

## 석유 탐사 및 개발이 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 미치는 영향: OPEC의 경우

이덕만\*

**요약**: 본 연구는 시장지배력을 가진 OPEC이 탐사 및 개발을 통해 석유 매장량을 증대시키는 경우에 석유 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 대한 분석을 시도하였다. 이를 위해 본 연구는 Stackelberg differential 게임모형을 설정하고, 둘째, 석유 수출국의 채굴비용이 석유 매장량의 영향을 받는 경우와 받지 않는 경우를 분리하여 분석하였으며, 셋째, 석유 수출국이 생산된 석유의 일정량을 국내 소비에 사용하는 경우와 전량 수출하는 경우를 각각 상정하여 분석하였다. 본 연구의 분석 결과에 의하면 석유 수출국의 채굴비용이 석유 매장량의 영향을 받는 경우에 석유 수입국은 수입된 석유의 소비로 인한 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해 동태적으로 비일관적(dynamically inconsistent)인 관세를 부과하고, 석유 매장량의 영향을 받지 않는 경우에는 동태적으로 일관성(dynamically consistent)있는 관세를 부과할 것을 제안하고 있다. 아울러 본 연구는 석유 수출국이 생산된 석유의 일정량을 자국의 소비에 사용하는지의 여부는 본 연구가 제안하는 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 영향을 미치지 않는다는 사실을 보이고 있다.

**주제어**: 탐사 및 개발, 석유 수입관세, 동태적 비일관성, 석유 매장량

**JEL 분류**: Q4, F13

접수일(2016년 4월 18일), 수정일(2016년 6월 7일), 게재확정일(2016년 6월 8일)

<sup>†</sup>이 논문은 2013년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

\* 건국대학교 경영경제학부, 교수(e-mail: [konkuk56@kku.ac.kr](mailto:konkuk56@kku.ac.kr))

# The Impact of Oil Exploration and Development on the Dynamic Structure of Tariff Imposed by Oil Importing Country: The Case of OPEC

Dug Man Lee\*

**ABSTRACT:** This paper is designed to investigate the dynamic structure of optimal tariff imposed by the oil importing country from OPEC when OPEC increases the oil reserves through exploration and development. For this purpose, we used a Stackelberg differential game modeling approach, and tried to analyze two cases such that the one is the extraction cost is dependent on the oil reserves and the other is the extraction cost is independent of it. On the basis of this analysis, we propose that the importing country has to impose dynamically inconsistent tariffs if the extraction cost is dependent on the oil reserves. Otherwise, she should impose dynamically consistent tariffs announced at initial time. In addition, we found that whether or not the exporting country uses some portion of oil produced for domestic consumption does not affect our policy proposition stated above.

**Keywords :** Exploration and Development, Oil Importing Tariff, Dynamically Inconsistent, Oil Reserves

---

Received: April 18, 2016, Revised: June 7, 2016, Accepted: June 8, 2016.

\* Professor, School of Business Administration and Economics, Konkuk University(e-mail: konkuk56@kku.ac.kr)

## I. 서론

지금까지 석유 수입관세의 부과구조를 분석한 대부분의 선행연구들은 석유는 매장량이 고정되어 있는 고갈자원(exhaustible resources)의 특성을 가진다는 가정 하에서 석유 수입국이 부과할 수입관세의 동태적 부과구조를 분석하였다<sup>1)</sup>. 그러나 현실적으로 석유 에너지의 소비 증가로 인해 매장량이 감소하게 되면 채굴비용이 상승하게 되고, 그 결과 석유 생산기업들은 석유 생산으로 인한 이윤극대화를 달성하기 위해 탐사 및 개발을 통해 석유 매장량을 지속적으로 늘여나가는 유인을 가지게 된다.

실례로 Adelman (1993)의 조사에 의하면 미국의 석유 매장량이 1930년에 약 130억 배럴에 해당하였으나 탐사 및 개발로 인해 1990년에는 약 200억 배럴로 석유 매장량이 증가하였고, Xu and Bell (2014)의 연구에 의하면 2006년 1월에 1조 2,933억 배럴이던 전 세계 석유 매장량이 2015년 1월에는 1조 6,559억 배럴로 지난 9년 동안 탐사 및 개발로 인해 전 세계 석유 매장량은 약 3,626억 배럴이 증가하였으며 그 중 OPEC 회원국의 석유 매장량 증가 규모는 3,045억 배럴로 전 세계 매장량 증가의 약 84%에 해당하고 비 회원국의 매장량 증가 규모는 581억 배럴로 전 세계 매장량 증가의 약 16%에 해당한다 (<표 1> 참조). 그리고 이 기간 동안에 탐사 및 개발을 통해 증가한 석유 매장량 중에서 OPEC 회원국의 증가량 약 70%와 비회원국의 증가량 약 80%가 2010년부터 2014년 사이에 집중적으로 증가하였음을 알 수 있다.

그러나 산유국들의 탐사 및 개발을 통한 석유 매장량의 증대가 생산량, 가격, 탐사 및 개발 수준, 희소지대(scarcity rent), 수입관세 등 경제변수에 미치는 영향에 대한 연구는 Peterson (1978)을 시작으로 지금까지 Pyndick (1978;1980), Dasgupta and Heal (1979), Arrow and Chang (1982), Swierzbinsky and Mendelsohn (1989), 이덕만(2011) 등이 있다. 이들 연구 중 Peterson (1978), Pyndick (1978), 이덕만(2011)은 탐사 및 개발의 결과 석유 매장량의 증가가 확실한(certain) 경우를 분석하기 위해 deterministic 모형을 수립하여 석유 매장량의 증가가 경제변수들에 미치는 영향을 분석하였다. Peterson (1978)은

---

1) 석유가 고갈자원의 특성을 가진다는 가정 하에서 석유 수입관세의 부과구조를 분석한 선행연구들은 Kemp and Long (1980), Newbery (1981), Karp (1984), Eckstein and Eichenbaum (1985), Maskin and Newbery (1990), Karp and Newbery (1991; 1992) 등이 있다.

석유 생산기업이 참여하는 시장 형태에 따른 탐사 및 개발 규모와 생산량의 동태적 행태를 분석하였다. Peterson에 따르면 석유 생산기업이 독점인 경우에 생산기업은 석유 자원을 과도하게 보존(overconserved)하는 경향이 있고, 경쟁시장에 참여하는 경우에는 탐사 및 개발 규모와 생산량이 적정 수준을 초과하게 된다고 설명하고 있다. 그 결과 생산기업이 경쟁상태인 경우에 석유 매장량은 시간흐름에 따라 점차 감소하고 장기적으로 석유 매장량의 현재가치 할인율이 높아지게 됨에 따라 석유 생산량도 감소하게 된다고 설명하고 있다.

Pyndick (1978)은 석유 탐사 및 개발이 이루어 질 경우에 석유 생산 기업은 기업이 참여하는 시장형태에 관계없이 석유 가격의 시간경로는 U-형태를 띠게 되고, 반대로 석유 생산량은 탐사 및 개발이 활발히 진행되는 초기에는 증가하고 후기에는 탐사 및 개발 규모와 생산량이 동시에 줄어들게 된다고 설명하고 있다.

〈표 1〉 세계 석유 매장량 규모(2006~2015) (단위: 억 배럴)

Year (Jan.)	World	OPEC	Non-OPEC
2015	16,559	12,062	4,497
2014	16,474	12,008	4,466
2013	16,405	11,997	4,408
2012	15,201	11,129	4,072
2011	14,696	10,648	4,048
2010	13,542	9,513	4,029
2009	13,422	9,440	3,982
2008	13,317	9,275	4,042
2007	13,174	9,023	4,151
2006	12,933	9,017	3,916

출처: Xu, C and L, Bell (2014), p. 30

반면에 탐사 및 개발로 인한 석유 매장량의 증가가 불확실한(uncertain) 경우를 분석하기 위해 stochastic 모형을 수립하여 석유 탐사 및 개발로 인한 매장량의 변화가 경제변수들에 미치는 영향을 분석한 연구는 Dasgupta and Heal (1979), Pyndick (1980), Arrow and Chang (1982), Swierzbinsky and Mendelsohn (1989) 등이 있다. Dasgupta and Heal

(1979)은 석유를 내포하는 지층의 탐사 및 개발 결과가 Poisson 분포를 이루고 있다는 가정 하에 석유 탐사 및 개발이 이루어질 경우 석유 가격은 비연속적인 톱니(saw-tooth) 형태를 띠게 된다고 설명하고 있다.

Pyndick (1980)은 Dasgupta and Heal과는 달리 석유 매장량의 변화가 연속 확률분포를 띠고 있다는 가정 하에 석유 수요의 불확실성은 석유 기대가격(expected oil price)에 동태적으로 영향을 미치지 않지만, 석유 매장량 변화의 불확실성은 석유 생산비용이 석유 매장량의 영향을 받는 비선형함수일 경우에 석유 기대가격에 영향을 미치게 된다고 설명하고 있다. 그리고 Pyndick의 분석에 따르면 채굴 비용함수의 형태에 관계없이 석유 수요와 매장량 변화의 불확실성은 석유 생산량에 영향을 미치게 됨을 밝히고 있다.

Arrow and Chang (1982)은 석유를 내포한 지층의 탐사 및 개발 결과가 Poisson 분포를 이루고 있다는 가정 하에서 탐사 및 개발이 이루어지지 않는 석유 매장량의 잠재가격(shadow price)은 랜덤한 사이클(randomly cycled)의 형태를 유지하며 점차 증가하게 되므로 생산된 석유의 희소가치는 시장이자율만큼 지속적으로 증가하지는 않는다고 설명하고 있다.

Swierzbinsky and Mendelsohn (1989)은 석유를 내포한 지층의 탐사 및 개발 결과가 확률분포의 특성을 가지게 된다는 가정 하에 누적된 생산량뿐만 아니라 탐사 및 개발로 인해 누적된 매장량이 생산비에 동시에 영향을 미치는 비용함수를 상정(specification)하여 시간흐름에 따라 예상 석유가격은 증가하게 됨을 설명하고 있다.

특히, 이들 선행연구 중 이덕만(2011)은 탐사 및 개발로 인해 늘어나는 석유 매장량의 변화를 기존의 석유 수입관세 분석 모형에 포함한 새로운 경제모형을 개발하여 석유 수입국이 부과할 관세의 동태적 부과구조를 분석하였다. 이덕만은 석유 채굴비용이 매장량의 영향을 받는 것을 가정한 Karp (1984)의 모형과 탐사를 통해 석유 매장량이 확실히 증가하는 것을 가정한 Pyndick (1978)의 모형을 결합한 게임모형을 개발하여, 석유 수출국은 완전경쟁 상태에 있고 석유 수입국이 시장지배력을 갖는 경우에 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조를 분석하였다.

앞서 제시된 <표 1> 따르면 2015년 1월 현재 전 세계 석유 매장량은 1조 6,559억 배럴에 해당하며, 이 중 석유 수출국 카르텔인 OPEC 회원국의 매장량은 1조 2,062억 배럴로 전 세계 석유 매장량의 약 73%에 해당하고 비OPEC 회원국의 석유 매장량은 4,497억 배

럴로 약 27%에 해당한다. 그리고 앞서 기술한 바와 같이 2006년 1월부터 2015년 1월까지 지난 9년 동안 OPEC의 석유 매장량 증가가 전 세계 석유 매장량 증가의 약 84%에 해당함을 감안할 때, 탐사 및 개발로 인해 석유 매장량이 늘어나는 경우 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 대한 분석은 석유 수출국이 완전경쟁인 경우보다 석유 수출국이 시장지배력을 가지는 경우를 상정하여 분석할 필요성이 더욱 제기된다.<sup>2)</sup> 그리고 이 연구 결과는 시장지배력을 갖는 석유 수출국 카르텔인 OPEC 회원국으로부터 석유를 수입하는 국가가 실효성 있는 관세정책을 수립하는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구는 이덕만(2011)이 수립한 경제모형을 확장하여 석유 수출국과 석유 수입국이 각각 시장지배력을 가지는 경우에 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 대한 분석을 시도하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 첫째, 석유 수입국이 선도자가 되는 Stackelberg differential 게임모형을 설정하고, 둘째, 석유 수출국의 채굴비용이 석유 매장량에 영향을 받는 경우와 영향을 받지 않는 경우로 구분하여 분석하고, 셋째, 석유 수출국이 생산된 석유의 일부를 국내 소비에 사용하고 나머지를 해외에 수출하는 경우에 대한 분석을 시도하였다. 아울러 본 연구는 differential 게임모형의 동태적 최적화를 위한 방법론으로 적정제어이론(optimal control theory)을 채택하였다.

## II. 게임모형

본 연구는 석유 수출국이 시장지배력을 가지는 경우에 탐사 및 개발로 인한 석유 수출국의 매장량 변화가 수입국이 부과하는 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 미치는 영향을 분석하기 위해 Pyndick (1978), Karp (1984), Batabyal (2006), 이덕만(2011)의 경제모형을 토대로 석유 수입국이 선도자가 되는 Stackelberg differential 게임모형을 설정하였다.<sup>3)</sup> 본 연구는 석유 수입관세의 동태적 부과구조를 분석한 기존연구들과는 달리 석유 수출국은 생산된 석유를 전량 수출하지 않고 생산된 석유의 일정량을 국내에서 소비하고 나머지를 해외에 수출한다고 가정하자. 이 경우에 시점  $t$ 에서의 석유 수출국

2) 2014년 기준으로 OPEC 회원국이 전 세계의 석유 수출규모에서 차지하는 비중은 56.5%에 해당한다(OPEC, 2015; p. 52).

3) 이 게임에서 석유 수입국이 선도자가 되어야 하는 이유는 Karp (1984)의 p.74를 참조할 것.

의 석유 생산량을  $x(t)$ 라고 하고 국내 소비에 사용되는 석유 소비량을  $\alpha x(t)$ 라 표시하면 해외에 수출하는 석유 수출량은  $(1-\alpha)x(t)$ 가 될 것이다. 여기서  $\alpha$ 는  $0 < \alpha < 1$ 에 해당한다. 시점  $t$ 에서의 석유 수출국의 석유 생산량을  $x(t)$ 라고 하면  $p((1-\alpha)x(t))$ 는 역수요 함수로서 수입국의 국내 석유가격을 의미한다고 하자. 이때 시점  $t$ 에서 석유 수입국이 부과하는 단위 관세의 크기를  $q(t)$ 라고 하면 석유 수입국이 수출국에 지불하는 가격은  $p((1-\alpha)x(t)) - q(t)$ 가 될 것이다.

이들 가정으로부터 수입국이 석유 수입을 통해 누릴 수 있는 경제적 잉여의 크기는  $U((1-\alpha)x(t)) - (p((1-\alpha)x(t)) - q(t))(1-\alpha)x(t)$ 의 할인된 현재가치의 합으로 표시할 수 있다. 즉, 석유 수입이 종료되는 시점을  $T$ 라고 하면 석유 수입국이 수입된 석유의 소비로 인한 경제적 잉여는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$J = \int_0^T e^{-rt} [U((1-\alpha)x(t)) - (p((1-\alpha)x(t)) - q(t))(1-\alpha)x(t)] dt \quad (1)$$

이때  $U((1-\alpha)x(t))$ 는 시점  $t$ 에서 석유 수입국이 수입된 석유의 소비로 인해 누릴 수 있는 총 효용의 크기를 표시하고 효용함수  $U(\cdot)$ 는  $U'(\cdot) > 0$ ,  $U''(\cdot) < 0$ 의 특성을 가진다. 그리고  $r$ 은 할인율을 표시한다.

다음으로 석유 수출국이 생산된 석유의 일부를 국내 소비에 이용하고 나머지를 해외에 수출함으로써 누리게 되는 경제적 잉여의 크기를 살펴보자. 탐사 및 개발로 인해 석유 매장량이 변화하는 경우에 석유 수출국이 석유 생산을 위해 지불하는 비용은 두 가지 종류의 비용을 수반하게 된다. 첫째는 매장된 석유를 채굴하는데 소요되는 채굴비용이고, 둘째는 석유 매장량을 늘이기 위해 탐사 및 개발(exploration and development)에 소요되는 비용이 될 것이다. 본 연구는 매장된 석유를 채굴하는데 소요되는 비용을  $C(\cdot)$ 라 하자. 석유 채굴비용이 석유 매장량의 영향을 받는 경우 평균채굴비용을  $C(z(t))$ 로 표시하면  $x(t)$  단위의 석유를 채굴하는데 소요되는 총 채굴비용은  $C(z(t))x(t)$ 로 표시될 수 있다. 이때  $z(t)$ 는 각 시점별 석유 매장량을 나타낸다. 그리고 석유 채굴비용이 석유 매장량의 영향을 받지 않는 경우에는 총 석유 채굴비용을  $C(x(t))$ 로 표시할 수 있다. 석유 탐사 및 개발에 소요되는 비용은  $c(e(t))$ 로 표시하자. 여기서  $e(t)$ 는 시점  $t$ 에서 석유

탐사 및 개발을 위해 투입되는 노력(effort) 즉, 투자규모를 의미한다. 그리고 각 비용함수는  $C'(z(t)) < 0$ ,  $C'(x(t)) > 0$ ,  $c'(e(t)) > 0$ 의 특성을 가진다고 가정하자. 이러한 가정들 하에서 석유 수출국이 누리는 경제적 잉여의 크기는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$J^E = \int_0^T e^{-rt} [V(\alpha x(t)) + (p((1-\alpha)x(t)) - q(t))(1-\alpha)x(t) - C(\cdot) - c(e(t))] dt - C(\cdot) - c(e(t))] dt \quad (2)$$

여기서  $V(\alpha x(t))$ 는 시점  $t$ 에서 석유 수출국이 생산된 석유의 일부를 자국의 소비에 사용함으로써 누리는 총 효용의 크기를 표시하고, 수출국의 효용함수는  $V'(\cdot) > 0$ ,  $V''(\cdot) < 0$ 의 특성을 지니게 된다.

이 게임에서 선도자 역할을 담당하는 석유 수입국은 석유 수입 시 부과하는 관세를 조절하여 자국의 경제적 잉여를 극대화하고, 추종자인 석유 수출국은 석유 수입국이 부과하는 관세 하에서 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 석유 생산량과 탐사 및 개발을 위한 노력의 크기를 결정하게 된다. 그리고 이 게임에서 석유 수출국은 다음과 같은 석유 매장량( $z(t)$ )의 동태적 제약을 받게 된다.

$$\frac{dz(t)}{dt} = \frac{ds(t)}{dt} - x(t), \quad z(0) = z^o \quad (3)$$

여기서  $s(t)$ 는 탐사 및 개발로 인해 누적적으로(cumulatively) 증가한 석유 매장량을 의미한다. 그리고 탐사 및 개발로 인해 누적적으로 증가되는 석유 매장량의 동태적 변화는 탐사 및 개발을 위한 노력( $e(t)$ )과 탐사 및 개발로 인해 누적적으로 증가한 석유 매장량( $s(t)$ )의 영향을 각각 받는다. 따라서 탐사 및 개발로 인해 누적적으로 증가한 석유 매장량의 순간변화율은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{ds(t)}{dt} = f(e(t), s(t)) \quad (4)$$



이때  $f_e > 0$ ,  $f_s < 0$ 의 특징을 가진다. 그리고 이 Stackelberg differential 게임의 균형을 찾기 위해 이 게임의 선도자인 석유 수입국은 추종자인 석유 수출국의 반응을 우선 고려해야 할 것이다.

### III. 채굴비용과 수입관세 부과구조

#### 1. 채굴비용이 매장량의 영향을 받는 경우

본 절에서는 상기에 기술한 게임모형을 토대로 석유 채굴비용이 매장량의 영향을 받는 경우에 석유 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 대한 분석을 시도하고자 한다. 먼저 추종자인 석유 수출국은 Stackelberg differential 게임의 균형을 도출하기 위해 선도자인 석유 수입국이 조절하는 주어진 관세 하에서 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 석유 생산량과 탐사 및 개발을 위한 노력의 크기를 결정하게 될 것이다. 이때 석유 수출국이 누리는 경제적 잉여의 극대화 문제는 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>4)</sup>.

$$Max \int_0^T e^{-rt} [V(\alpha x) + (p((1-\alpha)x) - q)(1-\alpha)x - C(z)x - c(e)] dt \quad (5)$$

$$s.t \quad \frac{dz}{dt} = \frac{ds}{dt} - x \quad z(0) = z^o$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

$$x > 0, e > 0, z > 0, s > 0$$

그리고 본 연구는 석유 수출국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해 적정제어이론을 동태적 최적화를 위한 방법론으로 채택하고, 석유 수출국의 동태적 최적화를 위한 해밀토니안(Hamiltonian)을 다음과 같이 구성하였다.

4) 표현의 단순화를 위해 각 변수에 포함된 시점을 나타내는 표시는 생략하였다.

$$H^E = e^{-rt} [V(\alpha x) + (p((1-\alpha)x) - q)(1-\alpha)x - C(z)x - c(e)] \\ + \lambda(t)[f(e, s) - x] + \psi(t)f(e, s)$$

여기서  $\lambda(t)$ 는 상태변수(state variable)인 석유 매장량에 대응하는 공동상태변수(costate variable)이고,  $\psi(t)$ 는 상태변수인 탐사 및 개발로 인해 누적적으로 증가한 매장량에 대응하는 공동상태변수이다. 이 헤밀토니언으로부터 석유 수출국이 누리는 경제적 잉여의 극대화를 위한 현재가치(present value) 필요조건들은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$e^{-rt} [V'(\alpha x)\alpha + (p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2x \\ + (p((1-\alpha)x) - q)(1-\alpha) - C(z))] - \lambda = 0 \quad (6)$$

$$- e^{-rt} c'(e) + (\lambda + \psi) f_e(e, s) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = e^{-rt} c'(z)x \quad (8)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -(\lambda + \psi) f_s(e, s)$$

$$\frac{dz}{dt} = f(e, s) - x \quad z(0) = z^0$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

여기서 식 (6)은 한계재정방정식(marginal arbitrage equation)으로서 석유 수출국이 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해 생산할 석유 생산량의 크기에 대한 정보를 제공한다. 이 식에 따르면 석유 수출국은 자국 내 석유 소비로 인해 누리는 한계효용과 석유 수출로 인해 얻을 수 있는 한계수입의 합으로 구성되는 한계편익(marginal benefit)과 한계채굴비용과 희소지대의 합으로 구성되는 한계비용(marginal cost)이 일치할 때 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 각 시점별 적정 석유 생산량을 결정하게 됨을 알 수 있다. 아울러 식 (7)은 석유 수출국이 탐사 및 개발을 위한 적정 노력의 크기에 대한 정보를 제공한다.

다음은 추종자인 석유 수출국의 반응을 토대로 석유 수입국의 경제적 잉여를 극대화 하는 문제를 생각해 보자. 석유 수입국의 경제적 잉여를 극대화하는 문제는 석유 수출국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해 도출한 필요조건들을 제약조건으로 목적함수인 식 (1)을 극대화하는 문제가 될 것이다. 따라서 석유 수입국의 경제적 잉여를 극대화하는 문제는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \int_0^T (e^{-rt} [U((1-\alpha)x) + V'(\alpha x)\alpha x \\ + p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2x^2 - C(z)x] - \lambda x) dt \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad \frac{d\lambda}{dt} &= e^{-rt} C'(z)x \\ \frac{d\psi}{dt} &= -e^{-rt} c'(e) f_s(e, s) / f_e(e, s) \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{ds}{dt} - x \quad z(0) = z^0 \\ \frac{ds}{dt} &= f(e, s) \end{aligned}$$

$$x > 0, e > 0, z > 0, s > 0$$

여기서 석유 매장량의 공동상태변수인  $\lambda(t)$ 는 각 시점에서의 한 단위 석유 생산에 따른 희소지대에 해당하므로 식 (9)에 포함된  $\lambda x$ 는 총 희소지대(total instantaneous scarcity rent)에 해당함을 알 수 있다. 따라서 식 (9)는 석유 수입국의 경제적 잉여는 석유 수출국이  $x$  단위의 석유를 생산함에 따라 발생하는 총 희소지대의 제약을 받는다는 사실을 보여주고 있다. 그리고  $\lambda(t)$ 의 일반해는 미분방정식인 식 (8)로부터  $\lambda(t) = \lambda(T) - \int_t^T e^{-r\tau} C'(z(\tau))x(\tau) d\tau$ 가 됨을 알 수 있다. 따라서 석유 수입국의 경제적 잉여의 극대화를 위한 목적함수를 나타내는 식 (9)는 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \int_0^T (e^{-rt} [U((1-\alpha)x) + V'(\alpha x)\alpha x + p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2x^2 \\ - C(z)x] - [\lambda(T) - \int_t^T e^{-r\tau} C'(z)x d\tau] x) dt \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 식 (10)에서  $\lambda(T) = 0$  일 때 석유 수입국의 경제적 잉여가 극대화될 것임을 알 수 있다.<sup>5)</sup> 따라서 이 조건과 Fumini 정리를 사용하여 식 (10)을 재정리하면 석유 수입국의 목적함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Max} \int_0^T e^{-rt} (U((1-\alpha)x) + V'(\alpha x)\alpha x + p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2 x^2 - C(z)x + C'(z)x(z^o - z)) dt$$

이 식으로부터 석유 수입국이 누리는 경제적 잉여의 극대화를 위한 헤밀토니언은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} H^I = & e^{-rt} [U((1-\alpha)x) + V'(\alpha x)\alpha x + p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2 x^2 - C(z)x \\ & + C'(z)x(z^o - z) - \zeta(t)e^{-rt}c'(e)f_s(e, s)/f_e(e, s) \\ & + \xi(t)[f(e, s) - x] + \mu(t)f(e, s) \end{aligned}$$

여기서  $\zeta(t)$ 는 상태변수  $\psi$ , 그리고  $\xi(t)$ 과  $\mu(t)$ 는 상태변수  $z$ 와  $s$ 에 각각 대응하는 공동 상태변수를 표시한다. 그리고 이 헤밀토니언으로부터 석유 수입국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 현재가치 필요조건들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} e^{-rt} [U'((1-\alpha)x)(1-\alpha) + V''(\alpha x)\alpha^2 x + V'(\alpha x)\alpha \\ + p''((1-\alpha)x)(1-\alpha)^3 x^2 + 2p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2 x \\ - C(z) + C'(z)(z^o - z) - \xi(t) = 0 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\frac{d\zeta(t)}{dt} = 0$$

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = -e^{-rt} [C''(z)(z^o - z) - 2C'(z)]x$$

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{\zeta e^{-rt} c'(e) [f_{ss}(e, s)f_e(e, s) - f_s(e, s)f_{es}(e, s)]}{f^2(e, s)} - (\xi + \mu)f_s(e, s)$$

5) 이에 대한 상세한 설명은 Karp (1984)의 p. 80을 참조할 것.

이 필요조건들 중 식 (11)은 석유 수입국이 부과할 관세의 부과구조가 동태적으로 어떤 형태를 띠게 될 것인가에 대한 정보를 제공하게 될 것이다. 만약 수입국이 각 시점별로 부과할 관세의 크기에 대한 시간경로를 수입 초기( $t = 0$ )에 선언한다면 석유 수출국의 각 시점별 석유 생산량의 시간경로는 수입국이 초기에 부과하기로 선언한 관세의 시간경로에 반응하여 결정되게 될 것이다. 아울러 석유 생산량의 시간경로는 초기 석유 매장량에 따라 결정될 것이다. 그러나 시간이 흐름에 따라 생산이 이루어지면 각 시점별 석유 매장량의 크기는 변화하게 될 것이며 이에 따라 석유 수입국이 초기에 선언한 관세의 시간경로에 따라 결정된 석유 생산량의 시간경로는 더 이상 적정시간경로(optimal time path)가 될 수 없게 될 것이다. 즉, 시점  $t = v > 0$ 에서는 매장량은 초기 매장량  $z^0$ 와는 다른  $z^*$  ( $v$ )이 될 것이므로 초기 매장량에 기초한 각 시점별 석유 생산량의 크기는 더 이상 최적 생산량이 될 수 없다. 따라서 석유 수입국은 초기에 부과하기로 선언한 각 시점별 관세의 크기를 지속적으로 부과한다면 자국의 경제적 잉여를 극대화할 수 없게 될 것이다. 따라서 석유 수입국은 석유 수입으로 인한 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해서는 초기에 부과하기로 선언한 관세의 시간경로와는 달리 각 시점별로 서로 다른 시간경로에 따른 관세, 즉 동태적으로 비일관적인(dynamically inconsistent)관세를 부과해야 할 것이다.

지금까지 본 연구는 석유 수출국이 생산된 석유의 일정량을 국내에서 소비하고 나머지를 수출하는 경우를 상정하여 수출국의 석유 탐사 및 개발이 수입국이 부과할 관세의 동태적 부과구조를 분석하였다. 만약 석유 수출국이 생산된 석유를 국내에서 소비하지 않고 전량 수출하는 경우에 수입국이 부과할 관세의 동태적 부과구조는 어떻게 될 것인가를 살펴보자. 즉, 이 경우는  $\alpha = 0$ 에 해당하게 된다. 이 경우에 석유 수입국과 석유 수출국이 석유 교역으로 인해 얻을 수 있는 경제적 잉여의 크기는 다음과 같이 각각 표시할 수 있을 것이다.

$$J^I = \int_0^T e^{-rt} [U(x) - (p(x) - q)x] dt \quad (\text{수입국의 경제적 잉여}) \quad (12)$$

$$J^E = \int_0^T e^{-rt} [(p(x) - q)x - C(z)x - c(e)] dt \quad (\text{수출국의 경제적 잉여}) \quad (13)$$

그리고 앞서 기술한 식 (3)과 식 (4)의 제약 하에서 석유 수출국의 동태적 최적화를 위한 필요조건들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e^{-rt} [p'(x)x + (p(x) - q) - C(z)] - \lambda = 0 \quad (14)$$

$$- e^{-rt} c'(e) + (\lambda + \psi) f_e(e, s) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = e^{-rt} C'(z)x \quad (16)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -(\lambda + \psi) f_s(e, s)$$

$$\frac{dz}{dt} = f(e, s) - x \quad z(0) = z^0$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

주어진 관세 하에서 석유 수출국의 반응을 고려한 석유 수입국의 동태적 최적화 문제는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\text{Max} \int_0^T (e^{-rt} [U(x) + p'(x)x^2 - C(z)x] - \lambda x) dt$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{d\lambda}{dt} = e^{-rt} C'(z)x$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -e^{-rt} c'(e) f_s(e, s) / f_e(e, s)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{ds}{dt} - x \quad z(0) = z^0$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

$$x > 0, e > 0, z > 0, s > 0$$

그리고 앞서 석유 수입국의 경제적 잉여의 극대화를 위한 필요조건들을 도출하는 과정

에 석유 수출국이 생산된 석유를 전량 수출하는 경우( $\alpha = 0$ )를 적용하면 석유 수입국이 누리는 경제적 잉여의 최적화를 위한 필요조건들은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$e^{-rt} [U'(x) + p''(x)x^2 + 2p'(x)x - C(z) + C'(z^o - z)] - \xi(t) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = 0$$

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = -e^{-rt} [C''(z)(z^o - z) - 2C'(z)]x$$

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{\zeta e^{-rt} c'(e) [f_{ss}(e, s)f_e(e, s) - f_s(e, s)f_{es}(e, s)]}{f^2(e, s)} - (\xi + \mu)f_s(e, s)$$

이들 필요조건 중 식 (17)을 살펴보면 이 식은 초기 석유 매장량  $z^o$ 을 포함하고 있음을 알 수 있다. 앞 절에서 초기 시점의 석유 매장량에 기초하여 석유 수입국이 각 시점별로 부과하기로 선언한 관세의 시간경로는 시간흐름에 따라 더 이상 적정시간경로가 될 수 없음을 설명한 바 있다. 따라서 이 경우에도 석유 수입국은 석유 수입 시 동태적으로 비일관적인 관세를 부과해야 석유 수입으로 인한 자국의 경제적 잉여를 극대화 할 수 있을 것이다.

## 2. 채굴비용이 매장량의 영향을 받지 않는 경우

본 절에서는 석유 채굴비용이 석유 매장량 크기의 영향을 받지 않는 경우에 석유 수입국이 부과할 관세의 동태적 부과구조를 분석해 보자. 이 경우는 석유 채굴비용은 석유 매장량의 영향을 받지 않고 단지 석유 생산량의 영향을 받는 경우에 해당한다. 따라서 제II장에서 기술한 바와 같이 석유 채굴비용은  $C(x(t))$ 로 표시할 수 있을 것이다. 따라서 석유 수출국의 경제적 잉여는 다음과 같이 표시된다.

$$J^E = \int_0^T e^{-rt} [V(\alpha x) + (p((1-\alpha)x) - q)(1-\alpha)x - C(x) - c(e)] dt \quad (18)$$

이 경우에 석유 수출국의 최적화 문제는 동태적 제약조건인 식 (3)과 식 (4) 하에서 목적함수인 식 (18)을 극대화하는 문제로 요약될 수 있다. 따라서 석유 수출국이 누리는 경제적 잉여의 극대화를 위한 해밀토니언은 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$H^E = e^{-rt} [V(\alpha x) + (p((1-\alpha)x) - q)(1-\alpha)x - C(x) - c(e)] \\ + \lambda(t)[f(e, s) - x] + \psi(t)f(e, s)$$

그리고 이 해밀토니언으로부터 석유 수출국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 필요조건들은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$e^{-rt} [V'(\alpha x)\alpha + (p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2x + (p((1-\alpha)x) - q)(1-\alpha) \\ - C'(x))] - \lambda = 0 \tag{19}$$

$$- e^{-rt} c'(e) + (\lambda + \psi)f_e(e, s) = 0 \tag{20}$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0 \tag{21}$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -(\lambda + \psi)f_s(e, s)$$

$$\frac{dz}{dt} = f(e, s) - x \quad z(0) = z^o$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

그리고 이때 석유 수출국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 횡단선조건(transversality condition)으로부터  $\lambda(T) = 0$ 임을 알 수 있다<sup>6)</sup>. 그리고 이 조건으로부터 식 (21)의 일반해는  $\lambda(t) = 0$ 가 된다. 다음은 석유 수입국이 석유 수출국의 반응을 토대로 자국의 경제

---

6) 석유 수출국의 동태적 최적화를 위한 횡단선조건 중의 하나인  $\lambda(T) \geq 0$ ,  $\lambda(T)z(T) = 0$ 으로부터  $\lambda(T) = 0$ 임을 알 수 있다. 동태적 최적화를 위한 횡단선조건에 대해서는 Long and Vousden (1977)의 p. 15를 참조할 것.



적 잉여를 극대화하는 문제를 생각해 보자.  $\lambda(t) = 0$ 과 앞서 도출한 필요조건들로부터 석유 수입국의 경제적 잉여를 극대화 문제는 다음과 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$\text{Max} \int_0^T (e^{-rt} [U((1-\alpha)x) + V'(\alpha x)\alpha x + p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2 x^2 - C'(x)x]) dt \quad (22)$$

$$s.t \quad \frac{d\psi}{dt} = -e^{-rt} c'(e) f_s(e, s) / f_e(e, s)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{ds}{dt} - x \quad z(0) = z^0$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

$$x > 0, e > 0, z > 0, s > 0$$

그리고 석유 수입국이 누리는 경제적 잉여의 극대화를 위한 헤밀토니언은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$H^I = e^{-rt} [U((1-\alpha)x) + V'(\alpha x)\alpha x + p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2 x^2 - C'(x)x - \zeta(t)e^{-rt} c'(e) f_s(e, s) / f_e(e, s) + \xi(t)[f(e, s) - x] + \mu(t)f(e, s)]$$

이 헤밀토니언으로부터 석유 수입국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 필요조건들은 다음과 같이 도출될 수 있다.

$$e^{-rt} [U'((1-\alpha)x)(1-\alpha) + V''(\alpha x)\alpha^2 x + V'(\alpha x)\alpha + p''((1-\alpha)x)(1-\alpha)^3 x^2 + 2p'((1-\alpha)x)(1-\alpha)^2 x - C''(x)x - C'(x)] = 0 \quad (23)$$

$$\frac{d\zeta(t)}{dt} = 0$$

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{\zeta e^{-rt} c'(e) [f_{ss}(e, s) f_e(e, s) - f_s(e, s) f_{es}(e, s)]}{f^2(e, s)} - (\xi + \mu) f_s(e, s)$$

이 필요조건들 중 식 (23)과 앞서 기술한 식 (11)을 비교하면 식 (23)은 석유 수출국의 초기 매장량  $z^0$ 의 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 따라서 석유 채굴비용이 매장량의 영향을 받지 않는 경우에 석유 수입국이 시간흐름에 따라 부과할 석유 수입관세는 동태적으로 일관성 있게(dynamically consistent) 부과해야 한다는 사실을 알 수 있다. 즉, 각 시점별 석유 매장량은 석유 수입국이 경제적 잉여를 극대화시키기 위한 적정시간 경로에 영향을 미치지 않기 때문에 석유 수입국이 석유 수입 초기에 부과하기로 선언한 수입관세의 시간경로를 변경할 필요가 없게 될 것이다. 따라서 석유 수입국이 수입 초기에 부과하기로 선언한 관세의 시간경로가 최적시간경로가 된다. 그리고 석유 채굴비용이 매장량의 영향을 받지 않는 경우에 희소지대는  $\lambda(t) = 0$ 이 되므로 석유 채굴비용이 매장량의 영향을 받는 경우와는 달리 희소지대가 석유 수입국의 경제적 잉여를 제약하지 않는다는 사실을 알 수 있다. 아울러 이 경우는 석유 수입국이 각 시점별로 수출국에 지불해야하는 희소지대, 즉 사용자 비용(user cost)을 지불할 필요가 없으며 사용자 비용을 수입국이 취득(expropriate)하게 되는 경우에 해당함을 알 수 있다.<sup>7)</sup>

만약에 석유 수출국이 생산된 석유를 국내에서 소비하지 않고 전량 수출하는 경우에 수입국이 부과할 관세의 동태적 부과구조는 어떻게 될 것인가를 살펴보자. 즉, 이 경우는 앞서 기술한 바와 같이  $\alpha = 0$ 에 해당하게 된다. 이 경우에 석유 수입국과 석유 수출국이 석유 교역으로 인해 얻을 수 있는 경제적 잉여의 크기는 다음과 같이 각각 표시할 수 있을 것이다.

$$J^I = \int_0^T e^{-rt} [U(x) - (p(x) - q)x] dt \quad (\text{수입국의 경제적 잉여})$$

$$J^E = \int_0^T e^{-rt} [(p(x) - q)x - C(x) - c(e)] dt \quad (\text{수출국의 경제적 잉여})$$

그리고 동태적 제약 조건인 식 (3)과 식 (4) 하에서 석유 수출국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 필요조건들은 다음과 같이 구할 수 있다.

7) 사용자 비용(user cost)의 개념에 대한 설명은 Krautkraemer (1998)의 p. 2066을 참조할 것.

$$e^{-rt} [p'(x)x + (p(x) - q) - C'(x)] - \lambda = 0$$

$$-e^{-rt} c'(e) + (\lambda + \psi) f_e(e, s) = 0$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -(\lambda + \psi) f_s(e, s)$$

$$\frac{dz}{dt} = f(e, s) - x \quad z(0) = z^o$$

$$\frac{ds}{dt} = f(e, s)$$

그리고 이들 제약조건 하에서 석유 수출국을 반응을 고려한 석유 수입국이 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위한 필요조건은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$e^{-rt} [U'(x) + p''(x)x^2 + 2p'(x)x - C''(x)x - C'(x)] = 0 \quad (24)$$

$$\frac{d\zeta(t)}{dt} = 0$$

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{\zeta e^{-rt} c'(e) [f_{ss}(e, s) f_e(e, s) - f_s(e, s) f_{es}(e, s)]}{f^2(e, s)} - (\xi + \mu) f_s(e, s)$$

이들 필요조건 중 식 (24)는 석유 수출국의 초기 매장량  $z^o$ 를 포함하고 있지 않다. 따라서 앞서 기술한 바와 같이 석유 수출국이 생산된 석유를 자국의 국내 소비에 사용하지 않고 전량 수출하는 경우에 석유 수입국은 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해 동태적으로 일관성 있는 관세를 부과하여야 한다는 사실을 알 수 있다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구는 시장지배력을 가진 석유 수출국이 탐사 및 개발을 통해 석유 매장량을 증대시키는 경우에 석유 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 대한 분석을

시도하였다. 본 연구는 석유 수출국이 완전경쟁 상태에 있으며 석유 수입국이 시장지배력을 가지는 경우에 수출국의 석유 탐사 및 개발이 수입국이 부과하는 관세의 동태적 부과구조를 연구한 이덕만(2011)을 확장하여 석유 수출국과 석유 수입국이 각각 시장지배력을 가지는 경우에 석유 수출국의 탐사 및 개발이 수입국이 부과하는 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구는 석유 수입관세의 동태적 부과구조를 분석한 기존연구들이 석유 수출국이 생산된 석유를 전량 수출하는 것을 가정한 것과는 달리 석유 수출국은 생산된 석유의 일정량을 국내 소비에 사용하고 나머지를 해외에 수출하는 경우에 대한 분석을 시도하였다. 그리고 본 연구는 석유 채굴비용이 석유 매장량 크기의 영향을 받는 경우와 석유 매장량 크기의 영향을 받지 않는 경우를 상정하여 각각의 경우에 대한 분석을 시도하였다. 아울러 본 연구는 연구목적에 의해 석유 수입국이 선도자가 되는 Stackelberg differential 게임모형을 사용하였으며, 석유 수출국과 수입국의 경제적 잉여를 최적화하기 위한 방법론으로 적정제어이론을 채택하였다.

본 연구의 결과 석유 채굴비용이 석유 매장량 크기의 영향을 받는 경우에 석유 수입국이 수입 초기에 부과하기로 선언한 관세의 시간경로는 적정시간경로가 될 수 없기 때문에 석유 수입국이 수입된 석유의 소비로 인한 자국의 경제적 잉여를 극대화하기 위해서는 동태적으로 비일관적인 관세를 부과할 것을 제안하고 있다. 이 경우에 석유 수입국이 동태적으로 비일관적인 관세를 부과해야 하는 이유는 석유 생산에 따른 희소지대의 변화가 석유 수입국의 경제적 잉여를 제약하기 때문이다. 그리고 석유 채굴비용이 석유 매장량 크기의 영향을 받지 않는 경우에 석유 수입국이 부과할 관세의 동태적 부과구조는 수입국이 수입 초기에 부과하기로 선언한 시간경로에 따라 일관성 있게 부과되어야 할 것이다. 이 경우는 석유 생산에 따른 희소지대가 0이 되기 때문에 석유 수입국이 수입된 석유의 소비로 인해 누리는 경제적 잉여를 희소지대가 제약하지 못하기 때문으로 볼 수 있다. 그리고 석유 수출국이 생산된 석유의 일정량을 국내 소비에 사용하는지의 여부는 수입국이 부과하는 석유 수입관세의 동태적 부과구조를 분석한 본 연구의 결과에 영향을 미치지 않는다는 사실을 보이고 있다.

마지막으로 본 연구는 시장지배력을 가진 석유 수출국의 탐사 및 개발이 석유 매장량을 확실히 증가시키는 경우에 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조에 대

한 분석을 deterministic 모형을 사용하여 시도하였다. 그러나 본 연구의 결과를 더욱 확장하여 시장지배력을 가진 수출국의 탐사 및 개발의 결과가 불확실한 경우에 수입국이 부과할 석유 수입관세의 동태적 부과구조를 stochastic 모형을 사용하여 분석할 필요성이 있을 것이다.

## [References]

- 이덕만, “석유 탐사 및 개발이 석유 수입국의 관세정책에 미치는 영향”, 『관세학회지』, 제 12권 1호, 2011, pp. 129~141.
- Adelman, M. A., “Mineral Depletion with Special Reference to Petroleum,” *Review of Economics and Statistics*, Vol. 72, No. 1, 1990, pp. 1~10.
- Arrow, K. and S. Chang, “Optimal Pricing, use and Exploration of Uncertain Natural Resource Stocks,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 9, No. 1, 1982, pp. 1~10.
- Batabyal, A., “A Game Theoretic Analysis of Tariffs, Dynamic Inconsistency, Resource Conservation and Trade,” *Applied Economics Letters*, Vol. 13, 2006, pp. 217~222.
- Dasgupta, P. and G. Heal, *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge, Cambridge University Press, 1979.
- Eckstein, Z. and M. Eichenbaum, “Oil Supply Distruption and the Optimal Tariff in a Dynamic Stochastic Model,” in Thomas Sargent, eds., *Energy Foresight and Strategy, Resource for the Future*, Washington, D.C., 1985.
- Karp, L., “Optimal and Consistency in a Differential Game With Non-renewable Resource,” *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 8, 1984, pp. 73~97.
- Karp, L., and D. M. Newbery, “OPEC and the U.S. Oil Import Tariff,” *The Economic Journal*, Vol. 101, 1991, pp. 303~313.
- Karp, L., and D. M. Newbery, “Dynamically Consistent Oil Import Tariffs,” *Canadian Journal of Economics*, Vol. 25, No. 1, 1992, pp. 1~21.

- Kemp, M. C., and N. V. Long, "Optimal Tariffs and Exhaustible Resources," in: M. C. Kemp and N. V. Long, eds., *Exhaustible Resources, Optimality and Trade*, Amsterdam, North-Holland, 1980, pp. 187~195.
- Krautkraemer, J., "Nonrenewable Resource Scarcity," *Journal of Economic Literature*, Vol. XXXVI, 1998, pp. 2065~2107.
- Long, N. V. and N. Vouden, "Optimal Control Theorems," in: J.D. Pitchford and S.J. Turnovsky, eds, *Application of Control Theory to Economic Analysis*, North Holland, Amsterdam, Netherland, 1977, pp. 11~34.
- Maskin, E. and D. M. Newbery, "Disadvantageous Oil Tariffs and Dynamic Consistency," *American Economic Review*, Vol. 80, No. 1, 1990, pp. 143~156.
- Newbery, D. M., "Oil Prices, Cartels, and the Problem of Dynamic Inconsistency," *The Economic Journal*, Vol. 91, 1981, pp. 617~646.
- OPEC, OPEC Annual Statistical Bulletin, [http://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/ASB2015.pdf](http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2015.pdf), 2015.
- Peterson, F. M., "A Modeling of Mining and Exploring for Exhaustible Resources," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 5, No. 3, 1978, pp. 236~251.
- Pyndick, R. S., "The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources," *Journal of Political Economy*, Vol. 86, No. 5, 1978, pp. 841~861.
- Pyndick, R. S., "Uncertainty and Exhaustible Resource Markets," *Journal of Political Economy*, Vol. 88, No. 6, 1980, pp. 1203~1225.
- Swierzbinski, J. E. and R. Mendelsohn, "Exploration and Exhaustible Resources: The Microfoundations of Aggregate Models," *International Economic Review*, 30, No. 1, 1989, pp. 175~186.
- Xu, C. and L. Bell, "Global Reserves, Oil Production Show Increases for 2014," *Oil & Gas Journal*, Vol. 112, No. 12, 2014, pp. 30~33.