

適正 環境汚染水準에 대한 動態分析*

金 鍾 元**

논 문 초 록 :

본 연구는 두 부문 일반균형모형을 이용하여 적정환경오염수준이 동태적으로 안정적인 균형으로 수렴하는가를 이론적으로 고찰하고자 하였다. 이를 위해 기존의 일반균형모형을 본 연구의 목적에 부합되도록 재구성한 뒤, 위상도(phase diagram)분석을 통하여 동태적 균형을 살펴보았다. 또한 기존의 동태모형에서 생태계의 자정능력에 대한 단순가정들을 완화하거나 기술진보로 인해 오염물질 발생량 자체가 줄어들 경우 기존의 연구에서 제시된 것보다는 훨씬 복잡하고 다양한 결과를 도출하였다. 여기서 얻은 정책적 시사점은 우리 나라에서 환경오염방지의 수단으로 사용되고 있는 경직된 배출부과금으로는 장기적으로 안정적인 적정환경오염수준을 달성할 수 있는 보장이 없다는 것이다. 그러므로 환경오염방지에 대한 국내·외적인 요구에 부응하고 보다 신축적이고 시장경제적 접근인 오염배출 거래제도 등의 도입에 대한 필요성을 시사해 주고 있다.

핵심주제어 : 환경오염, 일반균형모형, 최적제어이론

경제학문헌목록 주제분류 : Q2

I. 序 論

경제학자들은 최적제어이론(optimal control theory)을 이용한 동태분석을 통하여 적정환경오염수준 등에 대하여 많은 연구를 하여 왔다. Keeler *et al.*(1971), Plourde(1972)와 Forster(1972) 등은 주어진 단일생산요소로서 동질적인 하나의 제품을 생산하는 데 있어서 오염문제를 동태적 접근을 통하여 분석하였다. Plourde(1972), Smith(1972) 그리고 Forster(1972)는 오염은 경제시스템속에서 개인의 효용함수 속에서 부의 공공재로 간주하여 목적함수를 최대화하였다. Forster

* 심사과정에서 유익한 논평을 해 주신 두 익명의 심사위원님께 감사드린다. 남아 있는 오류는 전적으로 필자의 책임이다.

** 국토개발연구원 책임연구원

(1977)와 Comolli(1977)는 단순모형을 확장하여 효용함수를 최대화하는 두 부문 일반균형모형속에서 오염문제를 다루었다. 그들은 두 부문 균형모형을 이용하여 도시와 농촌지역의 오염통제에 따른 소득분배 효과문제나 대체재화들에 대한 생산자와 소비자의 선택문제에까지도 확장할 수 있다는 것을 보여 주었다. 위에서 언급한 모델들은 생산과정의 부산물으로써 일정 수준의 오염이 누적되고 오염누적분의 일정량이 자연적으로 감소된다는 가정하에서 이루어졌다.

Forster(1980)¹⁾는 에너지사용량과 환경오염에 관하여 다루면서 오염을 두 가지 형태로 다루었다. 하나는 자동차에 의해 배출되는 오염원과 같이 환경에 유해하지만 장기적으로 누적되는 형태가 아닌 flow개념의 오염과 방사능물질과 같은 장기적으로 누적되는 stock개념의 오염물질에 대하여 효용함수를 최대화할 수 있는 에너지사용량을 최적시간경로를 통하여 보여 주고자 하였다. 최근에 최적오염수준을 달성하기 위한 두 가지 형태의 연구가 있었다. 하나는 오염수준이 기존의 연구에서와 달리 Plourde and Yeung(1989)은 오염량이 확정적(deterministic) 패턴이 아닌 확률적(stochastic) 패턴으로 보고 확률적 최적제어법을 이용하였고, 다른 하나는 비점오염원에 대해 게임이론(differential game theory)을 이용하여 적정환경 정책방안을 설계하였다.

본 연구는 다음과 같은 두 가지 목적을 가지고 접근하였다. 첫째는, 위의 단순모델에서 가정한 오염량의 일정 부분이 자연적으로 감소한다는 가정을 완화하여도 위상도상에서 동일한 방향으로 움직이는가 하는 점이다. 다시 말하면, 단순모델을 보다 현실적인 조건으로 대체하여도 기본적인 방향성이 같은가이다. 둘째는, 어떠한 조건일 때 위상도상에서 어떤 점에서 시작하더라도 적정환경세를 부과할 경우, 발산하지 않고 수렴할 수 있는가 하는 점이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 Forster(1977)와 Comolli(1977)의 두 부문 균형모델의 아이디어를 이용하여 본 연구의 초점에 맞추어 모델을 재구성하여 이해하기 쉽게 전개하였다. 또한 도출된 Hamiltonian의 극대화조건(maximum principle)의 경제적 의미를 살펴보고, 제Ⅲ장에서는 제Ⅱ장에서 분석한 모형의 제약조건을 변화시킬 경우 위상도를 통하여 균형의 안정성에 대하여 살펴보고자 한다. 제Ⅳ장에서는 비교분석을 통하여 얻어진 결과를 이용하여 정책적 시사점을 도출하고자 하였다.

1) 보다 자세한 내용은 Foster(1980) 참조.

II. 二部門 均衡模型

문제를 단순화하기 위하여 하나의 경제가 두 개의 생산요소(자본: K , 노동: L)와 두 산업부문(A, B)으로 구성되어 있다고 가정하자. 두 개의 산업부문이 C_1 과 C_2 라는 제품을 생산하고 오염량은 두 개의 상품에 의해 부산물로써 생산량의 일정 비율(α_1, α_2) 발생된다고 가정하자. 또한 발생된 오염량(Q)의 일정 비율(β)이 자정작용 및 현재의 기술수준에서 정화되는 것으로 가정하였다. 이 경우 social planner의 사회적 후생극대화함수를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } \int_0^{\infty} U(C_1, C_2, Q) e^{-\delta t} dt, \\
 & \text{s.t. } \dot{Q} = \alpha_1 F_1(K_1, L_1) + \alpha_2 F_2(K_2, L_2) - \beta Q \\
 & \quad C_1 \leq F_1(K_1, L_1) \\
 & \quad C_2 \leq F_2(K_2, L_2) \\
 & \quad K_1 + K_2 + K = K \\
 & \quad L_1 + L_2 = L
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 효용함수를 가법적²⁾이고, 생산함수는 두 부분 모두 규모불변(CRS)이고 한계생산성체감의 법칙이 적용된다고 가정하였다. 이런 가정하에서 생산함수와 투입요소 제약조건식을 다음과 같이 변환할 수 있다.³⁾

$$F_i(K_i, L_i) = u_i f_i(k_i), \quad i = 1, 2$$

2) $V(C_2)$ 와 $W(Q)$ 는 (식) 1에서 표기한 일반적인 효용함수 $U(C_1, C_2, Q)$ 를 유도과정을 명확히 하고 단순화하기 위하여 가법적(additive)인 형태의 효용함수를 가정하였다. 여기서 효용함수를 CES, Cobb-Douglas(실제 양변에 로그를 취하면 additive 형태가 됨) 등의 다양한 형태로도 가정하여 분석할 수 있으나, 본 연구에서 의도하는 동태분석의 결과는 동일한 방법으로 유도되기 때문에 단순한 형태의 효용함수를 가정하였다.

3) 함수 $F_i(K_i, L_i) = u_i f_i(k_i)$ 의 유도과정은 다음과 같다.
 $Y_i = F_i(K_i, L_i)$ 의 양변을 L 로 나누면 $Y_i/L = (1/L) \cdot F_i(K_i, L_i)$ 이 되고, 여기서 $y_i \equiv Y_i/L$, $u_i \equiv L_i/L$, $k_i \equiv K_i/L_i$ 로 설정하자. CRS조건 및 자본과 노동의 완전고용 가정에 의해 다음과 같이 유도된다.
 $y_i = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot F_i(K_i, L_i) = \left(\frac{L_i}{L}\right) \cdot F_i\left(\frac{K_i}{L_i}, \frac{L_i}{L_i}\right) = \left(\frac{L_i}{L}\right) \cdot f(k_i) = u_i f(k_i).$

여기서 $u_i = \frac{L_i}{L}$, $k_i = \frac{K_i}{L_i}$, 그리고 $u_1 + u_2 = 1$, $u_1 \cdot k_1 + u_2 \cdot k_2 = k$

위의 변환을 식 (1)에 대입하면, 목적함수를 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max } & \int_0^{\infty} (U(C_1) + V(C_2) + W(Q))e^{-\delta t} dt \\ \text{s.t. } & \dot{Q} = \alpha_1 \cdot u_1 f_1(k_1) + \alpha_2 u_2 f_2(k_2) - \beta Q \\ & C_i \leq u_i f_i(k_i), \quad i = 1, 2 \\ & u_1 + u_2 = 1, \text{ and } u_1 \cdot k_1 + u_2 \cdot k_2 = k \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 한계생산물과 그 증가율은 일반적인 제품과 동일한 성격을 갖는 것으로 간주하여, $f'_i(k_i) > 0$, $f''_i(k_i) < 0$ 로 가정한다.

위와 같은 제약조건하에서 Hamiltonian과 부등제약식을 가진 라그랑제를 구하면 다음과 같다.⁴⁾

$$\begin{aligned} H &= U(C_1) + V(C_2) + W(Q) + m[\alpha_1 u_1 f_1(k_1) + \alpha_2 u_2 f_2(k_2) - \beta Q] \\ L &= H + \lambda_1(u_1 f_1(k_1) - C_1) + \lambda_2(u_2 f_2(k_2) - C_2) \\ &\quad + \lambda_3(1 - u_1 - u_2) + \lambda_4(k - u_1 k_1 - u_2 k_2) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터 Pontryagin의 maximum principle조건들과 Kuhn-Tucker조건들은 다음과 같다.

$$\dot{m} = -\frac{\partial L}{\partial Q} + \delta m: \text{equation of motion for costate variable (m)} \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \frac{\partial L}{\partial m}: \text{equation of motion for state variable (Q)} \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(t) = 0: \text{transversality condition} \quad (5)$$

$$U(C_1) - \lambda_1 \leq 0, \quad C_1 > 0, \text{ and } C_1(U(C_1) - \lambda_1) = 0 \quad (6)$$

$$V(C_2) - \lambda_2 \leq 0, \quad C_2 > 0, \text{ and } C_2(V(C_2) - \lambda_2) = 0 \quad (7)$$

$$(\alpha_1 m \mu_1 + \lambda_1 u_1) f'_1(k_1) - \lambda_4 u_1 \leq 0, \quad k_1 \geq 0, \text{ and } k_1 \cdot \frac{\partial L}{\partial k_1} = 0 \quad (8)$$

$$(\alpha_2 m \mu_2 + \lambda_2 u_2) f'_2(k_2) - \lambda_4 u_2 \leq 0, \quad k_2 \geq 0, \text{ and } k_2 \cdot \frac{\partial L}{\partial k_2} = 0 \quad (9)$$

4) 보다 자세한 설명과 이해를 돕기 위해서는, Chiang(1992) 또는 Kamien and Schwartz (1991) 참조.

위의 조건에서 $C_i > 0$ 이므로 식 (5)~식 (8)로부터 다음과 같은 내적해(interior solution)를 구할 수 있다.

$$U(C_1) = \lambda_1 \quad (10)$$

$$V(C_2) = \lambda_2 \quad (11)$$

$$(m\alpha_1 + \lambda_1)f_1(k_1) = \lambda_4 = (\alpha_2 m + \lambda_2)f_2(k_2) \quad (12)$$

$$\dot{m} = m(\delta + \beta) - W'(Q) \quad (13)$$

$$\dot{Q} = \alpha_1 u_1 f_1(k_1) + \alpha_2 u_2 f_2(k_2) - \beta Q \quad (14)$$

1. 경제적 해석

m 은 특정 시점 t 에서의 오염물질의 누적에 대한 기회비용(shadow price)으로 해석할 수 있다. 여기서 오염물질의 누적은 소비자에게 음의 효용이기 때문에 m 은 마이너스값을 갖는다. 다른 λ_1 과 λ_2 는 소비재 C_1 과 C_2 의 소비에 따른 한계효용으로 간주할 수 있다. λ_3 는 노동투입의 한 단위 증가에 따라 추가되는 한계효용, 즉 노동에 대한 기회비용이며 이는 실질임금으로 해석될 수 있다. λ_4 는 노동장비율에 대한 한계효용으로 해석할 수 있다. 한편, 위상도분석에 필요한 두 개의 분계선(식 (13)과 (14))의 의미를 다음과 같이 해석할 수 있다. 두 개의 분계선이 만나는 균형점은 오염배출량에 따른 기회비용이 실제 오염비용과 일치함을 의미한다. 균형점으로부터 멀어짐으로 인해 나타나는 격차는 기회비용이 실제의 오염비용을 반영하지 못하고 있는 부분으로 해석할 수 있다. 다음 장에서 언급하고 있지만, m 의 음의 효용에 (-1) 을 곱하면 양의 값을 갖게 되는데 이는 기회비용의 반대 개념인 편익으로 해석할 수도 있다.

2. Steady-State Solution

분석을 용이하게 하기 위하여 마이너스의 값을 갖는 $m(t)$ 에 -1 을 곱한 뒤 이를 $n(t)$ 라 정의한 후, 위상도분석을 위하여 노동과 자본을 costate variable ($n(t)$)로 변환하자. 식 (13)은 m 을 n 으로 대체하면 다음과 같다.

$$\dot{n} = n(\delta + \beta) + w'(Q) \quad (13)$$

식 (13)을 음함수형태⁵⁾로 표현하기 위하여 식 (8)과 식 (9)를 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M(n, k_1) = (\lambda_1 - n\alpha_1) \cdot f_1'(k_1)$$

$$M(n, k_2) = (\lambda_2 - n\alpha_2) \cdot f_2'(k_2)$$

$$\frac{dk_1}{dn} = -\frac{M_n}{M_{k_1}} = \frac{\alpha_1 f_1'(k_1)}{(\lambda_1 - n\alpha_1) \cdot f_1''(k_1)} < 0$$

$$\frac{dk_2}{dn} = -\frac{M_n}{M_{k_2}} = \frac{\alpha_2 \cdot f_1'(k_1) + f_2'(k_2)}{(\lambda_2 - n\alpha_2) \cdot f_2''(k_2)} < 0$$

그러므로 k_i 는 n 에 대하여 감소함수이다. 이는 다시 말하면 k_i 의 증가에 따라 오염물질이 증가하므로 그에 따른 기회비용이 증가함을 의미한다.

위상도분석을 위하여 먼저 $\dot{n}=0$ 의 모양을 살펴보자.

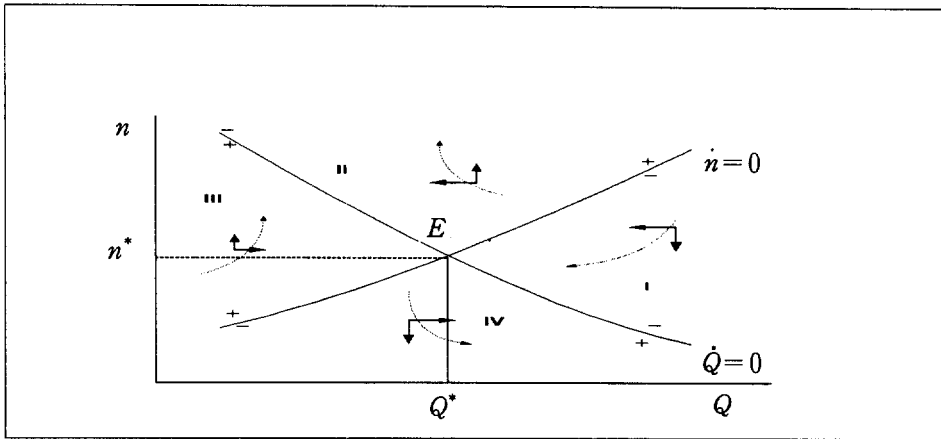
$$\left. \frac{dn}{dQ} \right|_{\dot{n}=0} = \frac{-w''(Q)}{\delta + \beta} > 0, \quad \because w''(Q) < 0 \text{ (음함수법칙의 이용)}$$

그러므로 $\dot{n}=0$ 는 우상향의 기울기를 가지고 있다. 한편, $\dot{Q}=0$ 의 경우는 다음과 같이 우하향의 기울기를 갖는다.

$$\left. \frac{dn}{dQ} \right|_{\dot{Q}=0} = -\frac{f_Q}{f_n} = \frac{\beta}{\alpha u_1 f_1'(k_1) + u_2 f_2'(k_2)} < 0, \text{ (음함수법칙의 이용)}$$

한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta < 0$ 에 의해 (+, 0, -)로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta > 0$ 에 의해 (-, 0, +)로 부호가 바뀐다. 이를 바탕으로 위상도를 그리면 다음과 같다. 일반적인 특성을 <그림 1>에서 보면 다음과 같다. 초기점이 영역 I에 위치하게 되면, 영역 I의 두화살표가 나타내고 있듯이 시간이 지남에 따라 남서쪽방향으로 움직임으로 인해 균형점으로 이동하지만, 다른 영역에서는 발산하는 모양을 보임으로

5) 노동장비율 변수를 음함수를 이용하여 costate변수인 $n(t)$ 로 변환한 것은 다음 절에서 필요한 위상도분석에서 1계차 및 2계차 미분의 부호판정을 위해서임.



〈그림 1〉

써 이 균형점을 이른바 안장점이라고 할 수 있다. 일반적으로 정태분석에서는 오염 한 단위를 줄이므로 얻는 비용과 편익함수를 구하여 사회적 한계편익과 한계비용이 일치하는 점에 환경세를 부과하면 초기점이 어디에 있든지 균형점에 수렴하게 된다는 것이다. 그러나 실제 정확한 비용과 편익함수를 구하기가 힘들고 환경세의 경직성 때문에 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 위상도를 통한 동태분석의 결과는 주어지는 조건에 따라 달라짐을 보여 줌으로써 이를 반증하고 있다.

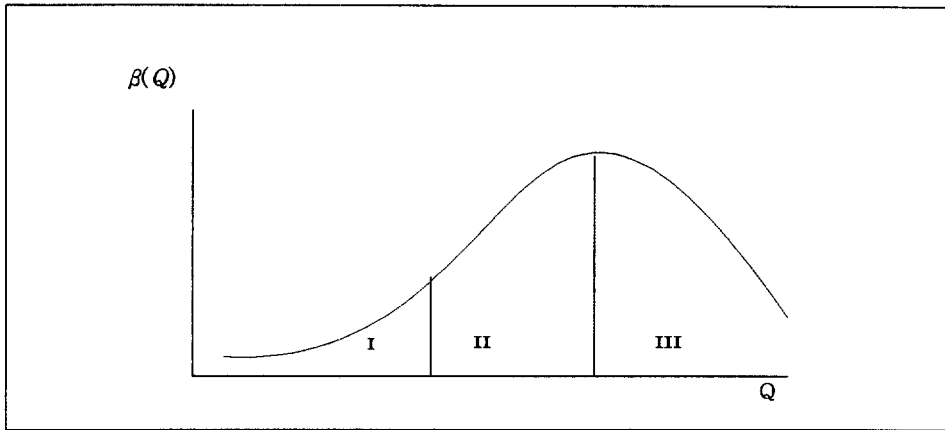
Ⅲ. 制約條件變化에 따른 比較分析

지금까지의 모델분석에서는 제품생산에 따라 일정량의 오염물질이 발생하고, 발생한 오염물질의 일정 부분이 자연감소되는 것으로 간주하였다.

〈제약조건완화 1〉 $\beta \cdot Q \rightarrow \beta(Q)$

여기서는 오염물질의 자연적감소(자정능력)는 발생하는 오염배출량에 달려 있다고 할 수 있다. 예를 들면, 수질오염물질의 발생량이 적을 때는 하천의 자정능력에 의하여 오염이 완전 해결되다가 오염물질의 양이 증가함에 따라 자정능력이 떨어지고 어느 일정 수준을 넘어서면 자정능력을 완전히 상실하게 되는 것이 일반적인 생태계의 법칙이다.⁶⁾

이러한 완화조건을 두 부문모델에 적용하면 위상도분석을 위한 equations of



〈그림 2〉 자정능력

motion은 다음과 같다.

$$\dot{n} = n(\delta + \beta'(Q)) + w'(Q) \quad (15)$$

$$\dot{Q} = \alpha_1 u_1 f_1(k_1) + \alpha_2 u_2 f_2(k_2) - \beta(Q) \quad (16)$$

위상도 분석을 위하여 먼저 $\dot{n} = 0$ 의 모양을 살펴보자.

$$\begin{aligned} \left. \frac{dn}{dQ} \right|_{\dot{n}=0} &= \frac{d}{dQ} \left(\frac{-w'(Q)}{\delta + \beta'(Q)} \right) \\ &= \frac{\{-w''(Q) \cdot (\delta + \beta'(Q))\} - \{-w'(Q) \cdot \beta''(Q)\}}{(\delta + \beta'(Q))^2} \\ &= \frac{w'(Q) \cdot \beta''(Q) - w''(Q) \cdot (\delta + \beta'(Q))}{(\delta + \beta'(Q))^2} \begin{matrix} \geq 0 \\ < 0 \end{matrix} \end{aligned}$$

다음은 $\dot{Q} = 0$ 의 기울기를 결정하기 위한 조건이다. 이 조건 또한 주어진 변수의 값에 따라 부호가 결정됨을 알 수 있다.

$$\left. \frac{dn}{dQ} \right|_{\dot{Q}=0} = -\frac{f_Q}{f_n} = \frac{\beta'(Q)}{\alpha_1 u_1 f_1'(k_1) + \alpha_2 u_2 f_2'(k_2) - \beta'(Q)} \begin{matrix} \geq 0 \\ < 0 \end{matrix}$$

위의 두 식의 부호를 판별하기 위하여 다음과 같은 시나리오하에서 살펴보자.

6) 여기서는 이론적인 분석을 위하여 가정한 상황이며, 실제 우리 나라 수질오염의 경우는 〈그림 2〉에서 보면 III 단계상황으로 볼 수 있다.

우선 $\beta(Q)$ 의 모양을 <그림 2>의 자정능력곡선에서 처럼 다음과 같이 3단계로 구분하여 보자.

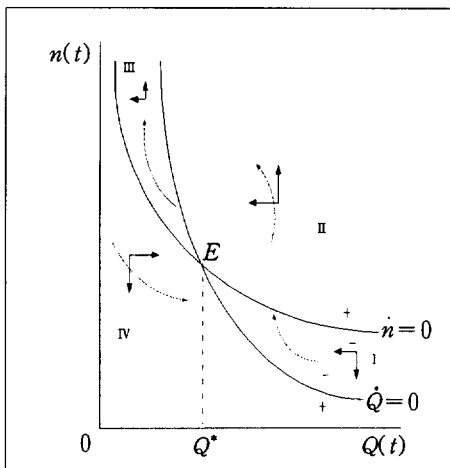
I 단계: $\beta'(Q) > 0, \beta''(Q) > 0$

II 단계: $\beta'(Q) > 0, \beta''(Q) < 0$

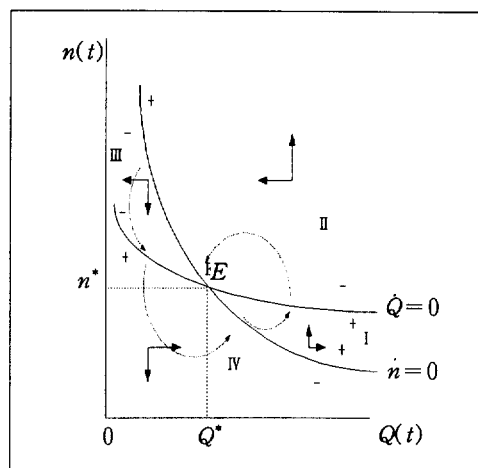
III 단계: $\beta'(Q) < 0, \beta''(Q) < 0$

<조건 1> I 단계하에서 절대값 $|w'(Q) \cdot \beta''(Q)| > |w''(Q) \cdot (\delta + \beta'(Q))|$ 이면 $\dot{n}=0$ 곡선은 우하향한다.

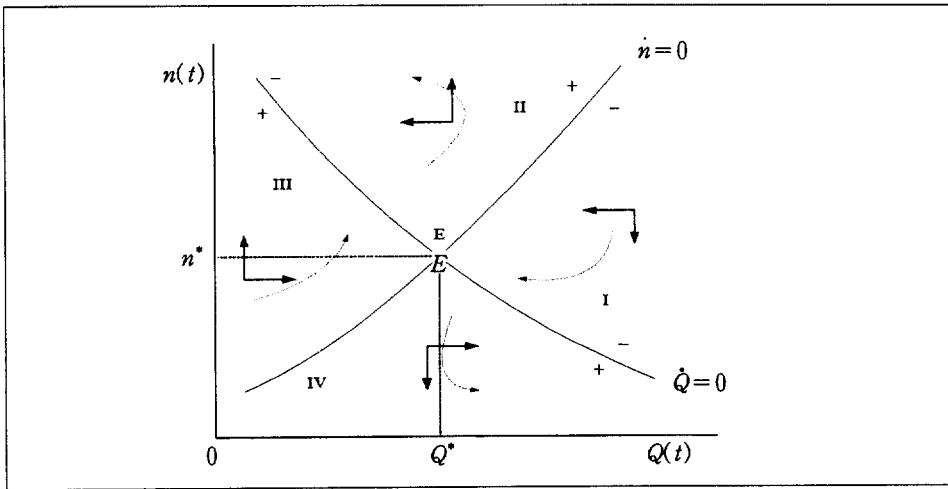
또한, $\dot{Q}=0$ 의 값은 마이너스의 값을 갖게 되어 $\dot{Q}=0$ 곡선도 우하향하게 된다. 한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta(Q) < 0$ 에 의해 (+, 0, -)로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta'(Q) > 0$ 에 의해 (-, 0, +)로 부호가 바뀐다. 여기서 $\dot{Q}=0$ 의 기울기가 더 가파르면 위상도는 <그림 3>과 같고, $\dot{n}=0$ 의 기울기가 더 가파르면 위상도는 <그림 4>와 같다. <그림 3>과 <그림 4>에서 보듯이 모델의 단순화를 위하여 제시된 제약조건의 완화는 전혀 새로운 위상도를 보이고 있다. 이는 기존의 논문에서 제시된 단순모델을 이용하여 일반화할 수 없음을 보여 주고 있다. 아래의 그림은 두 곡선의 기울기의 차이에 따라 위상도가 달라짐을 보이고 있다. <그림 3>은 균형이 매우 불안한 반면, <그림 4>는 균형의 유형에서 보면 초점(focus)은 선회하면서 순환적으로 안정적으로 향하는 형태(whirling trajectory)이다.



<그림 3>



<그림 4>



〈그림 5〉

〈조건 2〉 I 단계하에서 절대값 $|w'(Q) \cdot \beta''(Q)| < |w''(Q) \cdot (\delta + \beta'(Q))|$ 이면, $\dot{n}=0$ 곡선은 우상향한다.

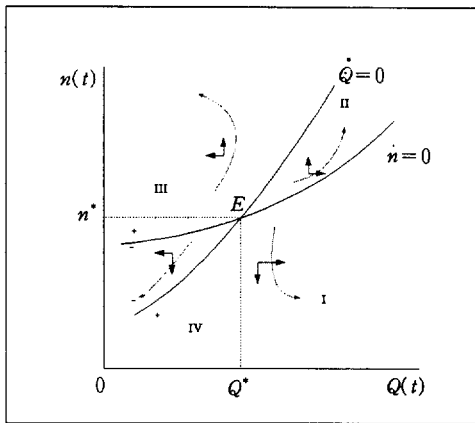
또한, $\dot{Q}=0$ 의 값은 마이너스의 값을 갖게 되어 $\dot{Q}=0$ 곡선도 우하향 하게 된다. 한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta(Q) < 0$ 에 의해 (+, 0, -)로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta'(Q) > 0$ 에 의해 (-, 0, +)로 부호가 바뀐다. 〈조건 2〉하에서의 위상도는 〈그림 5〉와 같다. I 사분면에서만 균형점 E로 접근하며 다른 영역에서 발산하는 형태를 보이고 있다.

〈조건 3〉 II 단계하에서는 $\dot{n}=0$ 곡선은 우상향한다.

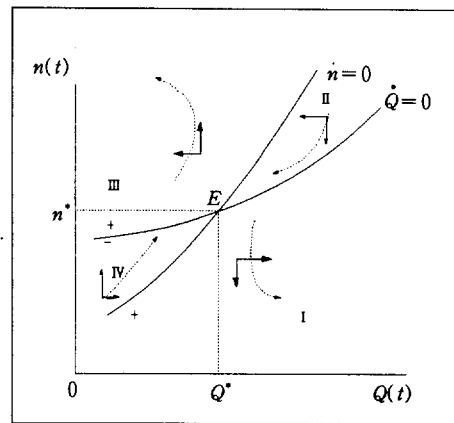
또한, $\dot{Q}=0$ 의 값은 마이너스의 값을 갖게 되어 $\dot{Q}=0$ 곡선도 우하향 하게 된다. 한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta(Q) < 0$ 에 의해 (+, 0, -)로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta'(Q) < 0$ 에 의해서 (-, 0, +)로 부호가 바뀐다. 그러므로 〈조건 3〉하에서의 위상도는 〈조건 2〉하에서의 위상도와 동일한 결과를 보여 준다.

〈조건 4〉 III 단계하에서 $(\delta + \beta'(Q)) > 0$ 이면, $\dot{n}=0$ 곡선은 우상향한다.

또한, $\dot{Q}=0$ 의 값은 마이너스의 값을 갖게 되어 $\dot{Q}=0$ 곡선도 우하향 하게 된다. 한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta(Q) < 0$ 에 의해 (-, 0, +)



〈그림 6〉



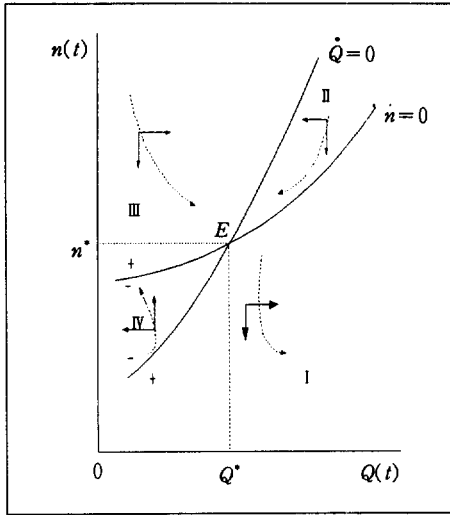
〈그림 7〉

로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta'(Q) > 0$ 에 의해서 $(-, 0, +)$ 로 부호가 바뀐다. 여기서 $\dot{Q}=0$ 의 기울기가 더 가파르면 위상도는 〈그림 6〉과 같고, $\dot{n}=0$ 의 기울기가 더 가파르면 위상도는 〈그림 7〉과 같다. 균형점 E 는 $\dot{n}=0$ 의 기울기가 더 가파를 경우 영역 II와 영역 IV에서는 장기적으로 균형점을 향하여 안정적이지만, $\dot{Q}=0$ 이 더 가파를 경우 모두 발산함으로 인해 균형점이 매우 불안함을 알 수 있다.

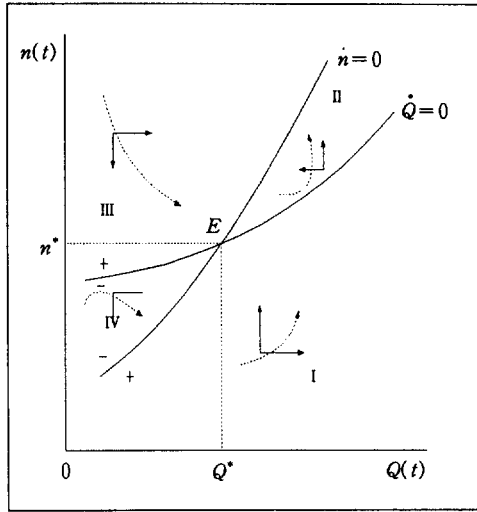
〈조건 5〉 III 단계하에서 $(\delta + \beta'(Q)) < 0$ 이고, 절대값 $|w'(Q) \cdot \beta'(Q)| > |w''(Q) \cdot (\delta + \beta'(Q))|$ 이면, $\dot{n}=0$ 곡선은 우상향한다.

또한, $\dot{Q}=0$ 의 값은 마이너스의 값을 갖는다. 그러므로 $\dot{Q}=0$ 곡선도 우하향하게 된다. 한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta(Q) > 0$ 에 의해서 $(-, 0, +)$ 로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta'(Q) > 0$ 에 의해서 $(+, 0, -)$ 로 부호가 바뀐다. 여기서 $\dot{Q}=0$ 의 기울기가 더 가파르면 위상도는 〈그림 6〉과 같고, $\dot{n}=0$ 의 기울기가 더 가파르면 위상도는 〈그림 7〉과 같다. 균형점 E 는 $\dot{Q}=0$ 의 기울기가 더 가파를 경우 영역 II와 영역 III에서는 장기적으로 균형점을 향하여 안정적이지만, $\dot{n}=0$ 이 더 가파를 경우 영역 III을 제외하고 모두 발산하는 형태이다.

〈조건 6〉 III 단계하에서 $(\delta + \beta'(Q)) < 0$ 이고 절대값 $|w'(Q) \cdot \beta'(Q)| < |w''(Q) \cdot (\delta + \beta'(Q))|$ 이면, $\dot{n}=0$ 곡선은 우하향한다.



〈그림 8〉



〈그림 9〉

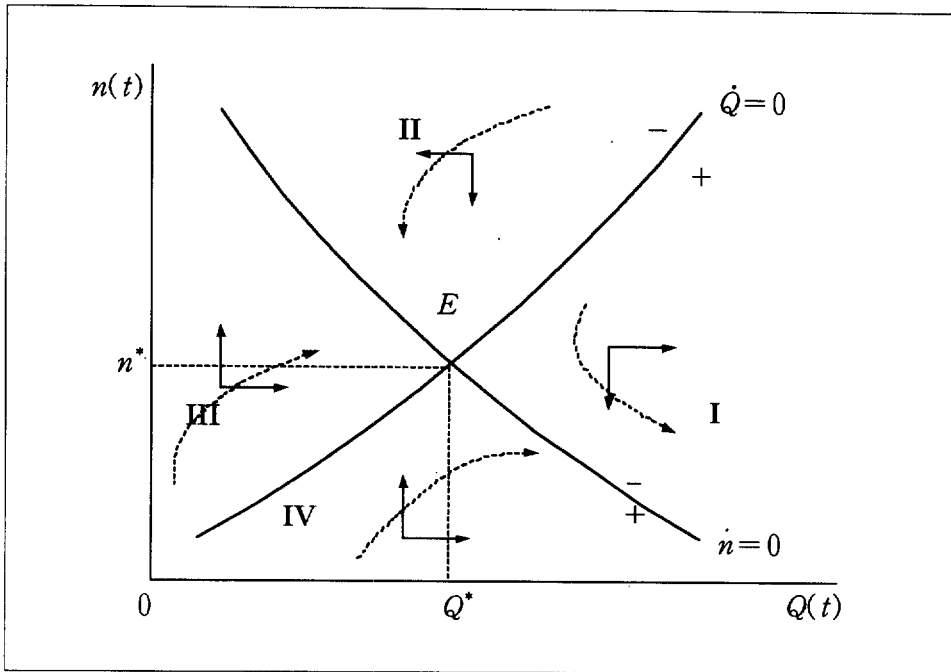
또한, $\dot{Q}=0$ 의 값은 양의 값을 갖게 되어 $\dot{Q}=0$ 곡선은 우상향하게 된다. 한편, $\dot{Q}=0$ 곡선의 좌우측에서 부호는 $\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} = -\beta(Q) > 0$ 에 의해서 분계선을 중심으로 $(-, 0, +)$ 로 부호가 바뀌고, $\dot{n}=0$ 곡선의 상·하측의 부호는 $\frac{\partial \dot{n}}{\partial n} = \delta + \beta'(Q) < 0$ 에 의해서 분계선을 중심으로 $(+, 0, -)$ 로 부호가 바뀐다.

〈조건 6〉하에서의 위상도는 〈그림 10〉과 같다.

〈제약조건완화 2〉: 생산량의 일정 수준(α_i)이 오염물질로 발생한다는 가정을 완화하여 기술수준의 발달, 오염저감형 투입원료의 사용 등으로 인하여 시간이 경과함에 따라 오염물질의 발생량이 줄어들 경우

위의 제약조건의 완화는 국내·외적으로 환경오염규제의 강화로 인하여, 오염저감형 원료의 사용이나 기술수준의 발달로 일정한 생산량하에서 시간의 경과에 따라 오염물질의 발생량이 줄어들고 줄어드는 속도는 느려진다고 가정할 수 있다. ----> $\frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} < 0, \frac{\partial^2 \alpha(t)}{\partial t^2} > 0$

이런 가정하에서 〈그림 11〉은 위상도를 상정할 경우, $\dot{Q}=0$ 의 경계선이 좌측으로 이동하게 되어 최적점은 (Q^*, n^*) 에서 (Q^{**}, n^{**}) 으로 변화되는 것이다. 이 경우 실선으로 표시된 $\dot{Q}=0$ 분계선과 점선으로 표시된 $\dot{Q}=0$ 분계선 사이에



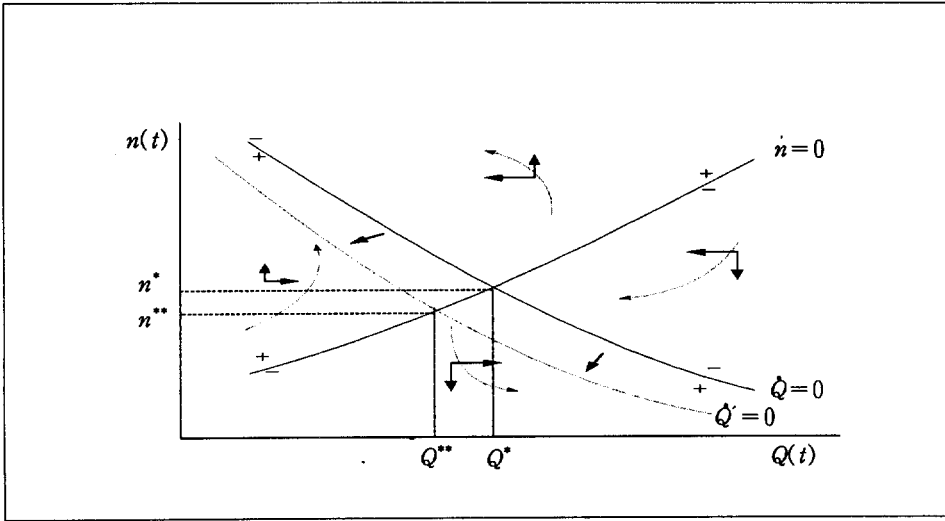
〈그림 10〉

서는 분계선의 이동으로 인하여 위상도의 방향이 바뀔 수 있다는 것을 보여 주고 있다.

이상의 동태분석에서 보듯이 초기점이 균형에서 벗어나 있다면, 일반균형모형 속에서 존재하는 여러 힘에 의해 새로운 균형의 위치로 향해 움직이는가를 살펴 보았다. 위에서 분석한 결과는 두 분계곡선의 기울기와 분계선의 부호가 시간의 변화에 따라 어떻게 변하는가에 따라 초기점으로부터 균형점으로 움직이는 것이 아니라 계속 멀어져 가는 불안정한 결절점(node)의 형태, 어떤 영역에서는 안정적으로 움직이고 어떤 영역에서는 발산하는 안장점의 형태, 그리고 순환하면서 균형점을 향하여 수렴하는 초점(focus)형태 등의 다양한 유형을 보이고 있다.

IV. 政策的 示唆點 및 結論

정태적인 모델분석은 사회적 한계비용과 오염원 한 단위를 줄임으로써 발생하는 한계편익이 일치하는 점에서 적정환경세의 부과에 사회적 적정오염수준을 결정할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 본 연구는 정태적인 분석이 아니라 두 부



〈그림 11〉

문 일반균형모형 속에서의 동태분석을 통하여 균형의 안정성을 살펴보았다. 여기서 우리는 이론적으로 크게 두 가지의 중요한 점을 발견할 수 있었다.

첫째는, 정확한 한계비용과 편익을 추정하거나 정보를 획득하는 것이 현실적으로 불가능한 상황에서 시행착오를 통한 적정환경세의 부과가 정태분석에서 처럼 항상 안정적인 균형점에 도달한다는 보장이 없다는 것이다. 예를 들면, 〈그림 1〉에서 초기 균형이 E점이 아닌 영역 I의 어느 점에 있을 경우는 동태적으로 균형점 E로 수렴하지만, 영역 II상에서는 동태적으로 발산하게 됨을 보여 주고 있다.

둘째는, 기존의 동태적 연구에서 보여 준 환경오염에 대한 단순한 가정들을 완화할 경우 그에 따른 위상도는 매우 복잡하고 다양한 결과를 보여 준다는 것이다. 즉, 현실적으로 단순한 정태분석결과를 이용한 환경정책으로는 적정환경 오염수준을 달성할 수 있을 가능성이 매우 희박하다는 것이다.

따라서 본 연구의 결과는 적정환경 오염수준을 달성하기 위하여는 개별오염원에 대한 정보가 불확실하고 지역적으로 오염수준이 심각한 지역에 대해서는 보다 탄력적이고 시장접근적인 오염거래권과 같은 접근이 장기적으로 보다 바람직하다는 것이다. 특히 오염거래제도는 uniformly mixed pollutants나 오존문제, 지구온난화에 따른 CO₂, 특정 수계별 수질오염방지를 위한 수단으로 사용될 수 있다. 오염거래권 도입에 따른 가장 큰 문제는 거래비용(transaction cost)과 초기 할당(allocation)문제이다.⁷⁾ 현재 미국에서는 Clean Air Act에 보다 신축성을 부

여하기 위하여 EPA는 “Emission Reduction Credit”을 도입하고 있다.⁸⁾ 예를 들면, 위스콘신주는 Fox River의 점오염원규제를 위하여 배출거래허가시장제(tradeable effluent permit market)를 도입하였고 그 결과 약 700만 달러의 비용을 절감했다는 사례를 비롯하여, Colorado의 Dillon Reservoir와 Cherry Creek Reservoir 그리고 North Carolina의 Tar-Pamlico Basin 등에서 점오염원 및 비점오염원의 규제를 위하여 이 제도를 도입하고 있다(Callan and Thomas, 1996).⁹⁾

최근 선진국들 사이에서 급속히 확산되고 있고 기후변화협약에서 범지구적인 배출권거래제도 도입에 대한 움직임이 있는 것을 감안할 때, 우리 나라에서도 특정한 지역이나 특정 오염물질의 규제에 대하여는 보다 시장접근적인 방법인 배출거래제도를 도입할 필요성이 있다고 할 수 있겠다.

參 考 文 獻

1. Baumol, William J. and Wallace E. Oates, *The Theory of Environmental Policy*, 2nd, Cambridge, 1988.
2. Callan, Scott J. and Janet M. Thomas, *Environmental Economics and Management, Theory, Policy, and Applications*, Chicago: Irwin, 1996.
3. Chiang, Alpha. C., *Elements of Dynamic Optimization*, New York: Mc. Graw-Hill, Inc., 1992.
4. _____, *Fundamental Methods of Mathematical Economics*, New York: Mc. Graw-Hill, Inc., 1984.
5. Comolli, Paul M., “Pollution Control in a Simplified General Equilibrium Model with Production Externalities”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 4, 1977, pp.289-304.

7) 거래비용이 매우 높을 경우에는 오염거래권보다 배출부과금제도가 효율적일 수 있다. 또한 오염원이 소규모이고 그 숫자가 많을 때는 새로운 오염방지시설의 채택률을 높이거나 환경친화적 프로젝트에 필요한 예산확보에도 배출부과금제도가 효율적일 수도 있다.

8) Baumol and Oates(1988), Callan and Thomas(1996), Tietenberg(1985) 등에 tradable pollution permit system의 여러 가지 대안, 즉 the offset, bubble, emission banking, netting system의 이론적 장·단점에 대하여 자세히 언급하고 있다.

9) 비록 부분적으로 외국의 사례가 있지만, 아직 어떤 연구도 체계적으로 관련 정보를 수집하여 종합적으로 분석한 예는 없는 것으로 판단된다.

6. Forster, Bruce A., "Optimal Consumption Planning in a Polluted Environment", *Economic Record*, Vol. 49, 1972, pp.534-545.
7. _____, "Pollution Control in a Two-sector Dynamic General Equilibrium Model", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 4, 1977, pp.305-312.
8. _____, "Optimal Energy Use in a Polluted Environment", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.7, 1980, pp.321-333.
9. Kamien, Morton I. and Nancy L. Schwartz, *Dynamic Optimization: The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management*, 2nd ed., Amsterdam: North-Holland. 1991.
10. Keeler, E., M. Spence, and R. Zeckhauser, "The optimal control of pollution", *Economic Theory*, Vol 4, 1972, pp.19-34.
11. Plourde, C. G., "A Model of Waste Accumulation and Disposal", *Canadian Journal of Economics* 5, 1972, pp.119-125.
12. _____ and D. Yeung, "A Model of Industrial Pollution in a Stochastic Environment", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.16, 1989, pp.97-105.
13. Silberberg, Eugene, *The Structure of Economics: A Mathematical Analysis*, 2nd ed., New York: Mc. Graw-Hill, Inc., 1990.
14. Smith, Vernon L., "Dynamic of Waste Accumulation: Disposal versus Recycling", *Quarterly Journal of Economics* 76, 1972, pp.600-616.
15. Spence, E., M. Keeler, and R. Zeckhauser, "The Optimal Control of Pollution", *Economic Theory*, Vol. 4, 1972, pp. 19-34.
16. Tietenberg, T.H., *Emissions Trading: An Exercise in Reforming Pollution Policy*, Washington, D.C.: Resources for the Future, 1985.
17. Xepapadeas, A., "Environmental Policy Design and Dynamic Non-point-source Pollution", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.23, 1992, pp.22-39.