

탄소배출저감을 위해 수입 화석연료에 부과하는 적정 조세에 관한 연구

이덕만*

요 약

본 연구는 화석연료 수입국이 시장지배력을 갖는 수요독점의 경우에 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 탄소배출량 저감을 위해 수입국이 부과할 적정 조세의 규모 및 구조를 분석하였다. 본 연구는 기존연구들과는 달리 화석연료 생산비용이 화석연료 스톡의 영향을 받는 경우를 고려하여 수입 화석연료 소비로 인해 입게 될 한계피해액에 대한 적정시간경로를 도출하고, 이를 토대로 수입국이 각 시점별로 부과할 적정 조세의 규모를 제시하였다. 본 연구는 화석연료 생산비용이 화석연료 스톡의 영향을 받는 경우에 수입국이 부과할 조세의 규모는 화석연료 소비로 인해 발생하는 한계피해액만큼은 순수 피구세로 부과하고, 수입 화석연료의 소비로 인해 발생하는 사용자 비용만큼은 수입관세로 부과할 것을 제안하고 있다.

주요 단어 : 화석연료, 수요독점, 잠재비용, 피구세
경제학문헌목록 주제분류 : H23, Q53

* 건국대학교 경영경제학부 교수. konkuk56@kku.ac.kr

I. 서 론

석유 등 화석연료를 소비함으로써 발생하는 부정적 외부효과를 최소화하기 위해 부과할 조세의 크기에 대한 연구는 Baumol(1972)을 시작으로 지속적으로 이루어져 오고 있다. 특히, 이들 연구 중 화석연료를 수입하는 국가가 수입 화석연료 소비로 인해 대기에 배출되는 탄소량을 줄이기 위해 어떤 크기의 조세를 부과해야 할 것인가에 대한 연구는 1990년대 중반부터 깊은 관심을 가지고 진행되었다. 지금까지 대기에 탄소를 배출하는 화석연료를 생산하여 수출하는 국가가 얻을 수 있는 경제적 이윤과 수입 화석연료의 소비를 통해 피해를 입는 국가의 경제적 후생을 극대화하기 위해 부과할 가격과 조세¹⁾의 크기를 연구한 기존연구는 Wirl(1994, 1995), Wirl and Dockner(1995), Tahvonen(1995), Rubio and Escriche(2001), Liski and Tahvonen(2004) 등이 있다. 이들 연구는 수출국과 수입국이 각각 시장지배력을 가진 경우를 상정하여 가격과 조세를 전략변수로 하는 마코브완전내쉬균형(Markov Perfect Nash Equilibrium)방법을 사용하여 연구 결과를 도출하였다. Rubio and Escriche(2001)는 수출국이 시장지배력을 가진 경우를, 그리고 Tahvonen(1995), Rubio and Escriche(2001)는 수입국이 시장지배력을 가진 경우를 분석하여 수출국과 수입국이 각각 시장지배력을 가진 경우를 상정하여 분석한 연구결과와 상호 비교를 시도하였다. Liski and Tahvonen(2004)은 화석연료 스톡의 크기가 화석연료 생산비용에 영향을 미치고, 화석연료 수출국과 수입국이 각각 시장지배력을 갖는 경우에 수입국은 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 피해를

1) 수입국이 부과하는 조세의 사례는 탄소세(carbon tax), 에너지세(energy tax), 유황세(sulfur tax) 등이 있다.

줄이기 위해 수출국이 누리는 지대의 일부를 취득할 수 있음을 설명하고 있다. 그러나 Wirl(1995), Liski and Tahvonen(2004)을 제외한 기존연구들은 화석연료 스톡의 크기가 생산비용에 미치는 영향과 화석연료 스톡의 동태적 변화를 고려하지 않은 한계를 지니고 있다²⁾.

본 연구는 Tahvonen(1995), Rubio and Escriche(2001)와는 달리 화석연료 스톡의 크기가 생산비용에 영향을 미치고 화석연료 스톡의 동태적 변화를 고려한 경제모형을 설정하여 화석연료 수입국이 시장지배력을 가지는 경우에 수입 화석연료의 소비과정에 어떤 크기의 조세를 부과해야 할 것인가를 규명하고자 한다.

이를 위해 본 연구는 첫째, 화석연료 수입국이 시장지배력을 가지고 수출국은 경쟁 상태에 있는 Stackelberg differential 게임모형을 설정하고, 둘째, 화석연료 수출국이 자원을 생산하는데 소요되는 비용은 생산량뿐만 아니라 화석연료 스톡 크기의 영향을 받는다는 점을 고려하였으며, 셋째, 본 연구는 기존연구들과는 달리 화석연료 수입 시 관세가 부과되는 현실을 게임모형에 반영하였다. 그리고 본 연구는 연구목적에 위해 첫째, Stackelberg differential 게임의 균형 해를 도출하기 위해 적정제어이론을 사용하고, 둘째, 수입된 화석연료의 소비로 인해 발생하는 한계피해의 잠재비용(the shadow cost of marginal damage)에 대한 적정시간경로를 도출하고, 셋째, 잠재비용의 적정시간경로를 토대로 화석연료 수입국이 부과할 각 시점별 조세의 크기와 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 사용자 비용(user cost)이 수입국이 부과할 조세에 미치는 영향을 분석하였다.

2) Tahvonen(1995)는 화석연료 스톡의 동태적 변화는 고려하고 있으나 화석연료 스톡의 크기가 생산비용에 미치는 영향은 고려하지 않았다.

II. 경제모형

본 연구는 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 탄소배출량 저감을 위해 수입국이 부과할 조세의 크기를 규명하기 위하여 Karp(1984), 이덕만(2002), Lyon and Lee(2004)의 경제모형을 토대로 화석연료 수입국이 시장지배력을 가지고 화석연료 수출국은 경쟁 상태에 있는 Stackelberg differential 게임모형을 설정하였다. 이 게임에서 시장지배력을 가진 수입국이 게임의 선도자 역할을 담당하게 된다. 이 게임모형은 다음과 같은 가정들을 포함하고 있다. 먼저 본 연구는 모형의 단순화를 위하여 화석연료 수출국은 생산된 자원을 전량 수출하고, 수입국은 화석연료 생산 없이 수입된 화석연료만을 소비하는 것으로 가정하였다.

이 게임모형에서 화석연료 수입국이 수입된 y 단위의 화석연료 소비를 통해 얻을 수 있는 효용함수 $u(y)$ 는 오목함수이며 두 번 미분이 가능하다고 가정하자. 그리고 수입국의 화석연료 소비시장이 완전경쟁이라고 가정하면 $u'(y) = p(y)$ 가 될 것이며, 이때 $p(y)$ 는 수입국의 소비자가 y 단위의 화석연료를 소비할 때 지불하는 국내가격을 표시한다. z 는 수입 화석연료 소비로 인해 시점 t 에 대기에 축적된 탄소량을 표시하며, $D(z)$ 는 수입국이 대기에 축적된 탄소량으로 인해 입게 될 피해함수(damage function)를 나타낸다. 이때 피해함수 $D(z)$ 는 $D'(z) > 0$ 의 특성을 가지고 있다. 그리고 화석연료 수입국이 화석연료 단위 당 단위관세(unit tariff)인 $\pi(t)$ 를 부과하면, 화석연료 수출국이 수취하는 가격은 $p(x) - \pi$ 가 된다. 이들 가정으로부터 수입이 종료되는 시점 T 까지 수입된 화석연료 소비로 인해 수입국이 누릴 수 있는 경제적 후생수준은 다음과 같이 표시될 수 있다.

탄소배출저감을 위해 수입 화석연료에 부과하는 적정 조세에 관한 연구

$$W_I = \int_0^T e^{-rt} [u(y) - p(y)y + \pi y - D(z)] dt + e^{-rT} (S(z(T))) \quad (1)$$

여기서 r 는 할인율을 표시하고 $S(\cdot)$ 는 최종가치(terminal value)를 나타내는 함수를 표시한다. 그리고 수출국이 화석연료를 생산하는데 소요되는 평균 비용을 $c(x)$ 로 가정하면 화석연료 y 단위를 생산하는데 소요되는 총비용은 $c(x)y$ 로 표시될 수 있다. 이때 x 는 시점 t 에서 화석연료 매장량의 크기를 나타낸다. 그리고 평균비용을 나타내는 $c(x)$ 는 $c'(x) < 0$, $c''(x) > 0$ 의 특성을 가진다고 가정하자. 이들 가정 하에서 수출국이 생산된 화석연료 수출로 인해 얻을 수 있는 경제적 이윤은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$W_E = \int_0^T e^{-rt} [p(y)y - \pi y - c(x)y] dt \quad (2)$$

이때 수출국은 화석연료 매장량의 동태적 변화의 제약을 받게 된다. 화석연료 매장량의 동태적 변화는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_o \quad (3)$$

Ⅲ. 적정 조세의 규모

이 게임에서 시장지배력을 가진 화석연료 수입국은 선도자(leader)로서 화석연료 수입 시 부과할 적정관세의 크기를 결정하기 위하여 추종자(follower)인 수출국의 반응을 먼저 고려해야 할 것이다. 추종자인 수출국은 화석연료

매장량의 동태적 변화를 제약조건으로 하여 자국의 이윤극대화를 추구하기 위한 화석연료 생산량을 결정하게 될 것이다. 이 경우에 수출국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Max} \int_0^T e^{-\rho t} [p(y)y - \pi y - c(x)y] dt \\ & \text{s.t. } \frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_o \end{aligned}$$

그리고 수출국의 동태적 최적화를 달성하기 위한 헤밀토니언(Hamiltonian)은 다음과 같이 구성된다.

$$H_E = e^{-rt} [p(y)y - \pi y - c(x)y] + \lambda(t)(-y) \quad (4)$$

여기서 $\lambda(t)$ 는 상태변수인 화석연료 매장량 x 에 대응하는 공동상태변수(costate variable)를 의미한다. 이 헤밀토니언으로부터 화석연료 수출국의 동태적 최적화를 위한 현재가치(current value) 필요조건은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p(y) - \pi - c(x) = \nu(t) \quad (5)$$

$$\frac{d\nu}{dt} = r\nu(t) + e^{-rt} c'(x)y \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_o \quad (7)$$

여기서 $\nu(t) = e^{rt}\lambda(t)$ 를 의미한다. 다음으로 화석연료 수입국이 목적함수인 식 (1)을 식 (5), (6), (7)의 제약조건 하에서 자국의 경제적 후생을 극대화

탄소배출저감을 위해 수입 화석연료에 부과하는 적정 조세에 관한 연구

하는 문제를 생각해 보자. 수입국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Max \int_0^T e^{-rt} (u(y) - c(x)y - D(z) - \nu y) dt + e^{-rT} S(z(T)) \quad (8)$$

$$s.t \quad \frac{dz}{dt} = \sigma y \quad (9)$$

$$\frac{d\nu}{dt} = r\nu(t) + e^{-rt} c'(x)y \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_0 \quad (11)$$

여기서 식 (9)는 대기에 누적되는 탄소량의 변화는 화석연료 소비량의 일정 부분에 해당하는 것으로 가정하였다. 그리고 미분방정식 (10)의 일반해는 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\nu(t) = e^{-r(T-t)} \nu(T) - \int_t^T e^{-r(s-t)} c'(x(s)) y(s) ds \quad (12)$$

이 일반해를 식 (8)에 대입하면 목적함수는 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$Max \int_0^T e^{-rt} ([u(y) - c(x)y - D(z)] - [e^{-r(T-t)} \nu(T) - \int_t^T e^{-r(s-t)} c'(x(s)) y(s) ds] y) dt + e^{-rT} S(z(T))$$

그리고 이 식은 $\nu(T) = 0$ 일 때 수입국의 경제적 후생이 극대화 된다는 사실을 알 수 있다. 따라서 $\nu(T) = 0$ 를 대입하면 수입국의 목적함수는 다음과 같이 최종 정리될 수 있다.

$$\text{Max} \int_0^T e^{-rt} [u(y) - c(x)y - D(z) + c'(x)y(x_o - x)] dt + e^{-rT} S(z(T)) \quad (13)$$

따라서 화석연료 수입국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같이 표시할 수 있다³⁾.

$$\begin{aligned} \text{Max} \int_0^T e^{-rt} [u(y) - c(x)y - D(z) + c'(x)y(x_o - x)] dt + e^{-rT} S(z(T)) \\ \text{s.t.} \quad \frac{dz}{dt} = \sigma y \\ z(t) = \sigma(x_o - x(t)) \end{aligned}$$

따라서 수입국의 동태적 최적화를 위한 해밀토니언은 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$H_I = e^{-rt} [u(y) - c(x)y - D(z) + c'(x)y(x_o - x)] + \psi(t)\sigma y$$

여기서 $\psi(t)$ 는 대기에 축적된 탄소량에 대응하는 공동상태변수를 의미한다. 그리고 $z(t) = x(0) - x(t)$ 의 제약조건을 가진 해밀토니언으로부터 수입국

3) 식 (9)와 식 (11)은 $\frac{dz}{dt} = -\sigma \frac{dx}{dt}$ 이므로 $z(t) = \sigma(x(0) - x(t))$, $x(0) = x_o$ 의 관계를 나타낸다.

탄소배출저감을 위해 수입 화석연료에 부과하는 적정 조세에 관한 연구

의 경제적 후생을 극대화하기 위한 현재가치(current value) 필요조건은 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$p(y) - c(x) + c'(x)(x_o - x) = -\sigma \xi(t) \quad (14)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = r\xi(t) + [D'(z) - \frac{1}{\sigma}(2c'(x) - c''(x)(x_o - x))y] \quad (15)$$

$$\frac{dz}{dt} = \sigma y$$

이 때 $\xi(t) = e^{rt}\psi(t)$ 를 표시한다. 그리고 대기에 축적된 탄소량의 최종가치를 나타내는 $S(z(T))$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S(z(T)) = \int_T^\infty e^{-r(s-T)} D(z(T)) ds = -D(z(T))/r$$

따라서 수입국의 동태적 최적화를 위한 현재가치 횡단선 조건(transversality condition)은 $\xi(T) = S'(z(T))$ 이므로 $\xi(T)$ 는 $\xi(T) = -D'(z(T))/r$ 에 해당한다는 사실을 알 수 있다. 수입국의 동태적 최적화를 위한 필요조건들 중 공동상태변수 $\xi(t)$ 의 동태적 변화를 나타내는 미분방정식 (15)의 일반해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \xi(t) &= e^{-r(T-t)}\xi(T) - \int_t^T e^{-r(s-t)} D'(z(s)) ds \\ &\quad + \frac{1}{\sigma} \int_t^T e^{-r(s-t)} [(2c'(x(s)) - c''(x(s))(x_o - x(s)))y(s)] ds \end{aligned} \quad (16)$$

이 식은 상태변수인 대기에 축적된 탄소량에 대응하는 공동상태변수의 최적시간경로(optimal time path)를 의미한다. 그리고 $\xi(t)$ 는 시점 t 에 대기에 누적된 탄소량이 한 단위 변화할 때 수입국이 화석연료 소비로 인해 얻을 수 있는 경제적 후생수준의 변화 즉, $\partial W_I^*(t)/\partial z(t) = \xi(t)$ 를 나타낸다⁴⁾. 따라서 $\xi(t)$ 는 시점 t 에 대기에 축적된 탄소량의 한 단위 변화에 따라 발생하는 한계피해에 대한 잠재비용을 의미한다.

이러한 사실을 토대로 수입국이 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 피해를 줄이기 위해 부과할 적정 조세의 크기를 살펴보자. 수입국의 동태적 최적화를 위한 필요조건들 중 식 (14)는 한계제정방정식으로서 식 (14)의 좌변은 수입 화석연료 소비로 인해 수입국이 얻을 수 있는 한계편익을 보여주고, 식 (14)의 우변은 수입 화석연료 소비로 인한 탄소 배출량의 잠재비용, 즉 한계비용을 나타낸다. 따라서 단위 당 화석연료를 소비할 때 $-\sigma\xi(t)$ 만큼을 조세로 부과하면 화석연료 소비가 감소하게 될 것이고, 그 결과 대기에 축적되는 탄소 배출량이 줄어들게 될 것이다. 이 결과로부터 수입국이 화석연료 소비로 인해 발생하는 탄소 배출량을 줄이기 위해 부과해야 하는 조세의 크기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sigma e^{-r(T-t)}(D'(z(T))/r) + \sigma \int_t^T e^{-r(s-t)} D'(z(s)) ds \\ & - \int_t^T e^{-r(s-t)} [(2c'(x(s)) - c''(x(s))(x_o - x(s)))y(s)] ds \end{aligned} \quad (17)$$

이 결과로부터 수입국이 부과할 조세의 크기는 두 가지 항목으로 구분될 수 있음을 알 수 있다. 식 (17)의 첫 번째 항과 두 번째 항의 합은 수입 화석

4) $\partial W_I^*(t)/\partial z(t) = \xi(t)$ 가 성립한다는 사실에 대한 엄밀한 증명은 이덕만(2002, p.201~204)를 참조할 것.

연료 소비로 인해 발생하는 피해를 내부화하기 위해 수입국이 부과할 순수 피구세(pure Pigouvan tax)⁵⁾에 해당하고 마지막 항은 화석연료 소비로 인한 피해가 발생하지 않을 경우($D(z(t)) = 0$)에 수입국 측면에서의 화석연료 스톡의 잠재가치, 즉 사용자 비용에 해당함을 알 수 있다⁶⁾. 따라서 수입국은 수출국이 화석연료 수출을 통해 누리는 지대(rent) 중에서 식 (17)의 마지막 항에 해당하는 크기를 수입관세(import tariff)로 부과하여 취할 수 있다. 이 결과는 화석연료 수출국과 수입국이 각각 시장지배력을 가지는 경우를 상정하여 수입국이 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 탄소배출량 저감을 위해 부과할 조세의 구조와 크기를 마코브완전내쉬균형(Markov Perfect Nash Equilibrium) 방법을 사용하여 도출한 Liski and Tahvonen(2004)의 연구 결과와 동일함을 알 수 있다. 본 연구는 Liski and Tahvonen(2004)과 달리 화석연료가 피해를 유발하지 않을 경우에 식 (17)의 마지막 항은 수입국 측면에서의 화석연료 스톡의 잠재가치(shadow value)에 해당한다는 사실을 밝히고 있다(부록 참조)⁷⁾.

그리고 식 (17)을 통해 알 수 있는 또 다른 사실은 수출국이 화석연료를 생산하는데 소요되는 비용이 화석연료 스톡 크기의 영향을 받지 않는 경우 즉, $c'(x) = 0$ 일 때 수입된 화석연료 소비로 인한 사용자 비용이 발생하지 않으므로 수입국이 수입 화석연료 소비 과정에 발생하는 피해를 줄이기 위해 부과할 조세의 크기는 단지 식 (17)의 첫 번째 항과 두 번째 항을 합한 순수 피구세에 해당한다는 사실을 알 수 있다.

5) Rubio and Escriche(2001)와 Liski and Tahvonen(2004)는 중립적 피구세(neutral Pigouvian tax)로 명명하고 있다. 중립적 피구세에 대한 자세한 설명은 Rubio and Escriche(2001)의 p. 301~302와 Liski and Tahvonen(2004)의 p. 4를 각각 참고할 것.

6) 사용자 비용의 개념에 관한 설명은 Krautkraemer(1998)의 p. 2066을 참조할 것.

7) Liski and Tahvonen(2004)은 “화석연료 소비로 인해 공해가 발생하지 않을 경우 제시된 피구세의 두 번째 항은 수입국 화석연료 스톡의 잠재가치에 해당한다(p. 4)”고 기술하고 있으나, 그 이유를 명확히 밝히지 못하고 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 화석연료 수입국이 시장지배력을 가지고 수출국이 경쟁 상태인 경우를 상정하여 수입 화석연료의 소비로 인해 대기에 배출되는 탄소량을 줄이기 위해 수입국이 부과할 조세의 크기 및 구조에 대한 분석을 시도하였다. 본 연구는 동일한 시장조직을 상정하여 수입 화석연료 소비에 부과할 조세의 크기를 분석한 기존연구들과는 달리 다음과 같은 특징을 내포하고 있다. 본 연구는 첫째, 수출국의 화석연료 생산에 소요되는 비용은 화석연료 스톡 크기의 영향을 받고, 둘째, 화석연료 스톡의 동태적 변화를 고려하고, 셋째, 수입국이 화석연료 수입 시 관세를 부과하는 현실을 고려하여 비재생자원 수입관세의 부과형태를 연구한 Karp(1984)의 모형을 토대로 연구 목적에 적합한 경제모형을 설정하였다. 그리고 본 연구는 화석연료 수입국이 선도자가 되는 Stackelberg differential 게임의 균형 해를 도출하기 위해 적정제어이론을 사용하고, 화석연료 수출국이 생산된 화석연료를 자국의 소비에 사용하지 않고 전량 수출하는 것으로 가정하였다.

본 연구는 경제모형의 분석을 통해 수입 화석연료 소비로 인해 수입국이 입게 될 한계피해의 잠재비용에 대한 적정시간경로를 도출하고, 이를 토대로 수입국이 각 시점별로 부과할 조세의 크기 및 구조를 제시하고 있다. 본 연구의 결과에 따르면 화석연료 생산비용이 화석연료 스톡 크기의 영향을 받는 경우에 수입국이 부과할 조세는 두 가지로 구분하여 부과될 수 있다. 수입국은 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 한계피해액만큼은 순수 피구세로 부과하고, 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 사용자 비용만큼은 수입관세로 부과할 것을 제안하고 있다. 아울러 본 연구는 화석연료 생산비용이 화석연료 스톡 크기의 영향을 받지 않는 경우에는 화석연료 소비로 인한 사용자 비용

탄소배출저감을 위해 수입 화석연료에 부과하는 적정 조세에 관한 연구

이 발생하지 않으므로 수입국이 부과할 조세의 크기는 수입 화석연료 소비로 인해 발생하는 한계피해액만큼을 순수 피구세로 부과해야 한다는 사실을 보이고 있다.

마지막으로 본 연구의 결과는 첫째, 수출국이 생산된 화석연료의 일부를 국내 소비에 이용하고 나머지를 수출하는 경우와 둘째, 수입국이 자국에서 생산된 화석연료를 소비하고 자국의 소비에 부족한 양을 수입하여 소비하는 경우에 화석연료 소비로 인해 발생하는 탄소 배출량을 줄이기 위해 수입국이 부과할 조세의 크기를 각각 규명하기 위해 더욱 확장될 수 있을 것이다.

접수일(2013년 3월 11일), 게재확정일(2013년 3월 21일)

〈 부 록 〉

$D(z(t)) = 0$ 일 때 수입국 측면에서의 화석연료 스톡의 잠재가치:

식 (8), (9), (10), (11)로부터 $D(z(t)) = 0$ 일 경우 수입국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같이 변경될 수 있다.

$$Max \int_0^T e^{-rt} (u(y) - c(x)y - \nu y) dt \quad (A-1)$$

$$s.t \quad \frac{d\nu}{dt} = r\nu(t) + e^{-rt} c'(x)y \quad (A-2)$$

$$\frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_0$$

그리고 미분방정식 (A-2)의 일반해를 나타내는 식 (12)를 (A-1)에 대입하여 정리하면 수입국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Max \int_0^T e^{-rt} (u(y) - c(x)y + c'(x)y(x_0 - x)) dt$$

$$s.t \quad \frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_0$$

따라서 수입국의 동태적 최적화를 위한 해밀토니언은 다음과 같이 구성할 수 있다.

탄소배출저감을 위해 수입 화석연료에 부과하는 적정 조세에 관한 연구

$$H_I = e^{-rt} [u(y) - c(x)y + c'(x)y(x_o - x)] + \phi(t)(-y)$$

이 해밀토니언으로부터 수입국의 동태적 최적화를 위한 현재가치(current value) 필요조건은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p(y) - c(x) + c'(x)(x_o - x) = \omega(t) \quad (A-3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = r\omega(t) + e^{-rt} [2c'(x) - c''(x)(x_o - x)]y \quad (A-4)$$

$$\frac{dx}{dt} = -y, \quad x(0) = x_o$$

이때 $\omega(t) = e^{rt}\phi(t)$ 를 나타낸다. 그리고 현재가치 횡단선 조건은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega(T) \geq 0, \quad \omega(T)x(T) = 0 \quad (A-5)$$

$$u(y(T)) - c(x(T))y(T) + c'(x(T))y(T)(x_o - x(T)) - \omega(T)y(T) = 0 \quad (A-6)$$

수입국의 동태적 최적화를 위한 필요조건들 중 공동상태변수 $\omega(t)$ 의 동태적 변화를 나타내는 미분방정식 (A-4)의 일반해는 다음과 같다.

$$\omega(t) = e^{-r(T-t)}\omega(T) - \int_t^T e^{-r(s-t)} [(2c'(x(s)) - c''(x(s))(x_o - x(s)))y(s)] ds$$

이 때 $\partial W_I^* / \partial x(t) = \omega(t)$ ⁸⁾에 해당하므로 $\omega(t)$ 는 수입국 측면에서의 화석연

8) $\partial W_I^* / \partial x(t) = \omega(t)$ 에 대한 설명은 Lyon(1999)를 참조할 것.

료 스톡의 잠재가치(shadow value)에 해당함을 알 수 있다. 그리고 $c'(x) < 0$ 조건 하에서 수입된 화석연료 소비가 증가함에 따라 수입국이 부담해야 할 비용이 화석연료 소비로 인해 얻을 수 있는 가치보다 크게 될 수 있다. 따라서 수입된 화석연료 소비로 인해 얻을 수 있는 한계효용과 부담해야 할 한계 비용이 일치하는 시점에서 소비가 중단될 것이다. 즉, (A-3), (A-5), (A-6)로부터 소비가 중단되는 시점은 $p(0) = c(x^\dagger) - c'(x^\dagger)(x_o - x^\dagger)$, $0 < x^\dagger < x_o$ 의 조건을 충족시키는 시점이 될 것이며, 이 조건으로부터 $x^\dagger = x(T) > 0$, $\omega(T) = 0$ 된다는 사실을 알 수 있다. 따라서 $\omega(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\omega(t) = - \int_t^T e^{-r(s-t)} (2c'(x(s)) - c''(x(s))(x_o - x(s))) y(s) ds$$

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 이덕만. 2002, 「공해감소를 위한 환경세의 동태적 구조에 관한 연구」, 자원·환경경제 연구, 11(2), pp195~210
- Baumol, W. J. 1972, "On Taxation and the Control of Externalities", *American Economic Review*, 62(3), pp307~322.
- Karp, L. 1984, "Optimal and Consistency in a Differential Game with Non-Renewable Resources", *Journal of Economic Dynamics and Control*, 8, pp73~97.
- Krautkraemer, J. A. 1998, "Nonrenewable Resource Scarcity", *Journal of Economic Literature*, XXXVI, pp2065~2107.
- Liski, M. and Tahvonen, O. 2004, "Can Carbon Tax Eat OPEC's Rents?", *Journal of Environmental Economics and Management*, 47, pp1~12.
- Lyon, K. S. 1999, "The Costate Variable in Natural Resource Optimal Control Problems", *Natural Resource Modeling*, 12(4), pp413~426.
- Lyon, K. S. and Lee, D. M. 2004, "Nonrenewable Extractions with a Pollution Side Effect: A Comparative Dynamic Analysis", *Natural Resource Modeling*, 17(4), pp377~392.
- Rubio, S. J. and Escriche, L. 2001, "Strategic Pigouvian Taxation, Stock Externalities and Polluting Non-Renewable Resources", *Journal of Public Economics*, 79, pp297~313.
- Tahvonen, O. 1995, "International CO₂ Taxation and the Dynamics of Fossil Fuel Markets", *International Tax and Public Finance*, 2, pp261~278.
- Wirl, F. 1994, "Pigouvian Taxation of Energy for Flow and Stock Externalities and Strategic, Noncompetitive Energy Pricing", *Journal of Environmental Economics and Management*, 26, pp1~18.
- Wirl, F. 1995, "The Exploitation of Fossil Fuels under the Threat of Global Warming

and Carbon Taxes: A Dynamic Game Approach”, *Environmental and Resource Economics*, 5, pp333~352.

Wirl, F. and Dockner, E. 1995, “Leviathan Governments and Carbon Taxes: Costs and Potential Benefits”, *European Economic Review*, 39, pp1215~1236.

ABSTRACT

Optimal Taxation for Reducing Carbon Emitted
from the Consumption of Fossil Fuel Imported

Dug Man Lee*

This research is designed to analyze the optimal taxation for reducing carbon emitted from the consumption of fossil fuel imported by adopting a monopsonic modeling approach in which the importing country has a market power. We derived the optimal time path of the shadow cost of marginal damages incurred by fossil fuel consumption. On the basis of this result, we identified that if the production cost of fossil fuels is affected by the stock of it, the optimal taxation at each time is decomposed into two parts: One is that a pure Pigouvian tax should be levied which is the same as the shadow cost of marginal damages incurred by fossil fuels consumption and the other is that a tariff on fossil fuels imported should be imposed which is the same as the shadow value of the stock of it for importing country when the damage is absent. Otherwise, a pure Pigouvian tax is only levied to reduce the carbon emitted from the consumption of fossil fuels imported.

Key Words : Fossil fuel, Monopsonic modeling, Shadow cost, Pigouvian tax
JEL Codes : H23, Q53

* Professor, School of Business Administration and Economics, Konkuk University. Konkuk56@kku.ac.kr