

내생적 성장모형을 이용한 탄소세와 에너지세의 파급효과 분석

정인섭* · 이지웅**†

*부경대학교 경제사회연구소 전임연구원, **부경대학교 경제학부 부교수

Macroeconomic Effects of Carbon and Energy Taxes in an Endogenous Growth Model

Chung, Insup* and Lee, Jiwoong**†

*Researcher, Economic and Social Research Institute, Pukyong National University, Busan, Korea

**Associate Professor, Department of Economics, Pukyong National University, Busan, Korea

ABSTRACT

This paper analyzes the macroeconomic effects of carbon and energy taxes using an R&D-based endogenous growth model that includes carbon reduction technology. We compare a scenario in which a government develops carbon reduction technology with one in which a private firm is in charge. We find that an energy tax is more effective when a government develops carbon reduction technology, while a carbon tax is better when a private firm develops reduction technology. In addition, degree of carbon emission elasticity causes the difference between the scenarios. Even in an economy with only a carbon tax, the degree of carbon emission elasticity greatly influences the economic growth rate and social welfare. This finding implies that policy design should consider carbon emission elasticity if carbon and energy taxes are introduced simultaneously.

Key words: Endogenous Growth Model, Carbon Tax, Energy Tax

1. 서론

최근 전 세계적으로 탄소배출에 따른 기후변화 문제가 심각해짐에 따라 지속가능한 경제에 대한 관심이 높아지고 있다. 지속가능한 경제를 달성하기 위해서는 탄소세(환경세) 도입과 같은 환경규제 강화가 불가피한데 이는 경제성장을 저해시킬 수 있다. 하지만 다른 측면에서 살펴보면 탄소감축기술(이하 감축기술) 개발 등을 통해 새로운 일자리를 창출시킬 수 있으며, 조세 체계의 효율성을 향상시킴¹⁾에 따라 경제성장을 도모할 가능성도 존재한다. 우리나라는 2010년 『국가 CCS (Carbon Capture and Storage) 종합 추진계획』 수립 이후 CCU (Carbon Capture and Utilization) 및 CCS와

관련된 기술개발 전략과 프로그램을 도출하여 운영 중이며, 적극적인 기술 개발 투자를 통한 상용화를 추진 중이다(KIER, 2021). 또 글로벌 CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) 시장도 앞으로 크게 성장할 것으로 예측된다.²⁾ 이러한 추세를 고려하면 감축기술과 환경규제를 모두 고려한 연구는 지속적으로 이루어질 것으로 판단된다.

내생적 성장모형은 경제성장과 환경규제 간의 관계를 분석하는데 자주 활용된다. 이러한 연구들은 전통적인 내생적 성장모형에 환경부문을 추가하고, R&D 부문을 감축기술(혹은 감축지식)과 연계시켜 분석하며, 기존 모형을 확장하면서 시사점을 도출하고 있다. 내생적 성장모형을 이용해 경제성장과 환경규제 간의 관계를 연구한 대표적인 논문으로 Bovenberg and Smulders (1995)가 있

†Corresponding author : j.lee@pknu.ac.kr (Pukyong National University, Yongsong-ro 45, Nam-gu, Busan 48513, Korea. Tel. +82-51-629-5321) ORCID 정인섭 0000-0003-3421-2848 이지웅 0000-0003-2592-9492

Received: February 21, 2023 / Revised: March 3, 2023 1st, March 16, 2023 2nd / Accepted: March 27, 2023

1) 탄소세 도입에 따른 조세체계의 효율성과 관련하여 Parry (1995), Goulder (1995), Hettich (1998), Fullerton and Kim (2008), Kang and Hong (2008) 등에서 논의된 바 있다.

2) Market and Markets (2020)는 2020~2025년 사이 연평균 17% 성장을 예측한 바 있다(KIER, 2021).

다. Bovenberg and Smulders (1995)는 최종소비재와 감축기술을 개발하는 R&D 부문으로 구성된 내생적 성장 모형을 이용해 탄소 배출탄력성(이하, 배출탄력성)³⁾이 1일 경우 감축기술 개발을 위해서는 탄소세 수입을 통한 투자로 충분하다고 분석한 바 있다. 하지만 Fullerton and Kim (2008)은 배출탄력성이 1이 아닌 경우를 적용함에 따라 이러한 결론이 바뀔 수 있음을 보이며 배출탄력성의 중요성을 강조한 바 있다. 배출탄력성이 1보다 클 경우 탄소세 수입을 통해 최적의 감축기술개발을 달성할 수 없는 경우가 발생하며, 감축기술 개발 이외의 추가적인 정부지출이 존재할 경우 이러한 가능성이 더 크게 나타난다고 주장하였다. Bovenberg and Smulders (1995)와 Fullerton and Kim (2008)을 비롯한 기존 연구들은 대부분 사회후생을 극대화 시키는 경제모형을 이용하였고, 조세체계의 효율성에 대해 논의한다. 하지만 현실에서는 항상 사회후생을 극대화시키는 정책을 추진하기는 어려우므로 시나리오 간의 분석도 필요하다.

시나리오 간의 분석을 한 연구로는 Chu and Lai (2014)가 있는데 Fullerton and Kim (2008)의 연구 결과를 고려해 정부지출을 반영하고, 1보다 큰 배출탄력성을 적용해 분석한 바 있다. 이 연구는 기업부문을 3개로 확장하였으며, 중간재 기업의 독점력이 반영된 모형을 이용해 3개의 시나리오를 분석하였다. 분석결과 감축기술을 민간 기업에서 담당하고 R&D 부문에 보조금을 지급하는 시나리오에서 가장 높은 경제성장률과 사회후생이 달성되는 것으로 나타났고, 이러한 시나리오 하에서 일정 수준의 독점력이 필요하다고 주장한 바 있다.

본 연구는 Chu and Lai (2014)의 모형과 시나리오를 확장하여 에너지세를 추가로 고려한다. 우리나라는 지난 2020년 탄소중립을 선언한 바 있고, 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년 대비 40% 감축이라는 온실가스 감축 목표도 2021년에 발표한 바 있으며, 이를 달성하기 위해 탄소세 도입 논의는 지속될 것으로 보인다. Kang et al. (2015)은 우리나라 에너지세(교통·에너지·환경세)가 석유류를 중심으로 운영되어 탄소배출이 많은 석탄과 전력 부문에 대한 과세가 제대로 이루어지지 않는다고 주장한 바 있다. 또 OECD (2017)도 탄소배출이 많은 경우보다 휘발유 소비에 대해 높은 세율을 부과하여 탄소 감축에 대해 효율적이지 않다고 주장하였다. 이러한 에너지세의 비효

율성으로 인해 2022년 에너지세의 폐지가 예정되어 있었으나 결국 2024년까지 연장되었다.⁴⁾ 한편 Yu (2021)는 과거 우리나라 배출권거래제의 탄소 감축 실적에 비추어 배출권거래제만으로는 감축목표 달성이 어렵다고 주장하며 탄소세 도입 방안을 논의한 바 있다. 이러한 추세를 감안하면 에너지세를 탄소세와 함께 분석에 포함시켜야 할 필요가 있다. 또 앞서 언급한 바와 같이 감축기술 개발의 중요성은 앞으로 증가할 것으로 예상되므로 본 연구는 탄소세, 에너지세, 감축기술을 모두 포함시킨 모형을 바탕으로 분석을 수행하였다.

분석 결과 배출탄력성이 1보다 큰 상황에서 감축기술을 정부에서 개발할 경우 에너지세를 통한 탄소 감축비중이 커질수록(에너지세율이 증가할수록) 경제 성장률과 사회후생이 증가하는 반면, 감축기술을 민간 기업에서 개발할 경우에는 상반된 결과가 도출되었다. 또 탄소배출이 일정한 상황에서 배출탄력성이 커지는 경제도 살펴보았는데 정부에서 감축기술을 개발할 경우 배출탄력성이 커질수록 경제성장률과 사회후생이 감소하는 반면, 민간 기업에서 감축기술을 개발할 경우에는 배출탄력성과 비례해 경제성장률과 사회후생이 증가하는 것으로 나타났다. 한편 민간 기업에서 감축기술을 개발하더라도 보조금을 지급받을 경우 에너지세를 통한 탄소 감축비중과 배출탄력성 크기와 관계없이 경제성장률과 사회후생이 일정한 값으로 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 배출탄력성 크기에 따른 세수입 차이에 기인하는데 구체적인 내용은 3장에서 설명하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구의 모형을 소개한다. 3장에서는 에너지세 비중 및 배출탄력성에 따른 시나리오별 경제성장률과 사회후생을 분석한다. 그리고 4장에서는 정책적 시사점과 함께 결론짓는다.

2. 모형

본 연구는 Chu and Lai (2014)의 모형에 에너지세를 추가하였다. 또 탄소세와 에너지세 도입에 따른 파급효과 분석을 위해 동일한 탄소를 감축할 경우 탄소세와 에너지세를 통한 탄소 감축 비중(이하 에너지세 비중)을 달리하고 분석하였다. 시나리오도 Chu and Lai (2014)와 같이 3개의 시나리오 — GA (Government Abatement), PA (Private

3) 본 논문에서 배출탄력성은 에너지 소비가 1% 변화할 경우 탄소배출량 변화율을 의미한다.

4) 현재에는 휘발유는 리터당 475원, 경유는 리터당 340원의 에너지세를 부과하고 있다.

Abatement without tax recycling), PAR (Private Abatement with tax Recycling) — 를 고려하였다. GA 시나리오는 정부에서 감축기술을 개발하는 시나리오이므로 별도의 R&D 기업이 존재하지 않고 감축기술은 공공재의 성격을 지닌다. 반면 PA, PAR 시나리오는 별도의 R&D 기업이 감축기술을 개발하고 이를 탄소를 배출하는 중간재 생산 기업에게 판매하는 시나리오이다. 두 시나리오의 차이는 보조금 지급 여부에 달려 있는데, PA 시나리오에서는 R&D 기업에게 보조금을 지급하지 않는 반면, PAR 시나리오에서는 노동 비용의 일부를 보조금으로 지급하는 것으로 가정한다. 각 시나리오별 가정에 따라 정부의 예산 제약식과 R&D 기업의 이윤극대화 문제가 달라지는데 구체적인 내용은 본 장의 3절에서 설명하였다.

2.1. 최종소비재 생산기업

최종소비재 생산기업은 완전경쟁시장 하에서 최종소비재를 생산하며, Dixit and Stiglitz (1977)를 따라 생산함수를 다음과 같이 가정한다.

$$Y = \left[\int_0^1 y_i^{1-\theta} di \right]^{1/(1-\theta)}, \theta \in [0, 1) \tag{Eq.1}$$

(Eq.1)에서 Y 는 최종소비재, y 는 중간재, θ 는 중간재 생산기업의 독점력을 나타내는 모수이다. $\theta = 0$ 일 경우 중간재 생산 시장은 완전경쟁시장이 되지만, $0 < \theta < 1$ 이면 중간재 생산기업은 일정 수준의 독점력을 지니게 된다. (Eq.1)을 이용해 최종소비재 생산기업의 이윤극대화 문제를 표현하면 다음과 같다.

$$Max \pi_Y = Y - \int_0^1 q_i y_i di \tag{Eq.2}$$

s.t.

$$Y = \left[\int_0^1 y_i^{1-\theta} di \right]^{1/(1-\theta)}, \theta \in [0, 1) \tag{Eq.3}$$

(Eq.2)에서 q_i 는 i 번째 중간재 생산기업이 생산하는 중간재의 가격(최종소비재 대비)이다. 그리고 최종소비재 생산기업의 이윤극대화 문제를 풀면 (Eq.4)를 도출할 수 있다.

$$y_i = (q_i)^{-(1/\theta)} Y \tag{Eq.4}$$

(Eq.4)는 i 번째 중간재의 수요함수를 의미하고 $1/\theta$ 가 가격탄력성이 된다. $\theta = 0$ 일 경우 가격탄력성이 무한대가

되기 때문에 완전경쟁시장이 되지만, $0 < \theta < 1$ 일 경우 그렇지 않기 때문에 중간재 생산기업은 일정수준의 독점력을 지니게 된다.

2.2. 중간재 생산기업 및 환경부문

중간재 생산기업은 무수히 많이 존재하고, 각 기업은 자본(k), 노동(l_y), 에너지(e)를 투입하여 중간재를 생산하며, 이윤극대화 문제를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Max \pi_i = q_i y_i - r k_i - (1 + \tau_e) m e_i - w l_{yi} - \tau_p p_i \tag{Eq.5}$$

s.t.

$$p_i = \left(\frac{e_i}{H} \right)^\epsilon \tag{Eq.6}$$

$$y_i = N^\gamma k_i^\alpha e_i^{1-\alpha} l_{yi}^\beta \tag{Eq.7}$$

$$y_i = (q_i)^{-(1/\theta)} Y \tag{Eq.8}$$

(Eq.5)에서 r 는 자본임대료, m 은 에너지가격, w 는 임금을 의미한다. 또 τ_e 와 τ_p 는 각각 에너지세율과 탄소세율이다. 예산제약식 중 (Eq.6)은 탄소 배출량(p)를 결정짓는 배출함수이다. 이 함수에서 H 는 감축기술, ϵ 는 배출탄력성을 의미한다. 이 함수에 따라 에너지소비가 증가할수록 탄소 배출량은 증가하지만, 감축기술이 증가함에 따라 이를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. (Eq.7)은 중간재 생산함수를 보여주는데 일반적인 생산함수와 다르게 환경의 질(N)을 통해서도 생산량이 변할 수 있음을 알 수 있으며, γ 는 환경이 생산성에 영향을 미치는 수준을 결정짓는 모수이다. 마지막으로 (Eq.8)은 앞서 도출한 중간재 수요함수이다. (Eq.9)~(Eq.11)은 (Eq.5)~(Eq.8)을 이용해 도출한 1계 미분조건이며, 이는 자본, 노동, 탄소의 한계비용이 한계편익과 같아지는 지점에서 투입량이 결정된다는 이윤극대화 조건을 의미한다.

$$(1 - \theta) q_i \alpha \frac{y_i}{k_i} = r \tag{Eq.9}$$

$$(1 - \theta) q_i \beta \frac{y_i}{l_{yi}} = w \tag{Eq.10}$$

$$(1 - \theta) q_i (1 - \alpha) (1/\epsilon) \frac{y_i}{p_i} = \tau_p + (1 + \tau_e) m (1/\epsilon) H p_i^{1/\epsilon - 1} \tag{Eq.11}$$

대칭균형(symmetric equilibrium)을 가정하여 모든 중간재 기업들의 행태가 동일하다고 가정하면 (Eq.12)와 (Eq.13)이 성립한다.

$$k_i = k, e_i = e, l_{yi} = l_y, p_i = p, \pi_i = \pi, y_i = y, q_i = q \quad (\text{Eq.12})$$

$$Y = \left[\int_0^1 y_i^{1-\theta} di \right]^{1/(1-\theta)} = y \quad (\text{Eq.13})$$

또 최종소비재 생산기업은 완전경쟁시장을 가정하였으므로 (Eq.14)에 따라 $q=1$ 임을 알 수 있고, K, E, L_Y, P 를 각각 k_i, e_i, l_{yi}, p_i 의 집계된 변수라고 정의하면 (Eq.15)가 성립한다.

$$\pi_Y = Y - \int_0^1 q_i y_i di = y - qy = (1-q)y = 0 \quad (\text{Eq.14})$$

$$K = \int_0^1 k_i di = k, E = \int_0^1 e_i di = e, L_Y = \int_0^1 l_{yi} di = l_y,$$

$$P = \int_0^1 p_i di = p \quad (\text{Eq.15})$$

한편 환경의 질 N 의 동학은 Tahvonon and Kuuluvainen (1991), Fullerton and Kim (2008), Chu and Lai (2014) 등에서와 마찬가지로 (Eq.16)에 의해 결정된다고 가정한다.⁵⁾

$$\dot{N} = bN(1-N) - P \quad (\text{Eq.16})$$

(Eq.16)에서 $bN(1-N)$ 의 값에 따라 환경 질의 재생능력이 결정되며, b 는 재생능력을 결정짓는 모수이다. N 의 값이 작을 경우 이 수치가 증가함에 따라 재생능력도 함께 증가하지만, 특정 값보다 커지면 재생능력은 점차 감소하게 된다.

이상의 내용을 토대로 균형조건을 Table 1과 같이 정리할 수 있다. 본 논문은 Chu and Lai (2014)와 동일하게 3개의 시나리오를 고려하였는데 Table 1은 모든 시나리오에 적용되는 조건이다.

Table 1. Equilibrium conditions for all scenarios

① $(1-\theta)\alpha \frac{Y}{K} = r$	② $(1-\theta)\beta \frac{Y}{L_Y} = w$
③ $Y = N^\gamma K^\alpha E^{1-\alpha} L_y^\beta$	④ $P = \left(\frac{E}{H} \right)^\epsilon$
⑤ $\dot{N} = bN(1-N) - P$	
⑥ $(1-\theta)(1-\alpha)(1/\epsilon)Y = \tau_P P + (1+\tau_e)m(1/\epsilon)HP^{1/\epsilon}$	
⑦ $\pi = Y - rK - (1+\tau_e)mE - wL_Y - \tau_P P$	

2.3. R&D 및 정부부문

R&D 기업은 감축기술을 개발하며, 감축기술의 동학식은 모든 시나리오에서 (Eq.17)과 같다.

$$\dot{H} = \delta L_H H \quad (\text{Eq.17})$$

(Eq.17)에서 L_H 는 R&D 부문에 투입되는 노동량을, δ 는 R&D 부문의 생산성 모수를 의미한다. 전체 노동량 \bar{L} 은 R&D 부문과 중간재 생산부문에 투입된다고 가정하므로 모든 시나리오에서 (Eq.18)이 성립한다. 모든 노동은 동질적이고 부문 간 이동이 자유롭다고 가정한다.

$$\bar{L} = L_Y + L_H \quad (\text{Eq.18})$$

감축기술을 민간 기업에서 담당할 경우 전통적인 내생적 성장모형에서와 마찬가지로 새로운 감축 기술을 개발한 R&D 기업은 이에 대한 독점권을 획득하여 중간재 생산기업의 모든 이윤을 획득한다고 가정하여 PA 및 PAR 시나리오에서 (Eq.19)가 성립한다. (Eq.19)에서 q_H 는 새롭게 개발된 감축 기술에 대한 가격을 의미한다.

$$q_H \dot{H} = \int_0^1 \pi_i di = \pi \quad (\text{Eq.19})$$

또 R&D 기업은 진입과 퇴출이 자유로워 0의 이윤을 취하게 된다. 그리고 매 시점 최신의 감축기술이 개발되며, 모든 중간재 기업은 이를 구매해야 한다. 이러한 가정은 정부가 최신 감축기술의 구매를 강요한다는 가정을 추가함으로써 정당화될 수 있다.

5) 위에 점이 표시된 변수는 시간 변화에 따른 변화량을 의미한다.

2.3.1. GA 시나리오

앞서 언급하였듯이 각 시나리오별 가정에 따라 정부의 예산제약식이 달라진다. 먼저 GA 시나리오에서는 감축 기술을 정부에서 담당하므로 예산 제약식을 (Eq.20)과 같이 표현할 수 있다. (Eq.20)에서 G 는 가계로 이전되는 정부지출이고 $q_H \dot{H}$ 는 감축기술 개발을 위해 지출하는 비용이며 τ_K 는 자본세율이다.

$$G + q_H \dot{H} = \tau_K r K + \tau_p P + \tau_e m E \quad (\text{Eq.20})$$

(Eq.20)을 통해 알 수 있듯이 자본세, 탄소세, 에너지세를 통해 징수된 세수입은 이전지출과 감축기술 개발을 위해 활용된다. 감축기술은 노동 L_H 을 투입해 생산되므로 R&D 부분의 이윤극대화 문제는 (Eq.21)과 같이 표현된다. (Eq.17)과 (Eq.21)을 이용해 1계 미분조건을 (Eq.22)와 같이 표현할 수 있다. 그리고 (Eq.10)과 (Eq.22)를 통해 임금 w 를 매개로 노동의 한계생산이 같아지는 수준에서 부문 간 노동 이동이 발생함을 알 수 있다.

$$\text{Max } \pi_H : q_H \dot{H} - w L_H \quad (\text{Eq.21})$$

$$q_H \frac{\partial \dot{H}}{\partial L_H} = q_H \delta H = w \quad (\text{Eq.22})$$

2.3.2. PA 시나리오

PA 시나리오는 감축 기술을 보조금 지급 없이 민간 기업에서 개발하고 세수입이 모두 가계로 이전되는 시나리오이다. 따라서 정부의 예산 제약식은 (Eq.23)과 같이 표현할 수 있고, R&D 기업의 목적함수는 GA 시나리오와 동일하다. (Eq.24)는 (Eq.19)와 R&D 기업의 1계 미분조건을 기반으로 다른 균형조건을 이용해 도출할 수 있다.

$$G = \tau_K r K + \tau_p P + \tau_e m E \quad (\text{Eq.23})$$

$$\frac{\dot{H}}{H} = \frac{\delta[1 - (1 - \theta)(\alpha + \beta) - (1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)]}{(1 - \theta)\beta} \quad (\text{Eq.24})$$

$$L_y - \frac{\delta(1 - \epsilon)(1 + \tau_e)m(H/K)P^{1/\epsilon}}{w/K}$$

2.3.3. PAR 시나리오

PAR 시나리오는 PA 시나리오와 마찬가지로 감축 기술 개발을 민간 기업에서 담당하고 R&D 기업은 정부로부터 보조금을 지급받게 된다. 보조금은 기술 개발을 위해 투입하는 노동 비용의 일정 비율을 지급한다고 가정하여, R&D 기업의 이윤 극대화 문제와 정부 예산제약식을 (Eq.25)~(Eq.26)과 같이 표현할 수 있다. 본 연구에서는 자본단위당 정부지출이 일정하다고 가정하므로 (Eq.26)에 의해 보조금 수준이 결정된다. 또 PA 시나리오와 마찬가지로 (Eq.19)와 R&D 기업의 1계 미분조건을 기반으로 (Eq.27)를 도출할 수 있다.

$$\text{Max } \pi_H : q_H \dot{H} - (1 - s)w L_H \quad (\text{Eq.25})$$

$$G + sw L_H = \tau_K r K + \tau_p P + \tau_e m E \quad (\text{Eq.26})$$

$$\frac{\dot{H}}{H} = \frac{\delta[1 - (1 - \theta)(\alpha + \beta) - (1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)]}{(1 - s)(1 - \theta)\beta} \quad (\text{Eq.27})$$

$$L_y - \frac{\delta(1 - 1/\epsilon)(1 + \tau_e)m(H/K)P^{1/\epsilon}}{(1 - s)(w/K)}$$

2.4. 가계부문 및 균형성장경로

대표가계는 소비와 환경의 질로 구성된 효용함수를 극대화하며 경제활동을 하고, 자본세를 정부에 납부한다. (Eq.28)은 가계의 효용함수를 보여주고, σ 은 기간 간 대체 탄력성을 의미한다. 그리고 (Eq.29), (Eq.30)은 예산제약식이다. 가계는 중간재 기업을 소유함에 따라 이윤 π 를 지급받는데, 민간 기업에서 감축 기술 개발을 하는 경우에는 중간재 생산기업의 이윤이 모두 R&D 기업에게 돌아가므로 PA와 PAR 시나리오에서는 (Eq.30)의 예산제약식이 적용되고 GA 시나리오에서는 (Eq.29)의 예산제약식이 적용된다.

$$U(C, N) = \frac{(CN)^{1 - 1/\sigma}}{1 - 1/\sigma} \quad (\text{Eq.28})$$

$$\dot{K} = (1 - \tau_K)rK + w\bar{L} + \pi + G - C \quad (\text{Eq.29})$$

$$\dot{K} = (1 - \tau_K)rK + w\bar{L} + G - C \quad (\text{Eq.30})$$

위의 조건을 바탕으로 가계의 1계 미분조건을 구하면 (Eq.31)을 도출할 수 있고, ρ 는 시간선호율이다.

$$\frac{\dot{C}}{C} = \frac{1}{\sigma} \{ (1 - \tau_K)r - \rho \} \tag{Eq.31}$$

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{\dot{C}}{C} = \frac{\dot{K}}{K} = \frac{\dot{H}}{H} = \frac{\dot{E}}{E} = g^*, \dot{N} = \dot{P} = 0 \tag{Eq.32}$$

Fullerton and Kim (2008), Chu and Lai (2014)에서와 같이 장기적 균형성장경로에서는 (Eq.32)가 성립한다고 가정한다.

또 H, C, w, G, Y 의 자본 단위당 변수를 (Eq.33)과 같이 새롭게 정의하면 시나리오별 균형조건을 Table 2 ~ Table 4와 같이 정리할 수 있다.⁶⁾

Table 2. Equilibrium conditions for GA Scenario

① $(1 - \theta)\beta\xi^* = W^*L_Y^*$	② $g^* = \delta(\bar{L} - L_Y^*)$
③ $\xi^* = (N^*)^\gamma (P^*)^{1/\epsilon(1-\alpha)} (h^*)^{1-\alpha} (L_Y^*)^\beta$	④ $P^* = bN^*(1 - N^*)$
⑤ $g^* = \xi^* - m(P^*)^{1/\epsilon} h^* - c^*$	⑥ $g^* = \frac{1}{\sigma} \{ (1 - \tau_K)(1 - \theta)\alpha\xi^* - \rho \}$
⑦ $(1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)\xi^* = T_p P^* + (1 + \tau^e)m(1/\epsilon)h^*(P^*)^{1/\epsilon}$	
⑧ $\phi + W^*(\bar{L} - L_Y^*) = \tau_K(1 - \theta)\alpha\xi^* + T_p P^* + \tau_e m h^*(P^*)^{1/\epsilon}$	
⑨ $P^* = P_{Energy\ tax\ rate(0\%)}^*$	

Table 3. Equilibrium conditions for PA Scenario

① $(1 - \theta)\beta\xi^* = W^*L_Y^*$	② $g^* = \delta(\bar{L} - L_Y^*)$
③ $\xi^* = (N^*)^\gamma (P^*)^{1/\epsilon(1-\alpha)} (h^*)^{1-\alpha} (L_Y^*)^\beta$	④ $P^* = bN^*(1 - N^*)$
⑤ $g^* = \xi^* - m(P^*)^{1/\epsilon} h^* - c^*$	⑥ $g^* = \frac{1}{\sigma} \{ (1 - \tau_K)(1 - \theta)\alpha\xi^* - \rho \}$
⑦ $(1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)\xi^* = T_p P^* + (1 + \tau_e)m^*(1/\epsilon)h^*(P^*)^{1/\epsilon}$	
⑧ $g^* = \frac{\delta[1 - (1 - \theta)(\alpha + \beta) - (1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)]}{(1 - \theta)\beta} L_Y^* - \frac{\delta(1 - 1/\epsilon)(1 + \tau^e)m(P^*)^{1/\epsilon} h^*}{W^*}$	
⑨ $P^* = P_{Energy\ tax\ rate(0\%)}^*$	

Table 4. Equilibrium conditions for PAR Scenario

① $(1 - \theta)\beta\xi^* = W^*L_Y^*$	② $g^* = \delta(\bar{L} - L_Y^*)$
③ $\xi^* = (N^*)^\gamma (P^*)^{1/\epsilon(1-\alpha)} (h^*)^{1-\alpha} (L_Y^*)^\beta$	④ $P^* = bN^*(1 - N^*)$
⑤ $g^* = \xi^* - m(P^*)^{1/\epsilon} h^* - c^*$	⑥ $g^* = \frac{1}{\sigma} \{ (1 - \tau_K)(1 - \theta)\alpha\xi^* - \rho \}$
⑦ $(1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)\xi^* = T_p P^* + (1 + \tau_e)m(1/\epsilon)h^*(P^*)^{1/\epsilon}$	
⑧ $\phi + s^* W^*(\bar{L} - L_Y^*) = \tau_K(1 - \theta)\alpha\xi^* + T_p P^* + \tau_e m(P^*)^{1/\epsilon} h^*$	
⑨ $g^* = \frac{\delta[1 - (1 - \theta)(\alpha + \beta) - (1 - \theta)(1 - \alpha)(1/\epsilon)]}{(1 - s^*)(1 - \theta)\beta} L_Y^* - \frac{\delta(1 - 1/\epsilon)(1 + \tau^e)m(P^*)^{1/\epsilon} h^*}{(1 - s^*)W^*}$	
⑩ $P^* = P_{Energy\ tax\ rate(0\%)}^*$	

6) * 표시된 변수는 균형상태에서의 값을 의미한다.

$$h = \frac{H}{K}, \quad c = \frac{C}{K}, \quad W = \frac{w}{K}, \quad \phi = \frac{G}{K}, \quad \xi = \frac{Y}{K}, \quad T_p = \frac{\tau_p}{K} \quad (\text{Eq.33})$$

Table 2 ~ Table 4에서 $P_{Energy\ tax\ rate=0\%}^*$ 는 $T_p (= \frac{\tau_p}{K})$ 가 30이고, 에너지세율이 0%일 때의 탄소배출량이다. 에너지세율이 증가함에 따라 T_p 값을 감소시키면서 동일한 탄소가 배출되는 경제를 비교하였다.

시나리오 간 균형조건을 살펴보면 정부 예산제약식에 차이가 발생한다. GA, PAR 시나리오에서는 이전지출의 규모가(ϕ) 일정한 반면 PA 시나리오에서는 모든 세수입이 가계로 이전된다. GA 시나리오의 경우 가계로 이전되는 세수입 외에는 R&D 투자를 위해 지출되고, PAR 시나리오의 경우에는 R&D 기업의 보조금으로 지출된다.

2.5. 모수 설정

본 연구는 Chu and Lai (2014)에서 설정한 모수를 동일하게 적용하였다. 본 연구에서 가장 중요한 모수는 배출탄력성 ϵ 인데 $\epsilon < 1$ 로 설정할 경우 모든 시나리오에서 현실적인 수치를 도출하기 어렵다.⁷⁾ 또 본 연구가 Chu and Lai (2014)의 후속 연구인만큼 연구결과의 차이점을 살펴보기 위해 동일한 모수를 적용하였고, Table 5에 이를 정리하였다.

Table 5. Baseline parameters

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
α	0.24	β	0.67	b	0.04
σ	1.5	ρ	0.05	\bar{L}	15
ϵ	1.7	η	0.7	m	1.8
γ	0.77	θ	0.35	δ	0.01
τ_K	0.16	ϕ	0.06	T_p	30

Chu and Lai (2014)는 Table 5의 모수 중 γ, α, b, η 를 Fullerton and Kim (2008)를, σ, β, ρ 는 Lucas (1990),

Stokey and Rebelo (1995)를 참고하여 설정하였다. 이 중 γ, b, η 는 환경 질의 재생능력을 고려해 균제상태에서 N 의 값이 0.5에서 1 사이에 위치하고, C/Y 의 값이 항상 양의 값이 되도록 설정된 수치이다.⁸⁾ α 는 0.24로 설정하여 에너지 소득분배율($1-\alpha$)을 0.76으로 설정하였는데, 본 연구와 유사한 생산함수와 우리나라 자료를 통해 추정된 Hwang et al.(2009)에서도 에너지 소득분배율이 0.692로 추정된 바 있다. $\beta(=0.67)$ 는 노동소득 분배율인데 우리나라의 경우에는 2019년에 0.585 (KOSIS)으로 큰 차이는 없다고 판단된다. σ, ρ 는 추정방법과 자료에 따라 값이 달라질 수 있지만 내생적 성장모형에서 일반적으로 사용하는 범주 안에 있는 수치이다. 우리나라를 대상으로 분석한 Song (2014)의 경우에도 $\sigma=2, \rho=0.04$ 로 설정한 바 있고, 최신 연구인 Zhu et al.(2022)에서는 본 연구와 동일하게 $\sigma=1.5, \rho=0.05$ 로 설정한 바 있다. θ 는 Basu and Fernald (1997)와 Guo and Lansing (1999)의 연구결과를 참고해 0.35로 설정하여 가격탄력성이 약 2.86가 되도록 설정하였고, T_p 은 기준 시나리오에서 최종 산출량 대비 탄소세 수입이 약 17%가 되도록 설정하였다.⁹⁾ 자본세율 τ_K 는 Auerbach (1996)의 연구결과를 참고하여 설정하였고, ϕ 는 정부지출이 최종 산출량의 8%에 해당되게 설정하였다. m, δ, \bar{L} 는 기준 시나리오에서 경제성장률이 약 3.12%가 되도록 값을 조정하였는데 이는 미국의 30년간의 경제성장률을 기준으로 설정한 것이다. 우리나라의 경우 2003년 ~ 2021년 평균 경제성장률이 약 3.4%이다. 배출탄력성은 배출탄력성의 역할을 강조하기 위해 $\epsilon=1.7$ 을 적용하였다.¹⁰⁾

3. 시나리오별 경제성장률과 사회후생

3.1. 에너지세 비중에 따른 경제성장률과 사회후생

본 논문에서 균제상태에서의 사회후생(SW^*)은 Barro (1990), Chu and Lai (2014)에서와 같이 (Eq.34), (Eq.35)를 통해 측정하고 $K_0=1$ 로 가정한다.

7) 본 연구에서는 Chu and Lai (2014)에서 사용한 배출탄력성 값을 적용했지만, 국내 이산화탄소 배출량과 최종에너지 소비량 자료(KESIS, 1990년 ~ 2019년)를 이용해 추정된(최소제곱법) 배출탄력성 값은 0.5155이다.
 8) 보다 구체적인 내용은 Nordhaus (1994)와 Fullerton and Kim (2008)을 참고하기 바람.
 9) Chu and Lai (2014)는 에너지세가 도입되지 않은 GA 시나리오를 기준으로 모수를 설정하였다. 그리고 $K=1$ 을 가정하면 균제상태에서 P 는 약 0.0041, Y 는 약 0.7314가 된다. 따라서 $T_p=30$ 을 적용하면 최종 산출량 대비 탄소세 수입이 약 17(=30*0.0041/0.7314)%가 된다.
 10) Fullerton and Kim (2008)은 $1/\epsilon$ 값의 범위를 0.6 ~ 0.9로 제시한 바 있는데, Chu and Lai (2014)는 이를 고려해 $1/\epsilon=0.6$ 을 적용하였다. 보다 구체적인 내용은 Fullerton and Kim (2008)와 Chu and Lai (2014)를 참고하기 바람. 본 연구에서는 배출탄력성의 개념을 적용하기 위해 $\epsilon(=1/0.6 \approx 1.7)$ 를 적용하였다.

$$SW^* = \frac{1}{1-\sigma} \left\{ \frac{-1}{(1-\sigma)g^* - \rho} C_0^{1-\sigma} (N^*)^{\eta(1-\sigma)} - \frac{1}{\rho} \right\} \quad (Eq.34)$$

$$R_p = \tau_p P \quad (Eq.36)$$

$$R_e = \tau_e m E = \tau_e m P^{1/\epsilon} H \quad (Eq.37)$$

$$C_0 = [\xi^* - m h^* (P^*)^{1/\epsilon} - g^*] K_0 \quad (Eq.35)$$

(Eq.36) ~ (Eq.37)에서 R_p , R_e 은 각각 탄소세 수입과 에너지세 수입을 나타낸다. 두 식에 모두 자연로그를 취하면 (Eq.38) ~ (Eq.39)와 같다.

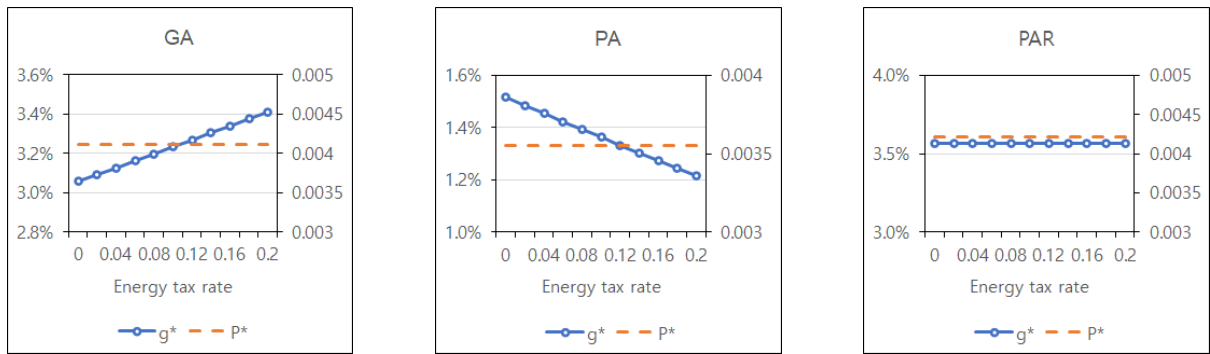
$$\ln R_p = \ln \tau_p + \ln P \quad (Eq.38)$$

$$\ln R_e = \ln \tau_e + \ln m + (1/\epsilon) \ln P + \ln H \quad (Eq.39)$$

Fig. 1은 시나리오별 경제성장률과 후생수준을 비교한 것이다. 에너지세율이 증가할수록 탄소세율을 감소시켜 중간재 생산기업이 동일한 탄소를 배출하는 경제를 비교하였다. GA 시나리오에서는 에너지세 비중이 커질수록 경제성장률이 증가하는 반면, PA 시나리오에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 또 PAR 시나리오에서는 에너지세 비중과 관계없이 경제성장률이 동일한 것으로 나타났다. 사회 후생도 각 시나리오별로 경제성장률과 동일한 방향성을 보임을 알 수 있다.

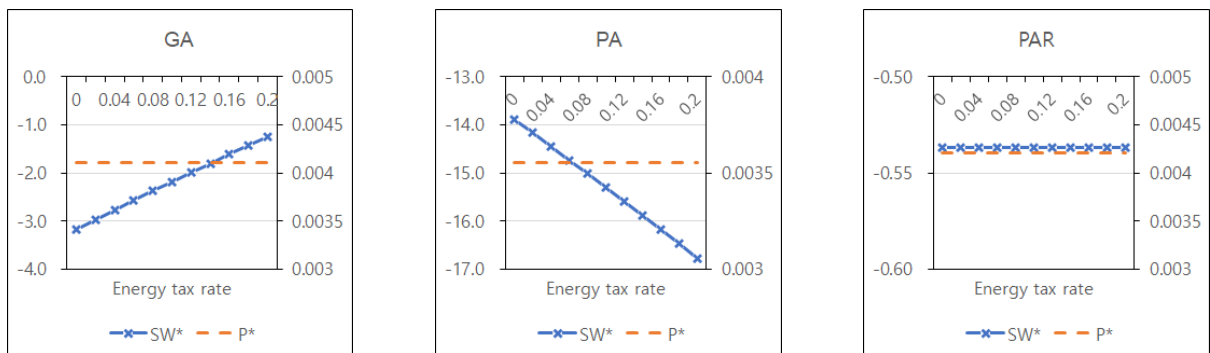
따라서 탄소세가 부과되면 탄소배출이 1% 증가할 경우 세수입도 1% 증가하게 되는 반면, 에너지세가 부과되면 탄소배출이 1% 증가할 경우 세수입이 1/ε(본 연구에서는 ε=1.7로 설정하였으므로 약 0.59%) 증가하게 된다. 반대로 동일한 탄소를 두 세제로 감축할 경우 탄소배출량 감소로 인한 세수입 감소 규모는 에너지세의 경우가 상대

위의 결과를 해석하기 위해 다음의 식을 고려해 보자.



Left axis: Economic growth rate (g*), Right axis: Carbon emissions (P*)

Fig. 1. Economic growth rate by energy tax ratio by scenario



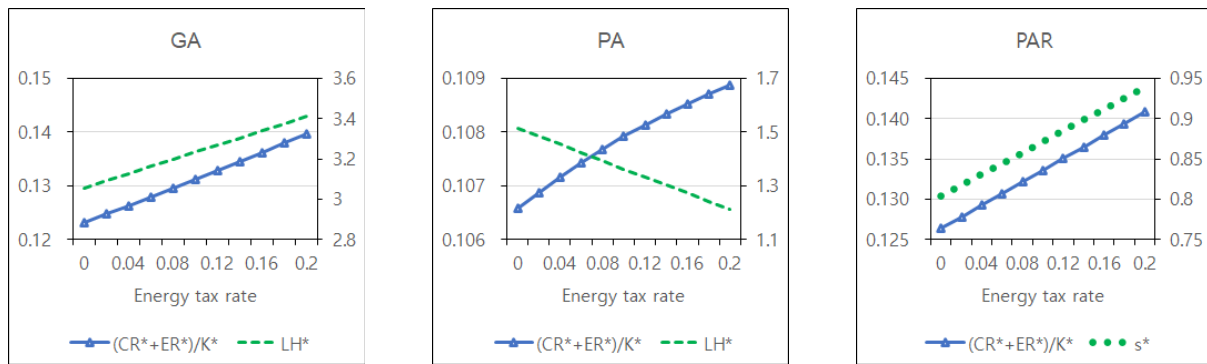
Left axis: Social welfare (SW*), Right axis: Carbon emissions (P*)

Fig. 2. Social welfare by energy tax ratio by scenario

적으로 작다. 따라서 감축기술을 정부에서 담당할 경우 (GA 시나리오) 에너지세 비중이 커질수록 세수입이 증가함에 따라 정부의 자본 축적이 증가하고, R&D 부문의 노동투입이 증가하면서 경제성장률도 증가하게 된다.¹¹⁾ 반대로 감축기술을 민간 기업에서 담당할 경우 에너지세 비중이 커질수록 중간재 생산기업의 세부담이 증가하게 되고 이윤이 감소하게 된다. 앞서 언급하였듯이 민간 기업에서 감축기술을 개발할 경우 R&D 기업이 중간재 생산기업의 모든 이윤을 획득하기 때문에 결과적으로 R&D 기업의 이윤이 감소하게 된다. 이에 따라 R&D 기업의 고

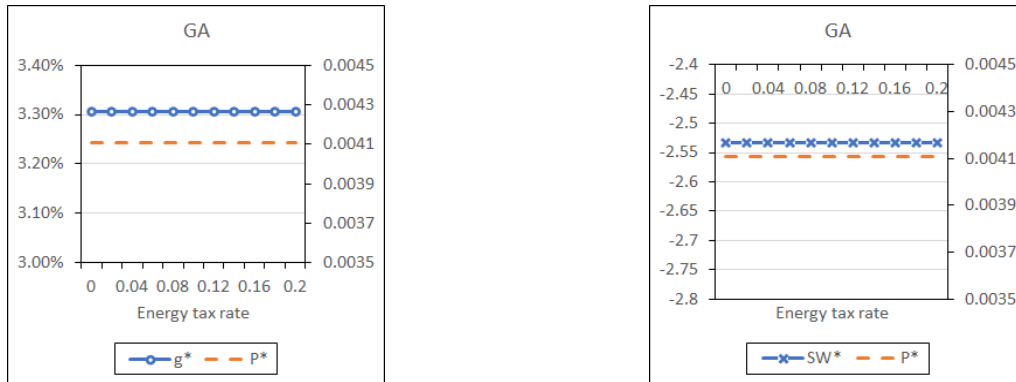
용 규모가 감소하게 되고 경제성장률도 감소하게 된다. PAR 시나리오에서도 동일한 현상이 발생하지만 보조금 비율 증가가 R&D 기업의 이윤 감소 효과를 상쇄시킴에 따라 경제성장률은 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.¹²⁾ Fig. 3은 에너지세 비중에 따른 세(탄소세, 에너지세)수입, R&D 기업의 고용 규모, 보조금 비율을 보여주고 있다.

이상의 해석이 맞는지 확인하기 위해 $\epsilon = 1$ 인 경우 GA 시나리오 하에서 에너지세 비중에 따른 경제성장률과 사회후생을 살펴보았으며, 에너지세의 비중에 관계없이 경제성장률과 사회후생이 일정함을 확인할 수 있다.¹³⁾



* Left axis: Tax (carbon tax+energy tax) revenue/capital ((CR*+ER*)/K*)
 ** Right axis: Labor (R&D) (LH*) · subsidy ratio (s*)

Fig. 3. Tax revenue (carbon tax+energy tax)/capital, labor (R&D), and subsidy ratio by energy tax ratio by scenario



Left axis: Economic growth rate (g*)-social welfare (SW*), Right axis: Carbon emissions (P*)

Fig. 4. Economic growth rate by energy tax ratio (GA scenario)

- 11) 모든 시나리오의 균형조건에 $g^* = \delta(\bar{L} - L_y^*)$ 이 포함되어 있으므로, R&D 부문의 노동 투입이 증가하면 경제성장률도 증가하게 된다.
- 12) Table 4의 ⑧에서 정부의 이전 지출 규모(ϕ)가 일정하므로 R&D 기업은 에너지세 도입으로 인해 증가하는 조세증가액을 다시 보조금으로 환급받게 된다.
- 13) 나머지 시나리오에서 $\epsilon = 1$ 로 조정하고 시뮬레이션할 경우 현실적인 수치로 계산되지 않는 변수들이 나타나 이에 대한 결과는 수록하지 않았다. PA 시나리오의 경우 경제성장률이 음(-)수로 계산되고, PAR 시나리오의 경우에는 보조금 비율이 1보다 커지게 된다. 경제성장률을 결정짓는 몇 가지 모수들을 조정하면 두 시나리오에서도 경제성장률과 보조금 비율이 현실적인 수치를 보이면서 에너지세 비중과 관련 없이 경제성장률과 사회후생이 동일해지는 것을 확인할 수 있다.

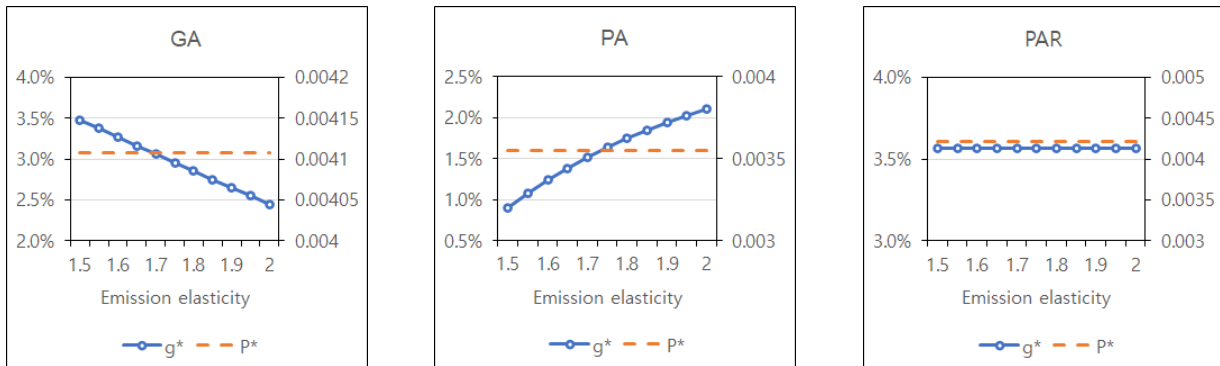
3.2. 배출탄력성에 따른 경제성장률과 사회후생

$$\ln R_p = \ln \tau_p + \epsilon \ln E - \epsilon \ln H \tag{Eq.40}$$

다음은 앞의 분석에서 중요한 역할을 했던 배출탄력성이 변할 경우 각 시나리오별 경제성장률과 후생수준을 살펴보았다. 이 분석에서는 에너지세는 고려하지 않고 탄소세만 도입된 경제를 분석하였다. 또 앞의 분석과 마찬가지로 탄소배출량을 고정시킨 상태에서 배출탄력성과 탄소세율에 변화를 주면서 경제성장률과 사회후생을 살펴 보았다. Fig. 5와 Fig. 6은 배출탄력성이 변함에 따라 경제 성장률과 사회후생이 어떻게 변하는지를 보여주고 있다.

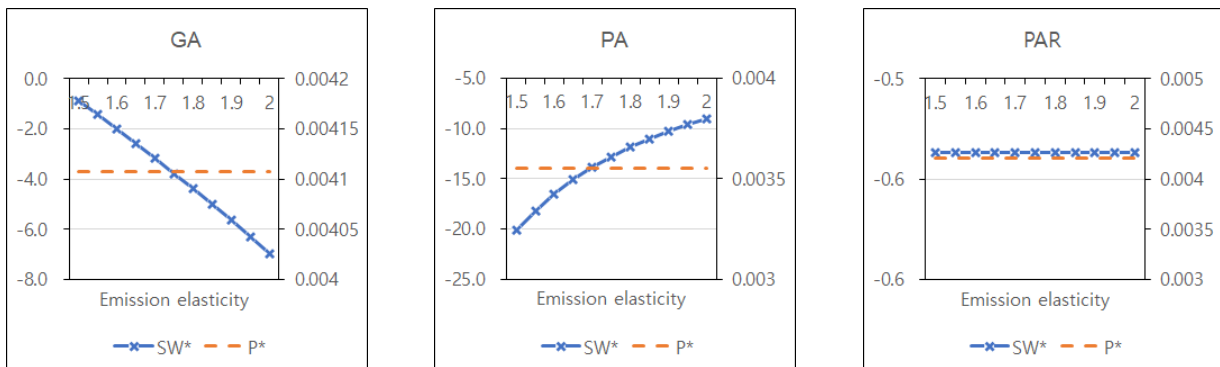
앞의 결과와는 상반되게 GA 시나리오에서는 배출탄력성이 증가할수록 경제성장률과 후생수준은 감소하는 반면, PA 시나리오에서는 증가하는 것을 알 수 있다. PAR 시나리오의 경우에는 앞의 결과와 마찬가지로 배출탄력성의 변화에 관계없이 경제성장률과 사회후생이 일정한 것으로 나타났다. 위의 결과를 해석하기 위해 다음의 식을 살펴보자.

(Eq.40)은 (Eq.38)을 Table 1의 ④를 이용해 변형시킨 것이다. (Eq.40)에 따라 동일한 탄소를 탄소세를 이용해 감축할 경우 에너지 소비 증가에 따른 탄소세 수입 증가 규모는 ϵ 값이 증가할수록 커지게 되지만 감축기술이 증가하면 작아지게 된다. 본 연구는 동일한 탄소를 배출하는 경제를 살펴보고 있기 때문에 배출탄력성이 커질수록 에너지 1단위 소비에 따른 탄소배출량이 증가하고, 동일한 탄소배출을 유지하기 위해 에너지소비가 감소하면서 탄소세수입도 감소하게 된다. GA 시나리오의 경우 세수입이 감소하면서 정부(R&D) 부문의 자본량과 함께 감축 기술도 감소하게 된다. 감축기술의 감소는 (Eq.40)에 따라 세수입을 증가시키는 방향으로 작용하지만 에너지 소비 감소에 따른 세수입 변화 효과가 더 크게 작용하여 배출탄력성이 증가하면서 경제성장률과 사회후생이 감소하는 것으로 나타났다. PA 시나리오의 경우 배출탄력성이 커



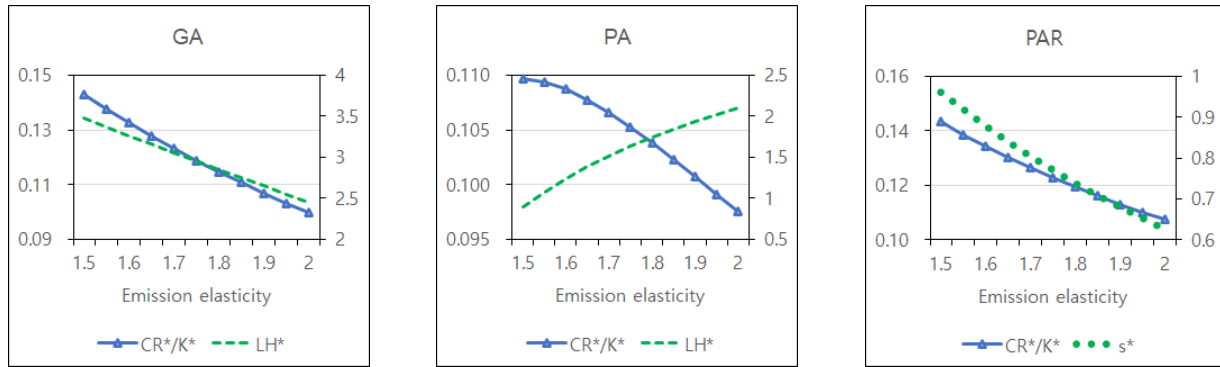
* Left axis: Economic growth rate (g*), Right axis: Carbon emissions (P*)

Fig. 5. Economic growth rate by emission elasticity by scenario



* Left axis: Social welfare (SW*), Right axis: Carbon emissions (P*)

Fig. 6. Social welfare by emission elasticity by scenario



* Left axis: Carbon tax revenue (CR*), Right axis: Labor (R&D) (LH*)·subsidy ratio (s*)

Fig. 7. Carbon tax revenue, labor (R&D), and subsidy ratio by emission elasticity by scenario

Table 6. Main results by emission elasticity by scenario

GA: Economic growth rate and social welfare decline as emission elasticity increases.
PA: Economic growth rate and social welfare increase as emission elasticity increases.
PAR: Economic growth rate and social welfare are constant regardless of emission elasticity.
→ The size of emission elasticity has a great influence on economic growth rate and social welfare.

질수록 GA 시나리오와 마찬가지로 에너지 1단위 소비에 따른 탄소배출량 증가로 세부담이 감소하면서 중간재 생산기업의 이윤이 증가하고 결국 R&D 기업의 이윤이 증가하게 된다. R&D 기업의 이윤이 증가하면 R&D 부문의 노동이동 규모가 커지면서 경제성장률과 사회후생은 증가하게 된다. 또 감축기술도 증가하면서 (Eq.40)에 의해 세부담이 더욱 감소하게 된다. 한편 감축기술의 증가로 중간재 기업이 에너지 투입을 늘려 앞서 설명한 효과와 반대되는 효과가 발생할 수 있지만, 세부담 감소 효과가 크게 작용하여 배출탄력성이 커질수록 경제성장률과 사회후생이 증가하는 것으로 판단된다. PAR 시나리오의 경우에는 PA 시나리오와 동일한 현상이 발생하지만 보조금 비율이 하락함에 따라 경제성장률과 사회후생의 변화가 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문은 Chu and Lai (2014)에서 사용한 모형과 시나리오에 에너지세를 추가해 탄소세와 에너지세 도입에 따른 파급효과를 분석하였다. 분석결과 동일한 탄소를 배출하는 경우 에너지세 비중에 따라 경제성장률과 후생수준이 변할 수 있음을 알 수 있었고 배출탄력성이 큰 역할을 하는 것으로 나타났다. 구체적으로 배출탄력성이 1보다

클 경우 감축기술을 정부에서 담당하는 시나리오에서는 에너지세 비중이 커질수록 세수입이 증가함에 따라 경제성장률과 후생수준이 증가하는 것으로 나타났다. 반면 감축기술을 민간 기업에서 담당할 경우 에너지세 비중이 커질수록 경제성장률과 후생수준이 감소하지만, R&D 기업의 생산비용의 일부를 보조금으로 지급할 경우 변화가 없는 것으로 나타났다. 또 탄소배출이 일정한 상황에서 배출탄력성 변화에 따른 결과도 살펴보았는데, 감축기술 개발을 정부에서 담당할 경우 배출탄력성이 커질수록 세수입이 감소함에 따라 경제성장률과 후생수준이 감소하는 것으로 나타났다. 반대로 감축기술 개발을 민간 기업에서 담당하면 배출탄력성이 커질수록 중간재 생산기업의 세부담 감소로 경제성장률과 후생수준이 증가하지만, 보조금을 지급할 경우에는 에너지세 비중 변화에 따른 결과와 마찬가지로 경제성장률과 후생수준의 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 Chu and Lai (2014)에서 도출한 결론이 에너지세의 비중과 배출탄력성의 크기에 따라 달라질 수 있으며, 탄소세와 에너지세를 동시에 도입할 경우 배출탄력성의 크기를 고려해 제도 설계를 해야 한다는 것을 의미한다.

마지막으로 추후 연구 과제를 제안하면 Chu and Lai (2014)에서 언급한 바와 같이 에너지 생산기업을 추가할 필요가 있다. 에너지 생산기업을 추가하면 에너지 가격이

내생화되고 또 다른 시사점이 도출될 수 있다고 판단된다. 또 기존 연구들은 조세체계의 효율성을 탄소세를 중심으로 분석하였지만, 본 연구와 같이 탄소세와 에너지세를 분리시켜 분석하면 주요 결과가 변할 수 있다고 판단된다. 그리고 본 연구는 Chu and Lai (2014)와의 연구 결과 비교와 모형 구조의 제약으로 인해 Chu and Lai (2014)와 동일한 모수를 적용하였지만, 최신 국내 자료를 이용해 모수를 설정하면 보다 현실적이고 정교한 분석이 될 것이라고 판단된다.

사사

이 논문은 2022년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022S1A3A2A01088457).

References

- Auerbach A. 1996. Tax reform, capital allocation, efficiency, and growth. *Economic Effects of Fundamental Tax Reform*: 29-81.
- Barro R. 1990. Government spending in a simple model of endogenous growth. *Journal of Political Economy* 98(5): S103-S125.
- Basu S, Fernald J. Returns to scale in U.S. production: Estimates and implications. *Journal of Political Economy* 105(2): 249-283.
- Bovenberg A, Smulders S. 1995. Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model. *Journal of Public Economics* 57(3): 369-391.
- Chu H, Lai C. 2014. Abatement R&D, Market imperfections, and environmental policy in an endogenous growth model. *Journal of Economic Dynamics & Control* 41: 20-37.
- Dixit A, Stiglitz J. 1977. Monopolistic competition and optimum product diversity. *American Economic Review* 67(3): 297-308.
- Fullerton D, Kim S. 2008. Environmental investment and policy with distortionary taxes, and endogenous growth. *Journal of Environmental Economics and Management* 56(2): 141-154.
- Goulder L. 1995. Effects of carbon taxes in an economy with prior tax distortions: An intertemporal general equilibrium analysis. *Journal of Environmental Economics and Management* 29(3): 271-297.
- Guo J, Lansing K. 1999. Optimal taxation of capital income with imperfectly competitive product markets. *Journal of Economic Dynamics & Control* 23(7): 967-995.
- Hwang M, Park J, Kim Y. 2009. Effects and implications of climate change response on Korean economy. Bank of Korea.
- Hettich F. 1998. Growth effects of a revenue-neutral environmental tax reform. *Journal of Economics* 67(3): 287-316.
- Kang S, Hong J. 2008. The effect of environmental tax policy on economic growth: An endogenous growth approach. *Environmental and Resource Economics Review* 17(3): 61-91.
- Kang S, Lee D, Yu J. 2015. Cap-and-trade scheme and environmental taxes in policy mix. Korea Institute of Public Finance.
- KESIS; [accessed 2023 March 8] http://www.kesis.net/sub/sub_0001.jsp (subject : total energy, greenhouse gas).
- KIER (Korea Institute of Energy Research). 2021. CCUS in-depth investment analysis report. Quarterly Report.
- KOSIS; [accessed 2023 March 8] https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?tblId=DT_2UNS0103&orgId=101&language=kor&conn_path=&vw_cd=&list_id=R_SUB_OTITLE_OTIT_UNTIT_10_100_40
- Lucas R, 1990. Supply-side economics: An analytical review. *Oxford Economic Papers* 42(2): 293-316.
- Market and Markets. 2020. Carbon capture, utilization, and sequestration market: Global forecast to 2025.
- Nordhaus W. 1994. *Managing the global common, the economics of climate change*. MIT Press. Cambridge, MA.
- OECD. 2017. *Environmental performance reviews (Abridgement Edition)*.
- Parry I. 1995. Pollution taxes and revenue recycling. *Journal of Environmental Economics and Management*

- 29(3): S64-S77.
- Song J. 2014. Analysis on the transitional paths of the economic integration of two Koreas using endogenous growth model. *Journal of Korean Economic Analysis* 20(1): 57-106.
- Stokey N, Rebelo S. 1995. Growth effects of flat-rate taxes. *Journal of Political Economy* 103(3): 519-550.
- Tahvonen O, Kuuluvainen J. 1991. Optimal growth with renewable resources and pollution. *European Economic Review* 35(3): 650-661.
- Yu J. 2021. Policy research on carbon tax imposition sector and optimum tax rate. Korea Institute of Public Finance.
- Zhu Y, Wan B, Tian L. 2022. Protection of intellectual property rights, financial development and green low-carbon endogenous economic growth. *Sustainability* 14(20): 13029.