b_i) + Pb_i$ $= \phi \cdot (m_i + \varepsilon_i - a_i)$	$Pb_i = P(m_i + \varepsilon_i - a_i)$	$Pb_i = 0$

기업은 의사결정의 첫 번째 단계에서 기대배출량을 결정한다:

$$\min_{m_i} E\left(C^i(E_i - m_i)\right) + \phi \int_{\frac{A-M}{n}}^{\psi} \left[(m_i + \varepsilon_i - a_i)\left(\frac{1}{2\psi}\right)\right] d\varepsilon_i$$

기업의 목적함수는 비용함수를 $C^i(q_i) = \frac{1}{2}\alpha_i q_i^2$로 적용할 경우 다음과 같다:

$$\min_{m_i} \frac{1}{2}\alpha_i (E_i - m_i)^2 + \phi \int_{\frac{A-M}{n}}^{\psi} \left[(m_i + \varepsilon_i - a_i)\left(\frac{1}{2\psi}\right)\right] d\varepsilon_i$$

총기대배출량(M)과 개별기업의 기대배출량(m_i)이 1계조건을 통해 유도되며, 이는 식 (14) 및 식 (15)와 동일하게 된다.

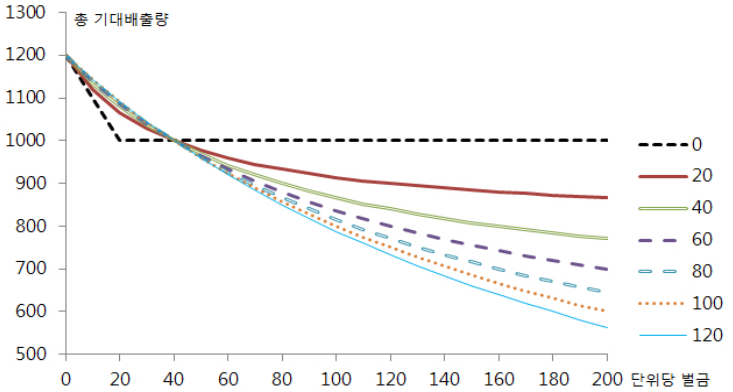
4. 불확실성과 벌금에 따른 총기대배출량의 변화

<그림 2>는 불확실성과 단위당 벌금(penalty fee)의 변화에 따른 총기대배출량을 나타내고 있다. 이 예제는 10개의 배출기업(n=10), 1,200단위의 초기 배출량(E), 1,000단위의 총 배출한도(A), 비용함수 $C^i(q_i) = 0.5q_i^2$와 모든 기업에 동일한 ψ를 가정$\sum_{i=1}^{n} \psi = n\psi$ 하고 있다. 배출량의 불확실성은 0부터 120까지 변화하는 ψ를 통해 나타내며, 총 기대배출량은 식 (14)를 통해 계산하였다.

배출량이 확실한 경우$(\psi = 0)$ 단위당 벌금이 20 단위보다 작다면 총배출량은 배출한도보다 크게 되고, 한계감축비용이 한계 벌금을 초과하기 때문에 기업은 배출권 규정을

준수하지 않게된다. 배출량이 불확실하면한 경우, 총배출한도와 기대배출량은 단위 벌금이 40일 때 동일하며 이는 각 기업이 20단위를 감축하면서 기대벌금(40/2 =20)과 한계감축비용이 같기 때문이다. 단위당 벌금의 증가는 총기대배출량의 감소로 이어진다. 단위당 벌금이 40단위 이상이면, 한계감축비용은 한계기대벌금보다 적게되어 기업은 감축을 더 하게 된다. 단위당 벌금이 40이상일 경우 불확실성의 증가는 기대 배출량 감소로 나타난다.

〈그림 2〉 불확실성과 벌금이 총기대배출량에 미치는 영향



IV. 결론 및 한계

본 연구는 기업의 의사결정 순서를 감안하여, 배출권거래제에서의 불확실성이 기업의 최적 전략에 미치는 영향을 분석하였다. 기업은 감축과 배출권 순구매라는 두 가지 선택변수와 두 단계의 의사결정 단계가 있기 때문에 본 모형은 기업 의사결정의 순서가 균형에 미치는 영향을 분석하였다.

불확실한 배출 상황에서 세 가지 경우가 고려되었다. 기업의 의사결정 순서와 관련없이 모두 동일한 총기대배출량이 도출되었다. 배출량이 확실한 경우보다 기업이 더 많은 감축을 할 것인지는 한계기대벌금과 한계저감비용에 좌우되었다.

한계기대벌금이 한계저감비용보다 클 경우, 기업의 배출은 감소하고 배출권 가격은

배출량이 확실한 경우보다 더 높게 된다. 마찬가지로 한계기대벌금이 한계저감비용보다 작다면 기업은 배출을 늘리고 감축을 줄이게 된다.

총기대배출량은 변동가능한 배출 수준으로 나타난 배출량의 불확실성과 단위당 벌금에 영향을 받은 것으로 모형을 통해 확인되었다. 단위당 벌금의 증가는 총기대배출량의 감소로 나타났다. 그리고 한계기대벌금이 한계저감비용보다 큰 경우, 불확실성의 증가는 기대배출량의 감소로 나타났다.

본 모형은 분석의 편의를 위해 단순한 비용함수의 모형을 기초로 모든 기업이 동일한 비용함수와 동일한 배출량의 변동수준에 기초로 하고 있어 실제적인 상황을 완전히 반영하고 있지 못하는 한계가 있다. 실제적인 감축 비용과 감축 자료가 가용하다면, 기업의 감축의사 결정에 있어서의 벌금의 영향을 실증적으로 분석할 수도 있을 것이다. 배출권거래제 위반에 따른 단위당 벌금은 본 모형의 설정과 달리 배출권 가격이나 배출량의 함수로도 고려될 수 있다. 또한 본 모형은 배출권거래제에서의 이월과 차입을 고려하여 기업의 의사결정의 순서를 고려하는 모형으로 확대될 수도 있다. 또한 본 연구는 불확실한 배출하에서 사회전체의 후생에 미치는 영향을 분석하는 등 다양한 모형으로의 확장을 위한 기초적인 분석 틀을 제공함에 의미와 한계가 있다.

[References]

Ben-David, S., D. Brookshire, Burness, S., McKee, M. and C. Schmidt, “Attitudes toward Risk and Compliance in Emission Permit Markets,” *Land Economics*, Vol. 76, No. 4, 2000, pp. 590~600.

Gupta, A. and C. D. Maranas, “Market-Based Pollution Abatement Strategies: Risk Management Using Emission Option Contracts,”. *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 42, No. 4, 2003, pp. 802~810.

Hahn, R., “Market power and tradable property rights,” *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 99, No. 4, 1983, pp. 753~765.

Li, S., “Dynamic optimal control of pollution abatement investment under emission permits,”

Operations Research Letters, Vol. 44, No. 3, 2016, pp. 348~353.

Misiolek, W. S., and H. W. Elder, "Exclusionary manipulation of markets for pollution rights," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 16, No. 2, 1989, pp. 156~166.

Montgomery, W. D., "Markets in licenses and efficient pollution control programs," *Journal of Economic Theory*, Vol. 5, No. 3, 1972, pp. 395~418.

Mrozek, J. R., and A. G. Keeler, "Pooling of Uncertainty: Enforcing Tradable Permits Regulation when Emissions are Stochastic," *Environmental & Resource Economics*, Vol. 29, No. 4, 2004, pp. 459~481.

Park, H., "Real option analysis for effects of emission permit banking on investment under abatement cost uncertainty," *Economic Modeling*, Vol. 29, No. 4, 2012, pp. 1314~1321.

Rubin, J. D., A "Model of Intertemporal Emission Trading, Banking, and Borrowing," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 31, No. 3, 1996, pp. 269~286.

Schennach, S. M., "The Economics of Pollution Permit Banking in the Context of Title IV of the 1990 Clean Air Act Amendments," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 40, No. 3, 2000, pp. 189~210.

Selten, R., "Spieltheoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfragetragheit," Zeitschrift *für* die gesamte Staatswissenschaft, Vol. 121, 1965, pp. 301~324.

Stavins, R., "Transaction costs and tradable permits," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 29, 1995, pp. 133~148.

Taschini, L., "Environmental Economics and Modeling Marketable Permits: A Survey," *Asian Pacific Financial Markets*, Vol. 17, No. 4, 2010, pp. 325~343.

Zhao, J., "Irreversible abatement investment under cost uncertainties: tradable emission permits and emissions charges," *Journal of Public Economicss*, Vol. 87, No. 12, 2003, pp. 2765~2789.