

실물적 경기변동모형을 이용한 탄소세 부과방식에 관한 연구[†]

정인섭* · 정용국**

요약 : 본 논문은 실물적 경기변동모형을 이용하여 탄소세의 부과방식에 따른 파급효과를 생산성과 에너지가격 변동을 고려하여 비교·분석하였다. 시나리오 1에서는 매 기간 온실가스 감축목표에 따라 대표기업이 CO_2 감축비율을 일정하게 유지하도록 유도하는 탄소세율을 부과하는 방식을 설정하였고, 시나리오 2에서는 분석기간 동안 시나리오 1의 탄소세율의 균제상태의 값을 일정하게 부과하는 방식을 설정하였다. 충격반응분석에 따르면 외부충격에 대한 CO_2 배출의 반응이 시나리오 2에서 상대적으로 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 또한 모형 시뮬레이션 결과 CO_2 감축비용은 시나리오 1에서 변동성이 더 큰 것으로 나타났으며, CO_2 배출과 CO_2 스톡의 변동성은 시나리오 2에서 더 큰 것으로 나타났다. 특히 CO_2 배출과 CO_2 스톡의 시나리오 간의 변동성 증감률은 온실가스 감축목표가 강화될수록 더욱 커지는 것으로 나타났으며, 온실가스 감축목표가 60% 이상이 되면 시나리오 간의 두 변수들의 증감률(절대치)이 CO_2 감축비용의 증감률(절대치)을 넘어서는 것으로 나타났다.

주제어 : 실물적 경기변동모형, 탄소세 부과방식

JEL 분류 : E32, E37, Q51

접수일(2017년 9월 28일), 수정일(2018년 2월 1일), 게재확정일(2018년 2월 26일)

[†] 저자들은 본 논문의 작성 과정에서 유익한 논평을 해주신 익명의 심사위원 두 분에게 감사의 말씀을 전한다. 이 논문은 2015년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

* 서울시립대학교 경제학부, 박사과정, 제1저자(e-mail: insupch@naver.com)

** 서울시립대학교 경제학부, 부교수, 교신저자(e-mail: yonggook12@uos.ac.kr)

A Study on the Carbon Taxation Method Using the Real Business Cycle Model[†]

In-sup Chung* and Yong-gook Jung**

ABSTRACT : In this paper, we compare the spread effects of the carbon tax imposition method using the real business cycle model considering the productivity and energy price shocks. Scenario 1 sets the carbon tax rate that encourages the representative firm to maintain a constant CO_2 reduction ratio in accordance with its green house gas reduction targets for each period. Scenario 2 sets the method of imposing the steady state value of the carbon tax rate of Scenario 1 during the analysis period. The impulse response analysis shows that the responses of CO_2 emissions to external shocks are relatively sensitive in scenario 2. And simulation results show that the cost of CO_2 abatement is more volatile in scenario 1, and CO_2 emissions and CO_2 stock are more volatile in scenario 2. In particular, the percentage changes in volatility between the two scenarios of CO_2 emissions and CO_2 stock increase as the green house gas reduction target is harder. When the green house gas reduction target is 60% and over, the percentage changes(absolute value) between the two scenarios exceed the percentage change(absolute value) of the CO_2 reduction cost between them.

Keywords : Real business cycle model, Carbon taxation method

Received: September 28, 2017. Revised: February 1, 2018. Accepted: February 26, 2018.

[†] The authors would like to thank the two anonymous referees for their helpful comments in the process of writing this paper.

This paper was supported by the Academic Research Fellowship of the University of Seoul in 2015.

* Ph. D. Candidate, Department of Economics, University of Seoul, Main author(e-mail: insupch@naver.com)

** Associate Professor, Department of Economics, University of Seoul, Corresponding author(e-mail: yonggook12@uos.ac.kr)

I. 서론

최근 우리나라에서는 온실가스 배출에 따른 기후변화문제에 대한 관심이 높아지고 있다. 기후변화로 인해 발생하는 질병과 식량문제 등이 사람들에게 점차 현실적인 문제로 다가오고 있기 때문에 해결책을 요구하는 목소리가 커지고 있는 실정이다. 이는 비단 우리나라만의 문제가 아니고 전 세계가 겪고 있는 문제이며, 국제사회에서도 핵심논제로 다루어지고 있다. 이에 따라 우리나라는 기후변화문제로 인한 피해를 줄이고 온실가스를 효과적으로 감축시키기 위해 2015년 1월부터 온실가스 배출권거래제(이하 배출권거래제)를 시행하고 있으며, 탄소세의 도입에 대해서도 많은 논의가 이루어지고 있다. 이러한 움직임은 온실가스로 인한 국내의 피해를 줄이는 것뿐만 아니라, 우리나라가 대내외적으로 공표한 온실가스 감축목표를 실현시키려는 목적도 가지고 있기 때문에 탄소세 도입에 대한 논의는 앞으로 더욱 활발해질 것으로 보인다.¹⁾

한편 본고에서와 같이 동태·확률적 일반균형모형을 이용하여 탄소세를 분석한 Heutel (2012)은 최적의 탄소세율이 경기순응적(pro-cyclical)이라고 주장하였다²⁾. 즉 경기가 호황일 때에는 탄소세율을 높게 설정하고, 불황기에는 낮게 설정하여야 사회후생이 극대화된다는 것이다. 이러한 연구 결과를 참고할 때 탄소세율을 경기순응적으로 부과하는 방식과 경기변동과 관계없이 일정하게 부과하는 방식이 거시경제 및 환경부문에 미치는 파급효과는 서로 다를 것이라고 예상해 볼 수 있다. 이에 따라 본고에서는 온실가스 감축목표가 주어진 우리나라의 상황을 감안하여 탄소세 도입방식에 따른 파급효과를 생산성과 에너지가격 변동을 고려하여 분석하고자 한다.

본 논문은 Heutel (2012)의 모형에 기반을 두고 있으며, 여기에 Finn (2000)과 같이 에너지가격을 외부충격으로 추가적으로 도입하였다. Heutel (2012)은 전통적인 실물적 경기변동모형에 생산성 피해함수를 도입하여 CO_2 배출에 의해 발생하는 외부효과(externality)를 모형 내에 반영하였으며, Finn (2000)은 에너지가격을 외부충격으로 도

1) 우리나라는 2030년까지 온실가스 배출량을 기준전망치(Business As Usual: BAU) 대비 37% 감축이라는 목표를 설정하였다.

2) Angelopoulos et al. (2013), Annicchiarico, Di Dio(2015)에서도 총요소생산성 충격에 대해 최적의 탄소세율은 경기순응적이라고 주장하였다.

입합과 동시에 외부충격이 발생한 경우 자본가동률의 조정이 가능한 실물적 경기변동 모형을 제시한 바 있다. 본 연구는 Heutel (2012)과 Finn (2000)의 모형을 바탕으로 우리나라에 온실가스 감축목표가 주어졌을 때 탄소세를 부과하는 방식을 시나리오별로 달리한 상황을 가정하고, 이것으로 인해 발생하는 경제 및 환경적 파급효과의 차이를 비교해 보고자 한다.

본고의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서 일반균형이론을 기초로 온실가스 감축정책을 연구한 기존문헌들을 살펴보고, III장에서 모형설정에 관한 내용들을 정리하였다. IV장에서는 현재 우리나라가 설정한 온실가스 감축목표를 반영한 모형을 이용해 충격 반응분석을 실시하였으며, V장에서 CO_2 배출탄력성별, 온실가스 감축목표별 CO_2 배출에 대한 민감도 분석의 결과를 정리하였다. 이후 VI장에서는 주어진 외생적 확률과정 하에서 모형 시뮬레이션을 수행하여 시나리오별로 분석하였으며, VII장은 결론이다.

II. 문헌연구

본 장에서는 온실가스 감축정책을 일반균형이론에 기초하여 분석한 기존문헌들을 살펴보았다. 우선 본고와 같이 미래에 대한 불확실성 하에서의 경제주체들의 합리적 의사결정을 모형 내에 반영한 동태·확률적 일반균형모형 중 실물적 경기변동모형을 이용한 연구들을 살펴보자.

Heutel (2012)은 CO_2 배출에 따른 외부효과를 생산함수에 포함시킨 실물적 경기변동모형과 Ramsey의 자비로운 사회 관리자(Benevolent Social Planner)의 가정을 이용하여 CO_2 배출과 탄소세율의 경기변동성을 분석하였다. 미국 자료를 이용하여 CO_2 배출탄력성을 구한 후, 이를 모형에 대입하여 분석을 하였다. 그 결과 사회후생을 극대화시키는 CO_2 배출은 탄소세를 도입한 경우와 도입하지 않은 경우 모두 경기 순응적이지만, 탄소세를 도입한 경우 CO_2 배출의 경기순응성이 다소 약화된다는 결론을 도출하였다. 또한 사회후생을 극대화시키는 탄소세율도 경기 순응성을 보인다고 주장하였다.

정윤경·이지웅(2014)도 실물적 경기변동모형을 이용하여 우리나라에 배출권거래제와 탄소세가 도입이 된 상황을 가정하고 이를 평가하였다. 이 연구는 기본적인 실물적 경

기변동모형에 생산성 피해함수와 에너지부문을 포함시켜 배출권거래제와 탄소세 도입에 따른 파급효과를 분석하였다. 분석기간은 10년으로 한정하였으며, 우리나라 온실가스 감축목표가 기준전망치 대비 30%인 경우를 상정하였다. 시뮬레이션 결과 온실가스 배출에는 두 제도 간 큰 차이가 없는 반면, 배출권거래제의 경우가 탄소세에 비해 후생손실이 다소 낮은 것으로 분석되었다. 하지만 이는 단기목표인 경우이고, 장기목표를 세울 경우에는 외부충격에 따라 온실가스 배출을 조절하기 용이한 탄소세가 우월할 것이라는 견해도 제시하였다.

김성균·이지웅(2016)은 REMI (Regional Economic Model Inc.) 모형과 EGMS (Energy and Greenhouse gas Modeling System) 모형을 이용하여 우리나라가 탄소세를 도입할 경우 미치는 지역별 파급효과를 분석하였다.³⁾ 이 논문은 2013년 7월 심상정의 원이 발의한 탄소세 도입 법안을 근거로 분석을 하였는데, 분석결과 탄소세수를 자연재해 손실액에 따라 분배하는 방식이 지역 간 격차를 줄이는데 긍정적인 효과를 내는 것으로 나타났다.

전영준(2011)은 Auerbach and Kotlikoff (1987)계열의 중첩세대 일반균형모형을 이용하여 우리나라에 환경세를 도입할 경우 이에 따른 세대 간 후생의 변화를 분석하였다.⁴⁾ 이 논문에서 사용한 모형이 기존 모형과 차별되는 점은 생산부문에서 화석연료와 신재생에너지의 역할을 반영하고, 또한 화석연료의 고갈가능성을 명시적으로 고려하였으며, 화석연료 효율성 증진 및 신재생에너지 개발을 위한 R&D 투자 과정을 반영하였다는 점이다. 분석결과 환경세를 도입할 경우 현 세대들의 후생비용보다 미래 세대들(2040년 출생세대와 그 이후에 출생한 세대들)의 후생증진 규모가 더 크게 나와 전체적인 후생은 증가할 것으로 보았다.⁵⁾ 이와 더불어 사회후생을 극대화시키는 환경세율(30~40%)과 R&D 지원수준(연구개발비의 40~50%)의 규모도 제시하였다.

본고에서 이용한 모형은 외부충격에 대한 확률적 요소를 고려하고, 경제주체들의 미

3) REMI 모형은 미국 REMI社가 개발하여 제공하는 정책분석 거시모형이다. 이는 투입·산출 분석, 연산 가능일반균형모형(CGE), 계량경제학, 경제지리학의 방법을 사용하며, 지역 단위 모의실험결과를 합쳐하여 분석하는 방식을 택하고 있다. 또한 EGMS는 에너지경제연구원에서 운용하고 있는 장기 에너지 및 온실가스 전망 시스템이다(김성균·이지웅(2016)).

4) 중첩세대모형은 한 기간 내의 여러 세대들의 공존과 인구의 세대교체를 가정하기 때문에 세대 간 분석이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

5) 사회후생에 대한 평가는 공리주의적 후생함수를 이용하였다.

래에 대한 합리적 의사결정을 반영한다는 측면에서 확정적 일반균형모형과는 차별성이 있다. 그리고 에너지를 실물적 경기변동모형에 내생변수로 도입하고, 우리나라의 온실가스 감축정책을 평가한다는 점에서 정윤경·이지웅(2014)과 동일하나, 에너지를 도입하는 방식에 차이가 있다. 정윤경·이지웅(2014)은 에너지부문을 추가하고 생산함수에 직접 에너지를 포함시키는 모형을 사용하였지만, 본고는 자본가동률을 통해 에너지가 생산에 영향을 미치며, 에너지가격을 외부충격으로 도입한 모형을 사용하였다. 자원을 거의 전부 수입해야 하는 우리나라의 경우 에너지가격이 기업의 의사결정에 매우 중요한 영향을 미친다는 점을 감안할 때 에너지가격을 외부충격으로 추가한 것은 의미가 크다고 생각된다. 마지막으로 탄소세의 부과방식을 생산성 및 에너지가격 변동과 연관시켜 분석한다는 점 또한 이전의 연구와 차별화된 점이다.

III. 모형설정

본 장에서는 이 논문에서 사용한 실물적 경기변동모형에 대해 부문별로 나누어 설명하였다. 모형의 설정과 함께 본고에서 고려한 시나리오에 대한 설명, 모수설정에 대한 내용도 본 장에 포함되어 있다.

1. 가계부문

무한히 생존하는 대표가계는 주어진 예산제약 하에서 식 (1)과 같은 형태의 기대효용 함수를 극대화하며 경제활동을 한다.

$$E_t \sum_{s=0}^{\infty} \beta^s \cdot \{ \ln c_{t+s} + b \cdot \ln l_{t+s} \} \quad (1)$$

여기서 c 는 소비, l 은 여가시간을 의미하며, β 는 효용할인인자, b 는 여가선호율을 나타낸다. 또한 가계는 매 기간 1로 정규화된 부존시간을 사용할 수 있으며, 부여된 시간동안 여가와 노동(h) 중 1가지를 선택하여 시간을 소비한다고 가정한다. 아래의 식 (2)는 이

리한 가정을 반영한 식이다.

$$l_t + h_t = 1 \tag{2}$$

본고는 Heutel (2012)과 달리 Finn (2000), 차경수(2009) 등과 같은 방식으로 에너지(en)를 내생변수로 도입하였다. Burnside and Eichenbaum (1996), King and Rebelo (1999)에 따르면 실증적으로 추정된 기술충격의 규모는 전통적인 실물적 경기변동모형에서 가정하는 총요소생산성 충격보다 작다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 하나의 방안으로 가변적인 자본가동률의 도입을 고려할 수 있다. Finn (2000)에서와 같이 자본가동률이 외부충격에 대해 가변적인 모형을 도입하면 기술충격의 규모는 감소하지만, 동충격이 경기변동에 미치는 영향은 증폭되는 효과를 거둘 수 있다. 따라서 본고는 Burnside and Eichenbaum (1996), King and Rebelo (1999)의 실증 연구결과에 보다 부합하는 모형을 구축하고자 가변적인 자본가동률을 추가하였다. 이에 따라 해외 에너지 가격 상승이 거시경제 및 환경부문에 미치는 효과도 분석할 수 있다.

Finn (2000)은 자본재(k)와 에너지가 결합되어야 자본서비스(k·u)가 생산된다는 점에 착안하여 자본 1단위당 에너지의 비율이 자본가동률(u)의 수준을 결정하고, 자본가동률이 높을수록 감가상각이 증가하는 모형을 제시하였다. 이러한 모형에서 가계는 에너지와 자본재를 결합시켜 기업에게 자본서비스를 공급한다고 가정한다. 식 (3)과 (4)는 자본 1단위당 에너지의 비율과 자본가동률의 관계를 나타내는 식이며, Finn (2000)에서와 같이 자본가동률은 자본-에너지의 비율에 대해 단조 증가하는 볼록함수를 가정한다.

$$\frac{en_t}{k_t} = \xi(u_t) \tag{3}$$

$$\xi(u_t) = \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \cdot u_t^{\gamma_1}, \quad \gamma_0 > 0, \quad \gamma_1 > 1 \tag{4}$$

식 (5)는 자본가동률과 감가상각률의 관계를 나타내며, 감가상각률 역시 자본가동률

에 대해 단조 증가하는 볼록함수를 가정한다. 이는 자본가동률이 증가할수록 자본재의 마모가 커짐을 의미한다.

$$\delta(u_t) = \frac{\phi_0}{\phi_1} \cdot u_t^{\phi_1}, \phi_0 > 0, \phi_1 > 1 \quad (5)$$

이 밖에 가계는 노동과 자본서비스를 제공한 대가로 기업으로부터 실질임금(w)과 임대료(r)를 지급받고, 가계가 기업을 소유한다는 가정 하에 기업으로부터 이윤(Π)을 배당받으며, 탄소세가 도입된 경우 탄소세 수입을 정부로부터 이전 받는다. 식(6)에서 τ^{em} , em 및 p 는 각각 탄소세율, 국내의 CO_2 배출 및 에너지가격을 의미한다. 현재 우리나라에서 시행하고 있는 배출권거래제에서는 교토의정서(Kyoto protocol)에서 규정하고 있는 6대 온실가스가 모두 포함되어 있지만, 본 연구에서는 분석의 편의상 CO_2 의 배출만을 고려하였다.⁶⁾

t 기에 보유한 가계의 자본스톡은 식 (5)에 따라 감가상각이 되고, t 기의 투자량(i)과 더해져 $t+1$ 기의 자본스톡이 결정된다.

$$c_t + i_t + p_t \cdot en_t \leq r_t \cdot k_t \cdot u_t + w_t \cdot h_t + \tau_t^{em} \cdot em_t + \Pi_t \quad (6)$$

$$k_{t+1} = (1 - \delta(u_t)) \cdot k_t + i_t \quad (7)$$

2. 기업부문

대표기업은 가계로부터 노동 및 자본서비스를 공급받아 최종소비재(y)를 생산한다. 따라서 노동의 한계생산물이 실질임금과 같아지고, 자본서비스의 한계생산물과 자본서비스 임대료가 일치하는 수준에서 요소 투입량이 결정된다. 한편 기업은 CO_2 배출에 따른 대기 중의 CO_2 스톡(x)의 증가로 인해 생산성에 피해($d(x)$)를 받지만, 이윤극대화

6) 교토의정서에서 규정하고 있는 6대 온실가스는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFC_s), 과불화탄소(PFC_s), 육불화황(SF_6)이다.

과정에서 이를 고려하지 않는다고 가정을 하여 외부효과가 발생한다.⁷⁾⁸⁾ 다만 정부가 기업에게 탄소세를 부과하게 되면 세금부담을 최소화하기 위해 CO_2 감축을 위한 지출(z)을 하게 되며, 관련 비용은 1로 정규화된 최종소비재 가격을 이용하여 측정한다. 이 경우 기업은 CO_2 감축에 따른 한계편익과 한계비용이 같아지는 지점에서 CO_2 감축수준을 결정하게 된다. 환경부문과 관련된 함수는 생산성 피해함수를 제외하고 Heutel (2012)에서 사용한 함수를 가정하였다. 따라서 CO_2 감축비용의 산출량(y)에 대한 비율은 CO_2 감축비율(μ)에 대해 단조 증가하는 볼록함수를, CO_2 배출은 CO_2 배출탄력성 ($1 - \gamma$)과 CO_2 감축비율, 그리고 산출량에 의해 결정되는 함수를 가정하였다. 생산성 피해함수는 Golosov et al. (2014)에서 제시한 자연지수함수의 형태를 사용하였다.

DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy)⁹⁾를 비롯해 기후변화문제를 다루는 많은 모형들은 CO_2 스톡이 생산성에 미치는 효과가 2단계를 통해 발생한다고 가정하였다. CO_2 가 배출되면 이를 통해 축적된 CO_2 스톡이 기온을 상승시키고, 이는 다시 생산성에 영향을 미친다. 식 (8), (9)는 DICE-2007에서 설정한 CO_2 , 기온, 그리고 생산성 피해 간의 관계를 보여준다.

$$T_t = T(S_t) = \lambda \cdot \ln\left(\frac{S_t}{S}\right) / \ln 2 \quad (8)$$

7) 이러한 가정은 경제 내에 무수히 많은 동질적인 기업들이 존재한다는 가정을 추가함으로써 정당화될 수 있다. 기업들이 무수히 많기 때문에 한 기업이 배출하는 CO_2 배출은 CO_2 스톡의 증가에 크게 영향을 미치지 못하고, 각 기업들은 이를 무시하는 결정을 내린다고 가정을 한다. 따라서 대표기업도 CO_2 스톡을 주어진 변수로 보고 이윤극대화를 추구하게 된다. 이와 같은 가정은 Heutel (2012), 정윤경, 이지웅(2014), Ramezani et al. (2016) 등에서도 이미 도입된 바 있다.

8) 본고에서는 CO_2 스톡이 생산성에 피해를 준다고 가정하였지만, CO_2 의 배출로 인한 피해가 환경의 질(스톡변수)을 통해 가계의 효용에 영향을 미친다는 가정 하에 분석할 수도 있다. 본 논문에서는 Ramsey의 자비로운 사회 관리자의 가정을 이용한 모형과 다르게 경제주체들이 의사결정 과정에서 CO_2 스톡(혹은 환경의 질 스톡)을 고려하지 않기 때문에 어떠한 가정을 이용하든 분석결과에 큰 차이가 발생하지 않는다. 부록에 환경의 질을 이용한 모형의 균형조건(Angelopoulos et al.(2013)을 참고하여 모형을 수정)과 주요 분석결과를 수록하였으며, 본문의 결과와 크게 다르지 않음을 확인하였다.

9) DICE는 Nordhaus가 기후변화와 경제를 통합하여 분석하기 위해 개발한 것으로서 전통적인 Ramsey 성장모형에 탄소부문과 온도부문을 추가한 모델이다(채여라 외(2016)).

$$1 - D_N(T_N) = \frac{1}{1 + \Theta_2 \cdot T_t^2} \quad (9)$$

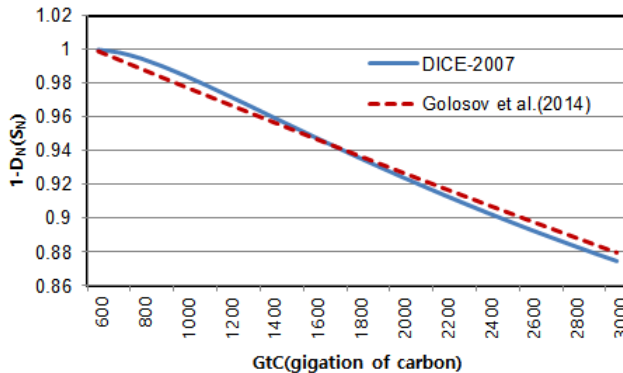
식 (8)과 (9)에서 T 는 현재 지구의 평균기온에서 산업화 이전의 평균기온을 뺀 값을 나타내며, S 는 대기 중의 CO_2 스톡을 의미한다. 그리고 \bar{S} 는 산업화 이전의 대기 중의 CO_2 스톡(581(GtC, gigaton of carbon))을 나타내며, D_N 은 기온이 상승함에 따라 생산성이 감소하는 비율을 나타낸다. 마지막으로 λ 와 Θ_2 는 설명변수가 종속변수에 미치는 효과의 규모를 결정짓는 모수들이다.

한편 Golosov et al. (2014)은 식 (10)과 같은 형태의 자연지수함수를 이용하여 CO_2 스톡과 생산성 피해와의 관계를 기온의 역할을 생략한 채 DICE-2007의 방법과 유사하게 표현할 수 있음을 보였다.

$$1 - D_N(S_N) = \exp(-\chi \cdot (S_t - \bar{S})) \quad (10)$$

또한 자연지수함수를 이용함에 따라 DICE-2007에서 사용하는 생산성 피해함수의 단점을 보완할 수 있다고 주장하였다. <그림 1>은 DICE-2007과 Golosov et al. (2014)의 모형에서 CO_2 스톡이 생산성에 미치는 피해 정도($1 - D_N(S_N)$)를 비교하여 보여주고 있다.

<그림 1> DICE-2007과 Golosov et al.(2014)의 생산성 피해함수 비교



주) Golosov et al. (2014)의 예를 참고하여 $\lambda=3$, $\Theta_2=0.0028388$, $\chi=0.000053$ 을 대입한 결과임.

<그림 1>에서 볼 수 있듯이 DICE-2007의 경우 CO_2 스톡의 축적이 적은 부분에서는 함수가 오목한 형태를 보이는 반면, CO_2 스톡이 많이 축적될수록 볼록한 형태로 전환된다. 하지만 Golosov et al. (2014)에서 사용한 자연지수함수는 CO_2 스톡과 관계없이 선형에 가까움을 확인할 수 있다. Golosov et al. (2014)은 구간에 관계없이 유사한 한계효과가 적용되는 자연지수함수가 DICE-2007의 방법보다 생산성 피해함수로써 더 합리적이라고 주장하였다. 이러한 주장을 받아들여 본고에서는 생산성 피해함수로 자연지수함수의 형태를 이용하였고, 모수의 캘리브레이션을 위해서는 채여라 외(2012)의 결과를 참고하였다. 채여라 외(2012)는 PAGE (Policy Analysis of Greenhouse Effect)09¹⁰⁾를 이용하여 우리나라가 온실가스 감축을 위해 정책적인 노력을 하지 않을 경우(NO action 시나리오) 2020년의 생산성 피해의 규모가 GDP 대비 0.34% 발생할 것으로 예측하였다. 따라서 본고에서는 탄소세가 부과되지 않은 경우 균제상태의 생산성 피해가 0.34%가 되도록 모수를 모형 내에서 계산하였다. 이 밖에 기업의 생산함수는 경제모형 시뮬레이션에서 흔히 사용하는 콥-더글라스(Cobb-Douglas) 생산함수를 가정하였다.

$$Max \Pi_t = y_t - \tau_t^{em} \cdot em_t - r_t \cdot k_t \cdot u_t - w_t \cdot h_t - z_t \quad (11)$$

s.t.

$$y_t = (1 - d(x_{t+1})) \cdot a_t \cdot (k_t \cdot u_t)^\theta \cdot (h_t)^{1-\theta} \quad (12)$$

$$z_t = \theta_1 \cdot \mu_t^{\theta_2} \cdot y_t, \theta_1 > 0, \theta_2 > 1 \quad (13)$$

$$em_t = (1 - \mu_t) \cdot y_t^{1-\gamma} \quad (14)$$

$$1 - d(x_{t+1}) = \exp(-\Psi \cdot x_{t+1}) \quad (15)$$

10) PAGE모형은 유럽집행위원회 환경부(Directorate General Environment)에서 개발된 지구온난화 문제를 다루기 위한 의사결정용 컴퓨터 시뮬레이션 모형이다(채여라 외 (2012)).

3. 1계조건

가계의 효용극대화 문제와 기업의 이윤극대화 문제를 라그랑지 함수를 이용하여 풀게 되면 다음의 6개의 균형조건을 추가로 도출할 수 있다.

$$c_t = \frac{w_t \cdot (1 - h_t)}{b} \quad (16)$$

$$\beta \cdot E_t \frac{1}{c_{t+1}} \cdot \left\{ r_{t+1} \cdot u_{t+1} + 1 - \frac{\phi_0}{\phi_1} \cdot u_{t+1}^{\phi_1} - p_{t+1} \cdot \frac{en_{t+1}}{k_{t+1}} \right\} = \frac{1}{c_t} \quad (17)$$

$$\phi_0 \cdot u_t^{\phi_1 - 1} \cdot k_t + p_t \cdot \gamma_0 \cdot u_t^{\gamma_1 - 1} \cdot k_t = r_t \cdot k_t \rightarrow \phi_0 \cdot u_t^{\phi_1} + p_t \cdot \gamma_0 \cdot u_t^{\gamma_1} = r_t \cdot u_t \quad (18)$$

$$\frac{\theta \cdot y_t}{k_t \cdot u_t} \cdot \left\{ 1 - \tau_t^{em} \cdot (1 - \mu_t) \cdot (1 - \gamma) \cdot y_t^{-\gamma} - \theta_1 \cdot \mu_t^{\theta_2} \right\} = r_t \quad (19)$$

$$\frac{(1 - \theta) \cdot y_t}{h_t} \cdot \left\{ 1 - \tau_t^{em} \cdot (1 - \mu_t) \cdot (1 - \gamma) \cdot y_t^{-\gamma} - \theta_1 \cdot \mu_t^{\theta_2} \right\} = w_t \quad (20)$$

$$\tau_t^{em} \cdot y_t^{1 - \gamma} = \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot \mu_t^{\theta_2 - 1} \cdot y_t \quad (21)$$

식 (16)~(18)은 가계의 효용극대화 조건을, 식 (19)~(21)은 기업의 이윤극대화 조건을 나타내고 있다. 식 (16)은 가계의 노동공급을 결정하는 기간 내 오일러 방정식이고, 식 (17)은 가계의 소비와 저축규모를 결정하는 기간 간 오일러 방정식에 해당된다. 한편 식 (18)은 최적 자본 가동률의 결정조건으로서 좌변은 가동률 증가에 따른 감가상각과 에너지 비용의 한계 증가분을 나타내고, 우변은 가동률 증가에 따른 대역료 수입의 한계 증가분에 해당된다. 식 (19), (20)은 기업의 요소투입 결정과 관련된다. 일반적인 모형에서 사용되는 바와 마찬가지로 기업은 요소투입의 한계생산물(좌변)과 한계비용(우변)이 일치하는 수준에서 투입량을 결정한다. 동 모형과 같이 탄소세가 도입된 경우 그렇지 않

은 경우와 비교하여 자본서비스와 노동의 한계생산물이 하락하게 되고, 이에 따라 두 요소의 투입을 줄이게 된다. 식 (21)은 기업이 이윤극대화를 위해 CO_2 감축비율 결정에 사용하는 필요조건이다. 좌변은 감축비율 증대에 따른 조세지출의 한계감축을 나타내고, 우변은 감축비율 증대를 위한 한계비용을 의미한다.

4. 정부부문

정부는 기업에게 온실가스 감축목표($target$)에 따라 탄소세를 부과하며, 시나리오별로 탄소세를 부과하는 방식이 다르다. 우선 시나리오 1은 정부가 해당 기간에 기업이 CO_2 감축비율을 일정하게 유지하도록 유도하는 탄소세율을 부과한다. 식 (22)에서 μ^{target} 은 규제상태에서 온실가스 감축목표가 달성될 때의 기업의 CO_2 감축비율이다.¹¹⁾¹²⁾

시나리오 1

$$\tau_t^{em} \cdot y_t^{1-\gamma} = \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot (\mu^{target})^{\theta_2-1} \cdot y_t \rightarrow \tau_t^{em} = \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot (\mu^{target})^{\theta_2-1} \cdot y_t^\gamma \quad (22)$$

반면 시나리오 2는 시나리오 1에서의 탄소세율의 규제상태(steady state)의 값을 분석 기간 동안 지속적으로 부과하는 것으로 설정하였다.

시나리오 2

$$\tau_t^{em} = (\tau^{em})^* = \text{규제상태의 탄소세율} \quad (23)$$

-
- 11) 온실가스 감축목표를 직접 식 (21)에 대입(μ_t 대신에 $target$ 을 대입)하여 구한 CO_2 배출량(규제상태의 값)은 온실가스 감축목표를 달성한 경우의 CO_2 배출량(규제상태의 값)과 정확히 일치하지 않는다. 따라서 탄소세가 도입되지 않은 경우의 CO_2 배출량(규제상태의 값)을 기준으로 온실가스 감축목표별 CO_2 배출량(규제상태의 값)을 구하고, 이 값을 이용하여 μ^{target} 을 구하였다.
- 12) 시나리오 1에서 탄소세율의 경기변동성은 식 (22)에 따라 CO_2 배출탄력성($1-\gamma$)에 의해 결정된다. 본고에서는 배출탄력성을 1보다 작은 값으로 설정하였기 때문에 γ 가 양(+)수가 되고 탄소세율은 외 부충격에 대해 경기순응성을 보이게 된다.

따라서 시나리오 1에서의 탄소세율은 기간에 따라 변하는 내생변수의 역할을 하지만, 시나리오 2에서의 탄소세율은 분석기간 동안 변하지 않는 모수의 역할을 한다. 그리고 두 개의 시나리오 모두 탄소세 도입으로 확보된 세수는 가계로 이전시킨다고 가정하였다.

5. 환경부문

Golosov et al. (2014)은 두 가지 종류의 CO_2 스톡이 존재한다고 가정하였다. 첫째는 CO_2 가 배출되어 대기 중에 영구적으로 남아있는 경우이고, 둘째는 시간이 지남에 따라 희석되는 경우이다. 이러한 가정이 현실적이라고 판단되나 전자의 경우 CO_2 스톡의 균제상태가 존재하지 않는다. 본고는 변수들을 균제상태 근방에서 근사화하여 분석하는 방법을 이용하므로, 식(24)와 같은 Heutel (2012)의 CO_2 스톡의 변화를 가정하였다. 대신 CO_2 의 반감기(half life)는 Golosov et al. (2014)을 참고하여 30년을 가정하고 η 를 계산하였다.

$$x_{t+1} = \eta \cdot x_t + em_t + em^{row} \quad (24)$$

식(24)에서 em^{row} 는 국내를 제외한 전 세계의 CO_2 배출을 나타내며, η 는 CO_2 스톡의 감소비율을 의미한다. em^{row} 는 안상기(2015)를 참고하여 온실가스 감축목표가 0%일 때 우리나라 CO_2 배출(균제상태의 값)에 49배를 한 값을 가정하였다.¹³⁾

6. 외부충격

본고에서는 총요소생산성(a) 충격과 에너지가격(p) 충격 두 가지를 고려하였으며, 이 둘은 서로 독립적인 확률과정을 따른다고 가정한다.

$$\ln a_{t+1} = \rho_a \cdot \ln a_t + \sigma_a \cdot \epsilon_{at}, \epsilon_{at} \sim i.i.d. \quad N(0, 1) \quad (25)$$

$$\ln p_{t+1} = \rho_p \cdot \ln p_t + \sigma_p \cdot \epsilon_{pt}, \epsilon_{pt} \sim i.i.d. \quad N(0, 1) \quad (26)$$

13) 안상기(2015)는 2011년도 IEA (International Energy Agency) 통계자료를 이용하여 em^{row} 값을 설정하였다. 이에 따르면 우리나라의 CO_2 배출량은 전 세계 CO_2 배출량의 약 2%를 차지한다.

7. 모수설정

본고에서는 기존의 연구에서 사용한 모수 값을 기준으로 사용하여 분석하였다. 자본 서비스 소득 분배율(θ), 여가선호율, 그리고 효율할인인자는 황문성 외(2009)에서 추정 한 값을 사용하였다. 황문성 외(2009)는 1인당 실질 총산출, 1인당 실질 GDP, 1인당 실 질 민간소비, 그리고 인구(20~64세) 대비 취업자 수의 자료(1970년~2007년)를 이용하 여 Bayesian방법으로 모수를 추정하였는데, 본고는 단위 기간이 분기이기 때문에 효용 할인인자의 경우 분기를 기준으로 환산한 값을 사용하였고, 나머지 값은 그대로 적용시 켰다. 그리고 감가상각률 함수, 자본가동률 함수, 외부충격과 관련된 모수는 차경수 (2009)에서 추정된 값을 이용하였다. 차경수(2009)도 1인당 실질 GDP, 1인당 원유소비 량, 제조업 가동률 지수 자료(1980년 1분기~2008년 4분기)를 이용하여 Bayesian방법으 로 모수를 추정하였다. 마지막으로 CO_2 감축비용함수의 모수, 그리고 CO_2 배출탄력성 은 안상기(2015)를 참고하였다. 안상기(2015)는 CO_2 감축비용함수와 관련된 모수를 환경부(2014)의 자료를 이용하여 추정하였으며, CO_2 배출탄력성은 한국은행의 실질 GDP자료와 IEA의 CO_2 배출자료를 이용하여 HP(Hodrick-Prescott) 필터를 통해 추정하 였다. <표 1>은 본고에서 사용된 모수 값과 이를 차용해온 문헌의 출처를 보여주고 있다.

〈표 1〉 모수설정

모수	값	출처
θ	0.555	황문성 외(2009)
β	0.9962	
b	0.428	
γ_0	0.02769	차경수(2009)
γ_1	1.70162	
ϕ_0	0.07780	
ϕ_1	1.07321	
ρ_a	0.97765	
ρ_p	0.97845	

〈표 1〉 모수설정 (Continued)

모수	값	출처
σ_a	0.00525	차경수(2009)
σ_p	0.08936	
θ_1	0.0339	안상기(2015)
θ_2	1.5848	
$1 - \gamma$	0.8709	
η	0.9942	30년의 CO_2 반감기를 적용
ψ	7.3647E-08	모형 내에서 계산

8. 모형의 해

동태·확률적 일반균형모형은 분석을 위해 균형조건을 행렬에 표현한 후 경제주체들의 합리적 의사결정을 반영하여 상태-공간(state-space)모형으로 전환시키는 과정이 필요하다. 이를 위해 본고에서는 각 변수들을 1차 테일러전개를 이용하여 균제상태에서의 로그-선형(log-linearization) 근사화한 후 Klein (2000)이 제시한 complex generalized Schur decomposition을 이용하였다.

IV. 충격반응분석

본 장에서는 총요소생산성 및 에너지가격이 균제상태로부터 1%p 상승하는 충격이 가해졌을 때 주요 변수들의 반응경로를 살펴보았다. 0기에 충격이 발생하고 이후 100분기를 고려하였으며, 온실가스 감축목표는 현재 우리나라가 설정한 기준배출량 대비 37%를 가정하였다.

1. 총요소생산성

총요소생산성에 양(+)의 충격이 발생할 경우 거시경제변수들은 두 개의 시나리오 모두 전통적인 실물적 경기변동모형과 크게 다르지 않은 반응경로를 보여주었으며, 시나리오 간에 유의미한 차이도 발생하지 않았다. <그림 2>는 총요소생산성에 대한 시나리오

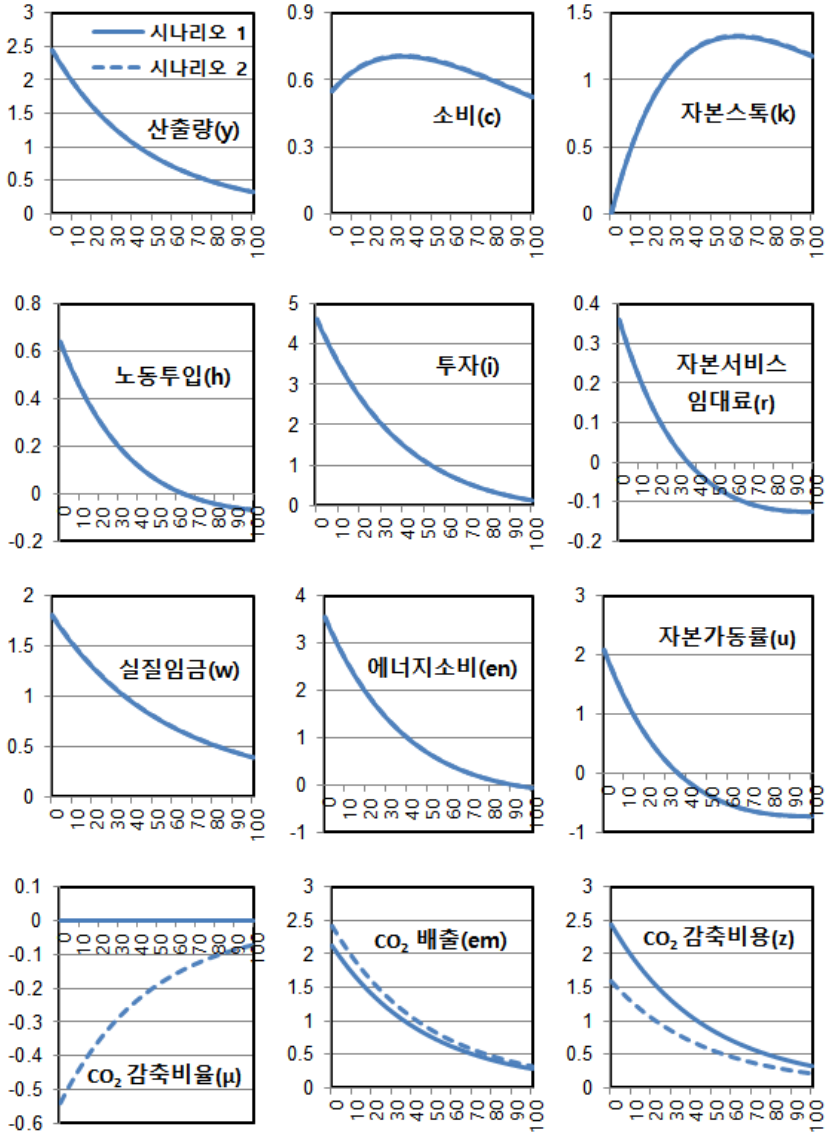
오별 충격반응함수를 보여주고 있다. 자본서비스와 노동의 한계생산성이 증가하면서 기업의 자본서비스 및 노동에 대한 수요가 증가하게 된다. 이에 따라 임대료와 실질임금이 상승하고, 가계는 투자와 노동공급을 증가시키게 된다. 전체적인 경기가 활기를 띠며 산출량이 증가하고, 가계의 소비도 증가하게 된다. 한편 자본가동률은 식(18)에 따라 외부충격이 발생하였을 경우 에너지가격과 자본서비스 임대료의 영향을 받는다. <그림 2>는 중요소생산성의 충격에 대한 변수들의 반응경로를 보여주므로, 외생적 변수로 가정된 에너지가격은 분석기간 동안 고정된 값을 갖는다. 따라서 자본가동률은 자본서비스 임대료의 영향만을 받게 되고 동일한 방향으로 반응하게 된다. 즉 두 변수 모두 충격발생 직후 증가하지만, 이후 지속적으로 하락하여 이후 36분기부터 균제상태보다 작은 값을 갖는다. 에너지소비는 식(3)과(4)에 의해 자본가동률과 자본스톡의 영향을 받아 91분기까지 균제상태보다 큰 값을 갖지만 이후 작은 값으로 전환된다.

환경변수들은 두 가지 시나리오 모두 CO_2 배출이 증가하는 방향으로 반응을 하였지만 시나리오 간에 차이가 발생하였다. 특히 CO_2 감축비율이 시나리오 1의 경우 충격이 발생하더라도 균제상태를 벗어나지 않는 반면, 시나리오 2에서는 약 0.54%p 하락하였다가 다시 균제상태로 수렴하는 모습을 보이고 있다. 이러한 현상은 식(21), (22), 그리고 식(23)을 통해 설명할 수 있다. 앞서 설명하였듯이 식(21)은 CO_2 감축에 대한 한계편익과 한계비용이 같아지는 지점에서 CO_2 감축이 결정된다고 하는 기업의 이윤극대화 조건을 의미한다. 동 식의 좌변은 CO_2 감축에 따른 기업의 한계편익을 나타내며, 우변은 한계비용을 의미한다. 시나리오 1의 경우 탄소세율은 모수가 아닌 내생변수에 해당되기 때문에 외부충격이 발생할 경우 정부는 기업이 일정한 CO_2 감축비율을 유지하도록 탄소세율을 조정하게 된다. 구체적으로 식(21)과(22)를 CO_2 감축비율과 μ^{target} 에 대해 표현하면 두 식이 같음을 확인할 수 있다.

$$\mu_t = \left(\frac{\tau_t^{em}}{\theta_1 \cdot \theta_2 \cdot y_t^\gamma} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}} \quad (27)$$

$$\mu^{target} = \left(\frac{\tau_t^{em}}{\theta_1 \cdot \theta_2 \cdot y_t^\gamma} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}} \quad (28)$$

〈그림 2〉 중요소생산성에 대한 충격반응함수



주) 세로축 : 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축 : 기간(분기)

μ^{target} 은 분석기간 동안 변하지 않고, 이에 따라 CO_2 감축비율도 외부충격이 발생하더라도 균제상태의 값을 유지하게 된다. 그리고 CO_2 배출은 CO_2 감축비율이 변하지 않으므로 식 (14)에 따라 산출량 증가율에 CO_2 배출탄력성을 곱한 비율만큼 반응하게 되고, CO_2 감축비용은 식 (13)에 의해 산출량과 동일한 반응경로를 보이게 된다.

다음으로 시나리오 2에서 탄소세율은 기간과 관계없이 일정하다. 따라서 식 (21), (23)에 따라 한계편익의 변화는 $y^{1-\gamma}$ 의 변화에 따라 결정되고, 한계비용의 변화는 y 의 변화에 의존하게 된다. 그런데 CO_2 배출탄력성은 1보다 작으므로 총요소생산성에 양(+)의 충격이 발생할 경우 CO_2 감축에 따른 한계편익의 증가율이 한계비용의 증가율에 미치지 못하게 된다. 따라서 기업은 이윤극대화 조건을 충족시키기 위해 CO_2 감축비율을 줄임에 따라, 시나리오 1의 경우보다 CO_2 배출은 늘고 CO_2 감축비용은 줄게 된다.

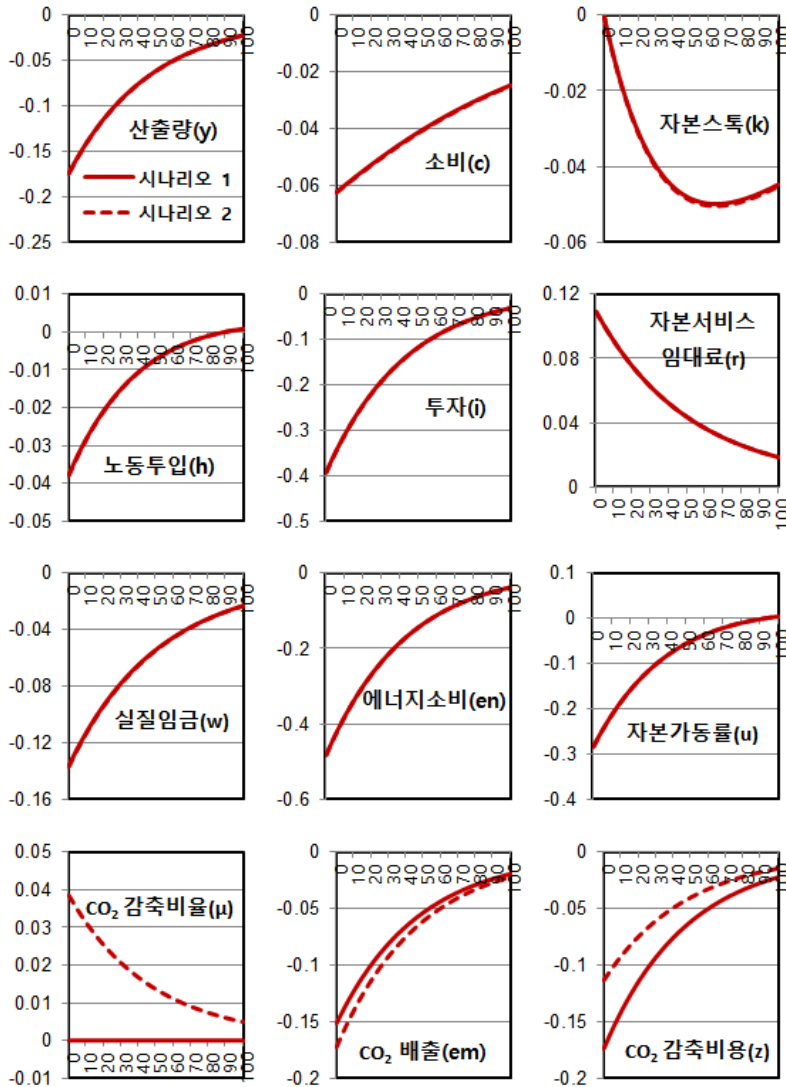
2. 에너지가격

에너지가격 상승 충격은 대부분의 거시경제변수들에게 부정적인 영향을 미친다. <그림 3>은 에너지가격에 대한 충격반응함수를 보여주고 있다. 실질 에너지가격이 상승하게 되면 가계는 해외 에너지시장으로부터 구매하는 에너지의 규모를 줄이게 된다. 그러면 자본 1단위당 결합되는 에너지의 비율도 감소하게 되고 식 (3), (4)에 의해 자본가동률이 하락하게 된다. 이와 같은 자본서비스 공급의 하락은 자본서비스의 가격인 임대료를 상승시킨다. 가계의 투자는 자본서비스 임대료가 상승함에 따라 늘릴 유인이 생기지만, 기업이 에너지와 결합되는 자본의 수요를 줄임에 따라 오히려 감소하게 된다. 경기가 전체적으로 위축됨에 따라 산출량이 감소하고, 가계도 소비를 줄이게 되며 기업의 노동에 대한 수요도 줄어들게 된다. 하지만 그 파급효과의 규모는 총요소생산성의 상승으로 인한 효과보다 크지 않은 것으로 나타났으며, 시나리오 간의 차이는 크게 발생하지 않았다. 변수별로 살펴보면 에너지소비, 투자, 자본가동률, 산출량은 비교적 감소율이 큰 반면 소비, 자본스톡, 노동투입은 감소율이 크지 않은 것으로 나타났다.

환경변수들은 대기오염을 개선시키는 방향으로 반응을 하게 되는데, 총요소생산성의 경우와 마찬가지로 시나리오 간에 차이가 발생하였다. 시나리오 1에서는 정부가 외부충격과 무관하게 기업이 CO_2 감축비율을 일정하게 유지하도록 탄소세율을 조정하

기 때문에, 감축비율은 에너지가격 상승 충격에도 반응하지 않는다. 반면 시나리오 2의 경우에는 에너지가격이 상승하면 산출량이 줄어들게 되고, CO_2 감축에 따른 한계편익의 감소율이 한계비용의 감소율보다 작게 된다. 이에 따라 기업은 총요소생산성의 경우

〈그림 3〉 에너지가격에 대한 충격반응함수



주) 세로축: 균제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

와는 반대로 CO_2 감축비율을 늘리고, 시나리오 1의 경우보다 CO_2 배출을 줄임으로써 이윤극대화 조건을 충족시키게 된다. 그리고 식 (13)에 따라 CO_2 감축비용은 시나리오 1에서 산출량과 동일한 동학을 보이며, 시나리오 2에서는 이보다 감소율이 작게 나타난다. CO_2 배출과 감축비용의 감소율은 다른 변수들과 마찬가지로 총요소생산성의 경우보다 규모가 작게 발생하는 것으로 나타났다.

V. 민감도 분석

본 장에서는 CO_2 배출탄력성과 온실가스 감축목표가 변화함에 따라 CO_2 배출의 반응이 어떻게 나타나는지 시나리오별로 살펴보았다. CO_2 배출탄력성은 0.5, 1, 그리고 1.5인 경우를, 온실가스 감축목표는 25%, 50%, 그리고 75%인 상황을 고려하였다. IV장에서와 마찬가지로 총요소생산성과 에너지가격이 균제상태로부터 1%p 상승하는 충격이 가해졌을 때 변수들의 반응경로를 살펴보았다. 분석기간도 IV장과 마찬가지로 0기에 충격이 발생한 후 100분기를 고려하였다. 또한 민감도 분석 시 변하는 모수를 제외한 다른 모수들은 IV장에서 사용한 값을 적용하였다.

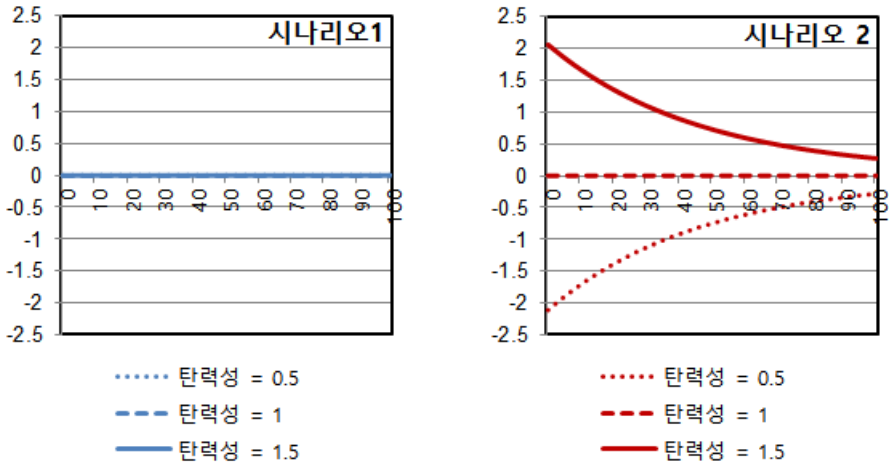
1. 총요소생산성

1) CO_2 배출탄력성에 대한 민감도 분석

<그림 4>는 CO_2 배출탄력성별 CO_2 감축비율의 % 변화를, <그림 5>는 CO_2 배출탄력성별 CO_2 배출의 % 변화를 보여주고 있다. 우선 시나리오 1의 민감도 분석결과를 살펴보면 IV장에서 살펴보았듯이 총요소생산성에 양(+)의 충격이 발생 할 경우 CO_2 감축비율은 균제상태에서 벗어나지 않는다. 따라서 식 (14)에 따라 CO_2 배출탄력성이 커질수록, CO_2 배출의 증가율도 커짐을 볼 수 있다. 반면 시나리오 2의 경우에는 CO_2 배출탄력성이 1보다 클 때 기업이 CO_2 감축비율에 변화를 주지 않으면 CO_2 감축에 따른 한계편익이 한계비용보다 커지고, 1보다 작으면 한계비용이 한계편익보다 커짐을 IV장에서 확인하였다. 따라서 기업은 이윤극대화 조건을 만족시키기 위해 CO_2 배출탄력성이 1보다 클 경우 CO_2 감축비율을 늘리고, 배출탄력성이 1보다 작을 경우에는 반대의 행태

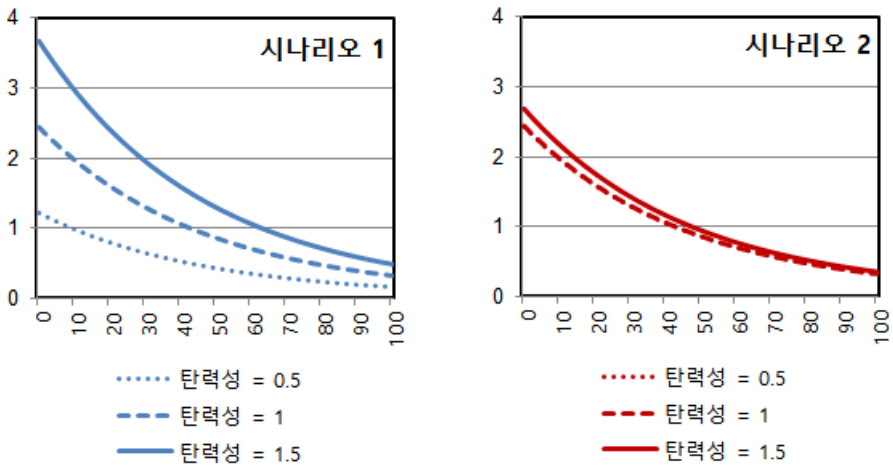
를 보인다. CO_2 배출탄력성이 클수록 CO_2 감축비율은 증가하지만 이와 더불어 산출량 1단위당 배출시키는 CO_2 량도 증가한다. 이 두 효과가 서로 상쇄되어 시나리오 2에서의 CO_2 배출은 시나리오 1과 비교하여 비탄력적인 반응을 보이게 된다.

〈그림 4〉 CO_2 배출탄력성별 CO_2 감축비율의 민감도 분석 1(중요소생산성)



주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈그림 5〉 CO_2 배출탄력성별 CO_2 배출의 민감도 분석 1(중요소생산성)



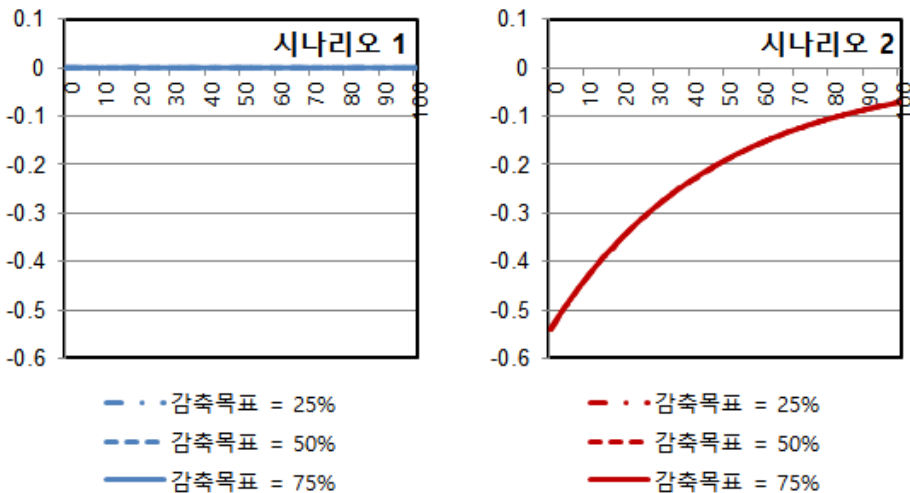
주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

2) 온실가스 감축목표에 대한 민감도 분석

<그림 6>은 온실가스 감축목표별 규제상태 대비 CO_2 감축비율의 % 변화를 나타내며, <그림 7>은 CO_2 감축비율 수준의 변화를 보여주고 있다. 그리고 <그림 8>은 온실가스 감축목표별 CO_2 배출의 % 변화를 보여주고 있다. 온실가스 감축목표에 대한 민감도 분석에서도 시나리오 1의 CO_2 감축비율은 외부충격에 반응하지 않는다. 또한 온실가스 감축목표와 관계없이 CO_2 배출탄력성은 일정하다. 따라서 CO_2 배출은 온실가스 감축목표와 관계없이 산출량 증가율에 CO_2 배출탄력성을 곱한 수치만큼 증가하게 된다.

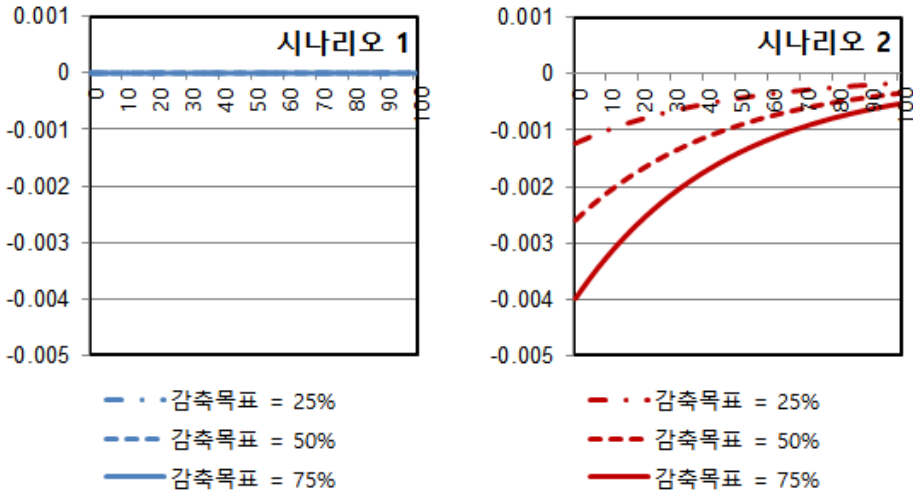
한편 시나리오 2의 경우를 살펴보면 모든 경우에 CO_2 배출탄력성은 일정하며, 이 수치는 1보다 작다(0.8709). 이에 따라 온실가스 감축목표와 관계없이 모두 같은 비율로 CO_2 감축비율을 줄이게 된다. 하지만 온실가스 감축목표에 따라 CO_2 감축비율의 규제상태의 값은 다르기 때문에 실제로 기업이 줄이는 CO_2 감축비율은 경우에 따라 차이가 발생한다. 온실가스 감축목표가 강화될수록 CO_2 감축비율의 규제상태의 값도 커지게 되고, 이에 따라 CO_2 배출의 증가율도 커지는 현상을 보이게 된다.

<그림 6> 온실가스 감축목표별 CO_2 감축비율의 민감도 분석 1(총요소생산성)



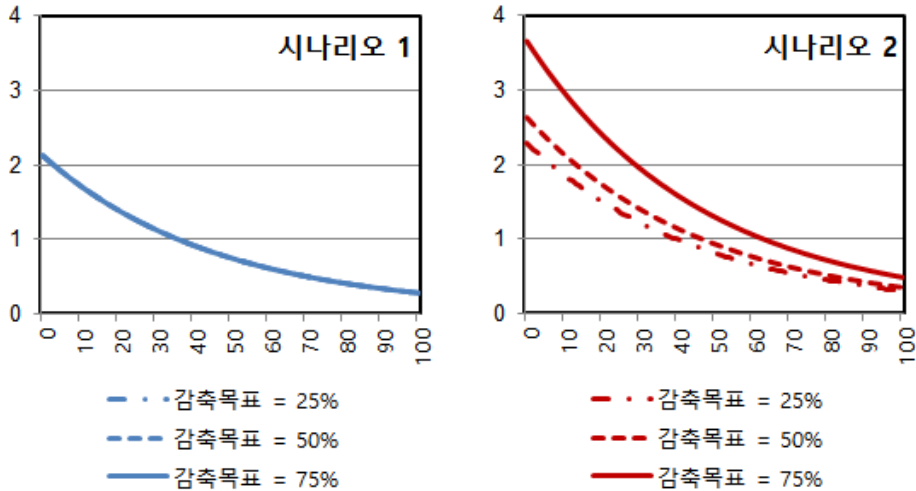
주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈그림 7〉 온실가스 감축목표별 CO₂ 감축비율의 민감도 분석 2(총요소생산성)



주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 실제 값, 가로축: 기간(분기)

〈그림 8〉 온실가스 감축목표별 CO₂ 배출의 민감도 분석(총요소생산성)



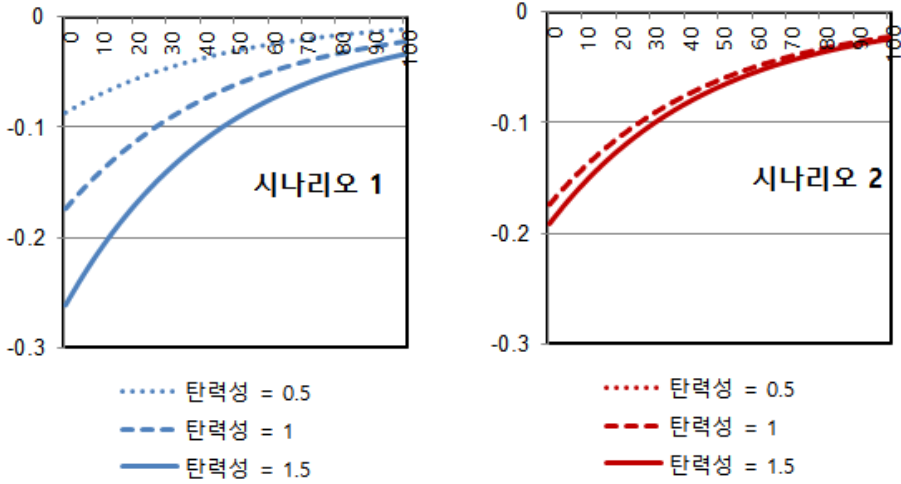
주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

2. 에너지가격

에너지가격 충격에 대한 민감도 분석은 IV장에서 살펴보았듯이 에너지가격이 상승

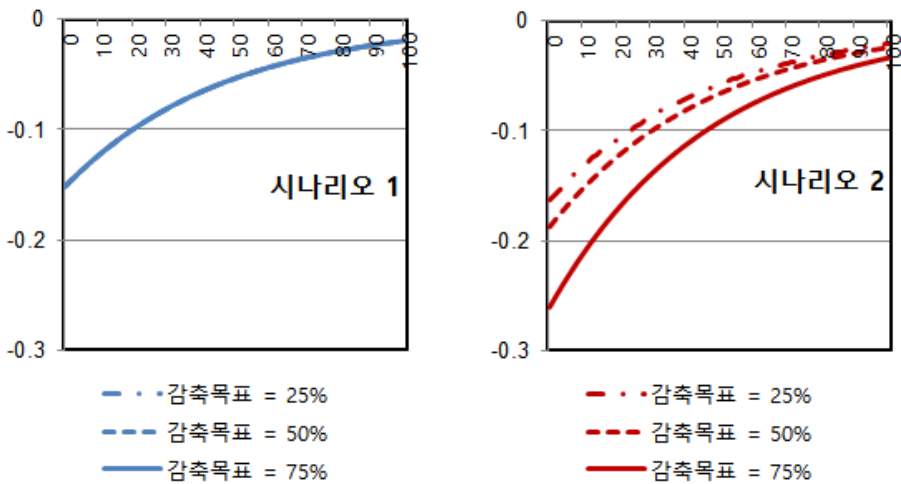
함에 따라 산출량은 감소하므로, CO_2 배출의 반응이 중요소생산성의 경우와는 반대로 나타났다. 그리고 중요소생산성 충격에 비해 그 규모는 작은 것으로 나타났다.

〈그림 9〉 CO_2 배출탄력성별 CO_2 배출의 민감도 분석(에너지가격)



주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈그림 10〉 온실가스 감축목표별 CO_2 배출의 민감도 분석(에너지가격)



주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

VI. 모형 시뮬레이션

본 장에서는 모형 시뮬레이션을 통해 시나리오별로 온실가스 감축목표에 따라 주요 변수들의 평균과 표준편차가 얼마만큼 차이가 발생하는지를 살펴보았다. 분석기간은 100분기를 고려하였으며, 주어진 확률과정 하에서 10,000번의 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 각 시뮬레이션 결과 생성된 변수들의 평균과 표준편차의 합을 시뮬레이션 횟수로 나눈 값을 시나리오별로 비교하였다. <표 2>와 <표 3>은 주요 변수들의 시나리오별 변동성의 차이를 나타내고 있다.

분석결과 각 변수들의 평균은 시나리오 간에 유의미한 차이를 발견하지 못하였다. 변수의 변동성의 크기를 나타내는 표준편차도 거시경제변수들 간에는 큰 차이가 없었으나, CO_2 감축비용, CO_2 배출, 그리고 CO_2 스톡은 시나리오 간에 큰 차이를 보였다.

<표 2> 주요 변수들의 시나리오별 변동성 차이(1)

온실가스 감축목표	소비 (c)	산출량 (y)	투자 (i)	자본스톡 (k)	노동투입 (h)
10%	0.07%	0.22%	0.24%	0.23%	0.50%
20%	0.20%	0.31%	0.36%	0.41%	0.67%
30%	0.36%	0.35%	0.46%	0.59%	0.71%
40%	0.57%	0.36%	0.54%	0.79%	0.66%
50%	0.81%	0.35%	0.61%	1.00%	0.53%
60%	1.09%	0.31%	0.67%	1.22%	0.33%
70%	1.40%	0.25%	0.71%	1.46%	0.07%
80%	1.74%	0.17%	0.76%	1.71%	-0.25%
90%	2.12%	0.08%	0.79%	1.99%	-0.01%

주) 시나리오 1 대비 시나리오 2의 표준편차의 증감률(%)로 표시함.

<표 3> 주요 변수들의 시나리오별 변동성 차이(2)

온실가스 감축목표	CO_2 감축비용(z)	CO_2 배출(em)	CO_2 스톡(x)	에너지소비 (en)	자본가동률 (u)
10%	-34.84%	2.56%	2.56%	0.21%	0.21%
20%	-34.78%	5.86%	5.87%	0.30%	0.29%

〈표 3〉 주요 변수들의 시나리오별 변동성 차이(2) (Continued)

온실가스 감축목표	CO_2 감축비용(z)	CO_2 배출(em)	CO_2 스톡(x)	에너지소비 (en)	자본가동률 (u)
30%	-34.76%	10.13%	10.14%	0.34%	0.34%
40%	-34.75%	15.85%	15.86%	0.36%	0.35%
50%	-34.76%	23.88%	23.90%	0.35%	0.34%
60%	-34.78%	35.98%	36.01%	0.32%	0.31%
70%	-34.82%	56.20%	56.24%	0.27%	0.26%
80%	-34.87%	96.76%	96.82%	0.21%	0.20%
90%	-34.93%	218.69%	218.80%	0.13%	0.12%

주) 시나리오 1 대비 시나리오 2의 표준편차의 증감률(%)로 표시함.

CO_2 감축비용은 시나리오 1에서, 그리고 CO_2 배출과 CO_2 스톡은 시나리오 2에서 변동성이 큰 것으로 나타났다. 또한 시나리오 간의 CO_2 감축비용의 변동성 증감률은 온실가스 감축목표와 크게 관계없는 것으로 나타났으나, CO_2 배출과 CO_2 스톡은 온실가스 감축목표가 강화될수록 시나리오 간의 증감률도 커지는 것으로 분석되었다. 이에 따라 온실가스 감축목표가 60% 이상이 되면 두 변수들의 시나리오 간의 증감률(절대치)이 CO_2 감축비용의 증감률(절대치)을 넘어서는 것으로 나타났다.

VII. 결론

본 논문은 Heutel (2012)의 모형을 기반으로 에너지가격을 외부충격으로 가정하는 Finn (2000)의 방식을 추가한 실물적 경기변동모형을 이용하여 탄소세의 부과방식이 경기변동에 미치는 영향을 분석하였다. 탄소세 부과방식으로는 매 기간 온실가스 감축목표에 따라 대표기업이 CO_2 감축비용을 일정하게 유지하도록 유도하는 탄소세율을 부과하는 방식(시나리오 1)과, 분석기간 동안 시나리오 1에서의 탄소세율의 균제상태의 값을 분석기간 동안 일정하게 부과하는 방식(시나리오 2)으로 구분하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 충격반응분석에 따르면 현재 우리나라가 설정한 온실가스 감축목표와 본고에

서 가정한 CO_2 배출탄력성 하에서 중요소생산성의 상승은 거시경제변수들의 상승을 유발시키는 반면, CO_2 배출도 증가시키는 역할을 하게 된다. 또한 에너지가격의 상승은 산출량의 하락을 유발시켜 중요소생산성의 경우와 반대의 역할을 하게 되지만, 그 규모는 중요소생산성의 경우보다 작은 것으로 나타났다. 또한 외부충격에 대한 CO_2 배출의 반응은 시나리오 1보다, 시나리오 2에서 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

둘째, CO_2 배출탄력성과 온실가스 감축목표가 변함에 따라 CO_2 배출은 시나리오별로 어떻게 반응하는지를 알아보기 위해 민감도 분석을 시행하였다. 시나리오 1의 경우 CO_2 배출탄력성의 변동에 대해 CO_2 배출이 탄력적으로 반응한 반면, 시나리오 2의 경우에는 온실가스 감축목표의 변동에 대해 CO_2 배출이 탄력적으로 반응하는 것으로 나타났다.

마지막으로 모형 시뮬레이션을 통해 두 시나리오 간의 변수들의 변동성을 알아보기 위해 표준편차를 비교하였다. 모형 내의 변수들 중 CO_2 감축비용, CO_2 배출, 그리고 CO_2 스톡의 변동성이 유의미한 차이를 보였는데, CO_2 감축비용은 시나리오 1에서, 그리고 CO_2 배출과 CO_2 스톡은 시나리오 2에서 상대적으로 변동성이 크게 나타났다. 또한 CO_2 배출과 CO_2 스톡은 온실가스 감축목표가 강화될수록 두 시나리오 간의 변동성 증감률은 커지는 것으로 나타났으며, 온실가스 감축목표가 60% 이상이 되면 두 변수들의 증감률(절대치)이 CO_2 감축비용의 증감률(절대치)을 넘어서는 것으로 나타났다.

향후 본 연구를 확장하기 위해서는 다음과 같은 작업이 필요할 것으로 생각된다. 첫째, 본 연구에서는 에너지의 소비를 가계부문에서만 하는 단순한 모형을 사용하였다. 따라서 에너지부문을 따로 구분하고, 연료별로 CO_2 배출량의 산정을 세분화하면 좀 더 현실적인 분석이 가능해질 것으로 판단된다. 둘째, 본 연구에서는 저탄소 제품의 생산을 위한 R&D 투자에 대한 고려가 없었다는 점이 지적될 수 있다. 온실가스 감축정책의 궁극적인 목표가 기업들의 저탄소 제품에 대한 R&D 투자를 유인하는 것에 있음을 감안할 때 이를 모형 내에 반영하는 것이 필요하다. 셋째, 본고에서는 탄소세율의 경기순응성에 초점을 맞추어 분석하였지만, 비대칭적 경기순응과 관련된 현상을 분석할 경우 흥미로운 연구가 될 것으로 생각된다. 마지막으로 현재 우리나라가 배출권거래제를 시행하고 있는 상황임을 고려하여 두 제도의 정책조합에 대한 연구를 할 필요가 있다. 우리나라의

배출권거래제는 배출권의 이월 및 차입을 허용하고 있다. 따라서 기업들의 전략적 선택에 따라 배출권가격의 불확실성이 커질 가능성이 크다. 이는 효과적인 온실가스 감축을 어렵게 만드는 요인이 되며, 이에 대한 보완책으로써의 탄소세 도입을 고려해 볼 필요가 있다.

[References]

- 김성균 · 이지웅, “온실가스 감축 정책의 지역별 파급효과: 탄소세를 중심으로”, 『환경정책』, Vol. 24 No. 2, 2016, pp. 137~171.
- 박형수, “실물적 경기변동모형으로 본 우리나라의 경기변동”, 『경제분석』, Vol. 5, No. 3, 1999, pp. 70~109.
- 법률 제14839호, “온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률”.
- 심성희, “배출권거래제 시행에 따른 우리나라 기업의 대응 및 성장전략 연구”, 에너지경제연구원, 2013.
- 심성희 · 이지웅, “우리나라 배출권거래제의 시장 왜곡 요인과 정책적 함의”, 『에너지경제연구』, Vol. 14, No. 2, 2015, pp. 177~211.
- 안상기, “DSGE 모형을 이용한 온실가스 감축정책의 거시경제 효과 분석”, 서울대학교 농경제사회학부, 박사학위논문, 2015.
- 온실가스종합정보센터, “2016 국가 온실가스 인벤토리 보고서”, 2016.
- 전영준, “녹색성장전략과 경제성장: 탄소연료 사용제한 및 신재생에너지 개발 정책을 중심으로”, 『응용경제』, Vol. 13, No. 1, 2011, pp. 135~174.
- 정용승, “유가충격과 통화정책: 바람직한 통화정책의 모색”, 『한국경제의 분석』, Vol. 19, No. 1, 2013, pp. 179~229.
- 정윤경 · 이지웅, “An Optimal Mix of Greenhouse Gas Reduction Policies in the Dynamic Stochastic General Equilibrium Models”, 에너지경제연구원, 2014.
- 차경수, “실물 경기변동에서 유가충격의 역할에 관한 연구”, 에너지경제연구원, 2009.
- 채여라 · 김용건 · 조광우 · 조현주 · 최성윤, “우리나라 기후변화의 경제학적 분석(III)”, 한국환경정책 · 평가연구원, 2012.

- 채여라·문태훈·김동환·이동성·정수영·이경택, “기후변화 대응역량 강화를 위한 시스템다이내믹스 모델 개발”, 한국환경정책·평가연구원, 2016.
- 환경부, “국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵”, 2014.
- 황문성·박종현·김영민, “기후변화 대응이 우리 경제에 미치는 영향 및 시사점”, 한국은행, 조사통계월보, 2009년 2월호, 2009, pp. 23~62.
- Angelopoulos, K., G. Economides, and A. Philippopoulos, “First-and Second-Best Allocations under Economic and Environmental Uncertainty”, *International Tax and Public Finance*, Vol. 20, No. 3, 2013, pp. 360~380.
- Annicchiarico, B. and F. Di Dio, “Environmental Policy and Macroeconomic Dynamics in a New Keynesian Model”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 69, 2015, pp. 1~21.
- Auerbach, A. and L. Kotlikoff, “Dynamic Fiscal Policy”, Cambridge University Press, 1987.
- Burnside, C. and M. Eichenbaum, “Factor-Hoarding and the Propagation of Business-Cycle Shocks”, *American Economic Review*, Vol. 86, No. 5, 1996, pp. 1154~1174.
- Finn, M., “Perfect Competition and the Effects of Energy Price Increases on Economic Activity”, *Journal of Money, Credit, and Banking*, Vol. 32, No. 3, part1, 2000, pp. 400~416.
- Golosov, M., J. Hassler, P. Krusell, and A. Tsyvinski, “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium”, *Econometrica*, Vol. 82, No. 1, 2014, pp. 41~88.
- Heutel, G., “How Should Environmental Policy Respond to Business Cycles? Optimal Policy under Persistent Productivity Shocks”, *Review of Economic Dynamics*, Vol. 15, No. 2, 2012, pp. 244~264.
- King, R. and S. Rebelo, “Resuscitating Real Business Cycles”, *J. B. Taylor & M. Woodford (ed.), Handbook of Macroeconomics*, Vol. 1, No. 14, 1999, pp. 927~1007.
- Klein, P., “Using the Generalized Schur Form to Solve a Multivariate Linear Rational Expectations Model”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 24, No. 10, 2000, pp. 1405~1423.
- Kydland, F. and E. Prescott, “Time to Build and Aggregate Fluctuations”, *Econometrica*, Vol. 50, No. 6, 1982, pp. 1345~1370.

- Nordhaus, W., “A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies”, Yale University Press, 2008.
- Ramezani, F., C. Harvie, and A. Arjomandi, “Australian Emissions Reduction Subsidy Policy under Persistent Productivity Shocks”, 60th AARES Annual Conference, Canberra ACT, 2-5 February 2016, pp. 1~24.
- Stern, N., “The Economics of Climate Change”, *American Economic Review*, Vol. 98, No. 2, 2008, pp. 1~37.

[부록 1] 환경의 질을 효용함수에 포함시킨 모형의 균형조건 및 모수설정

가계의 효용함수¹⁴⁾

$$\ln c_t + b \cdot \ln l_t + \zeta \cdot \ln q_t$$

모형의 균형조건

자원제약식

$$c_t + i_t + p_t \cdot en_t + z_t = y_t$$

자본스톡의 변화식

$$k_{t+1} = \left(1 - \frac{\phi_0}{\phi_1} \cdot u_t^{\phi_1}\right) \cdot k_t + i_t$$

자본가동률의 결정식

$$\frac{en_t}{k_t} = \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \cdot u_t^{\gamma_1}$$

가계의 1계조건

$$c_t = \frac{w_t \cdot (1 - h_t)}{b}$$

$$\beta \cdot E_t \frac{1}{c_{t+1}} \cdot \left\{ r_{t+1} \cdot u_{t+1} + 1 - \frac{\phi_0}{\phi_1} \cdot u_{t+1}^{\phi_1} - p_{t+1} \cdot \frac{en_{t+1}}{k_{t+1}} \right\} = \frac{1}{c_t}$$

$$\phi_0 \cdot u_t^{\phi_1} + p_t \cdot \gamma_0 \cdot u_t^{\gamma_1} = r_t \cdot u_t$$

생산함수

$$y_t = a_t \cdot (k_t \cdot u_t)^\theta \cdot (h_t)^{1-\theta}$$

14) 자연로그 형태의 효용함수를 이용하면 환경의 질이 음(-)수가 나올 경우 효용수준을 구할 수 없는 문제가 생긴다. 하지만 본문에서 사용한 모형과의 비교를 위해 이와 같은 효용함수를 적용하였다.

CO₂ 감축비용함수

$$z_t = \theta_1 \cdot \mu_t^{\theta_2} \cdot y_t$$

CO₂ 배출함수

$$em_t = (1 - \mu_t) \cdot y_t^{1-\gamma}$$

기업의 1계조건

$$\frac{\theta \cdot y_t}{k_t \cdot u_t} \cdot \{1 - \tau_t^{em} \cdot (1 - \mu_t) \cdot (1 - \gamma) \cdot y_t^{-\gamma} - \theta_1 \cdot \mu_t^{\theta_2}\} = r_t$$

$$\frac{(1 - \theta) \cdot y_t}{h_t} \cdot \{1 - \tau_t^{em} \cdot (1 - \mu_t) \cdot (1 - \gamma) \cdot y_t^{-\gamma} - \theta_1 \cdot \mu_t^{\theta_2}\} = w_t$$

$$\tau_t^{em} \cdot y_t^{1-\gamma} = \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot \mu_t^{\theta_2-1} \cdot y_t$$

정부부문

$$\tau_t^{em} = \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot (\mu^{target})^{\theta_2-1} \cdot y_t^\gamma \text{ (시나리오 1)}$$

$$\tau_t^{em} = (\tau^{em})^* \text{ (시나리오 2)}$$

환경부문

$$q_{t+1} = (1 - \delta^q) \cdot \bar{q} + \delta^q \cdot q_t - em_t$$

외부충격

$$\ln a_{t+1} = \rho_a \cdot \ln a_t + \sigma_a \cdot \epsilon_{a,t}$$

$$\ln p_{t+1} = \rho_p \cdot \ln p_t + \sigma_p \cdot \epsilon_{p,t}$$

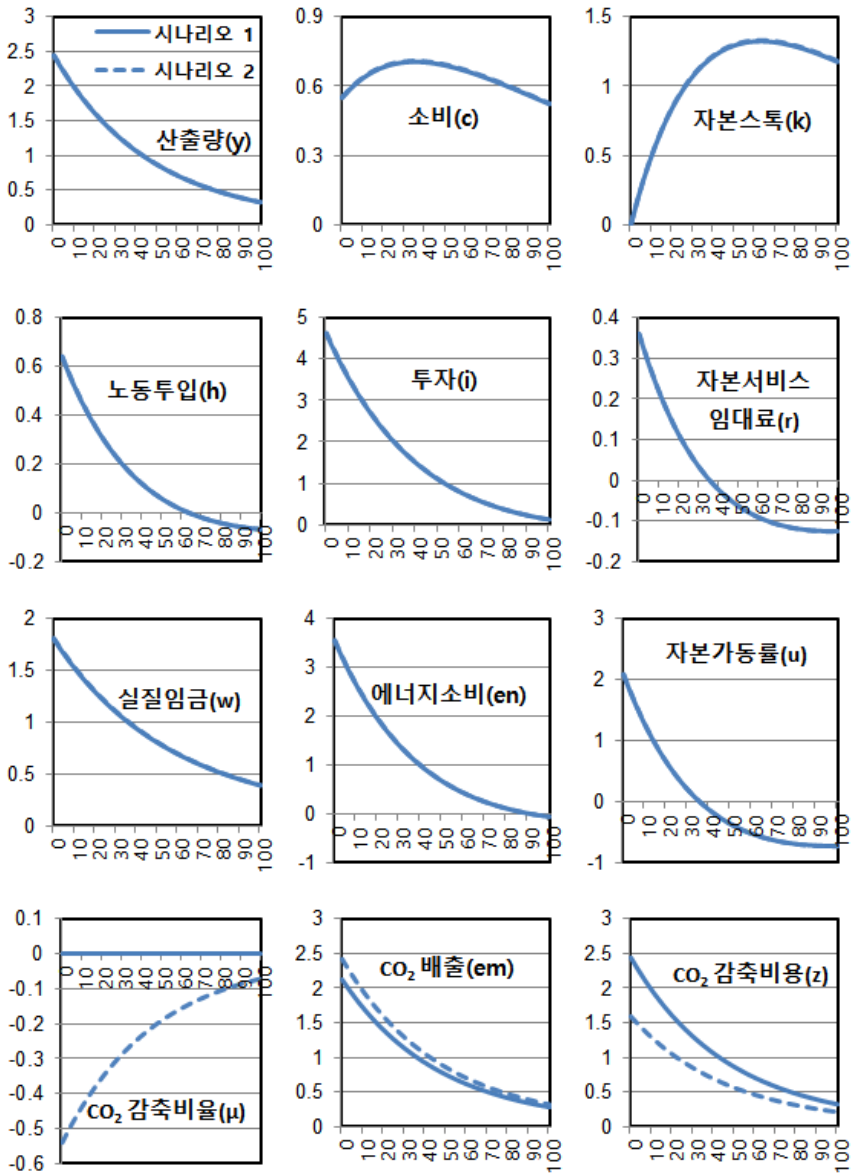
모수설정

모수	모수설명	값	출처
ζ	environment's weight in utility function	0.4	Angelopoulos et al. (2013)
\bar{Q}	environmental quality without pollution	1	
δ^q	persistence of environmental quality	0.9	

주) 본문과 중첩되는 모수는 동일한 값을 사용함.

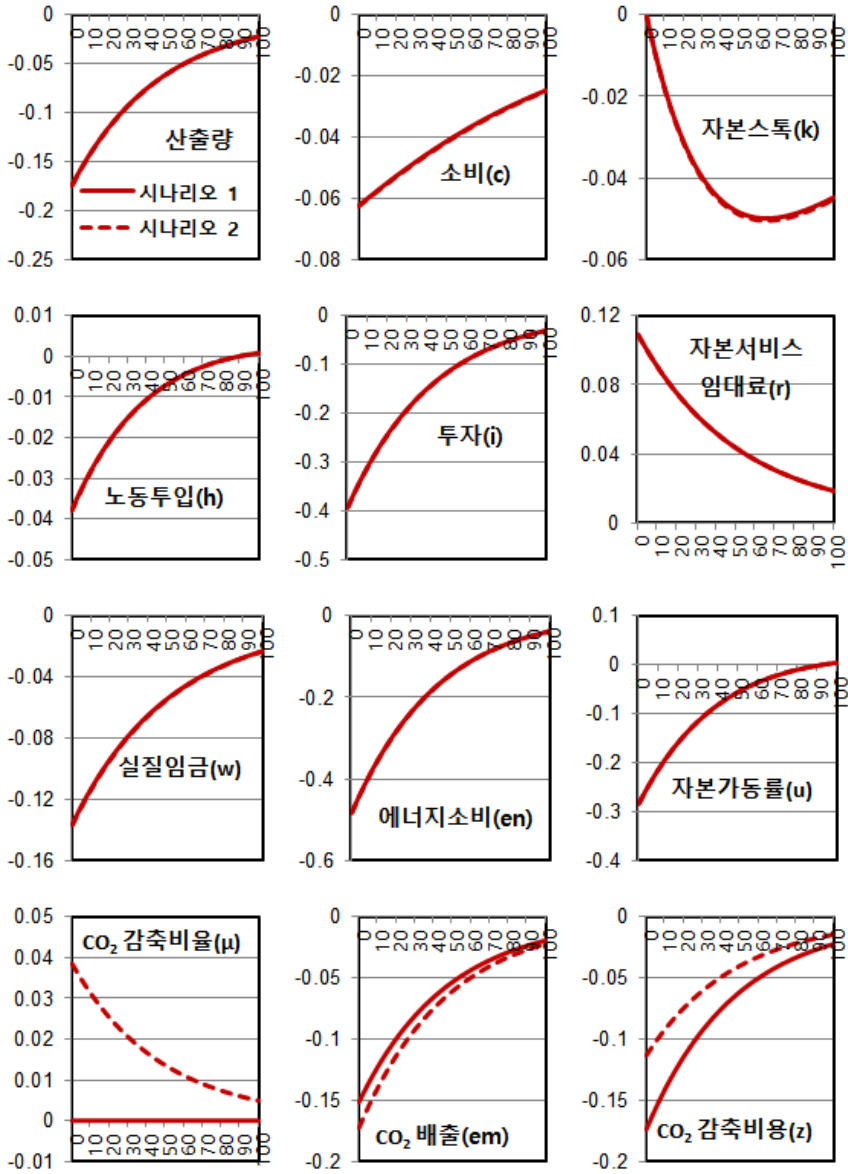
[부록 2] 환경의 질을 효용함수에 포함시킨 모형의 주요 결과

〈부록 그림 1〉 중요소생산성에 대한 충격반응함수



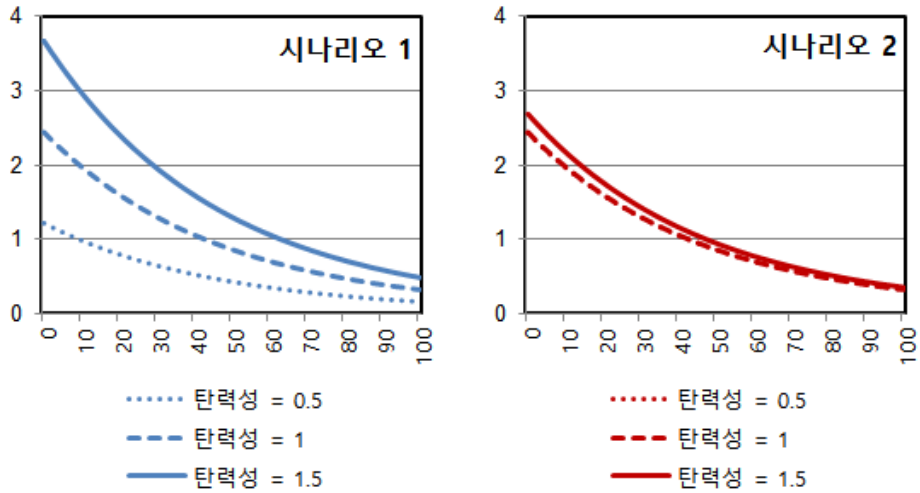
주) 세로축: 균제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈부록 그림 2〉 에너지가격에 대한 충격반응함수



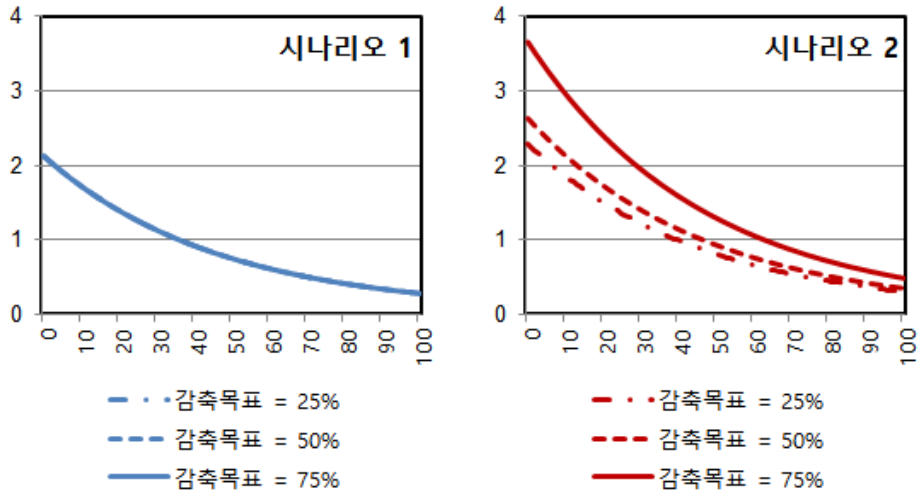
주) 세로축: 균제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈부록 그림 3〉 CO₂ 배출탄력성별 CO₂ 배출의 민감도 분석 (총요소생산성)



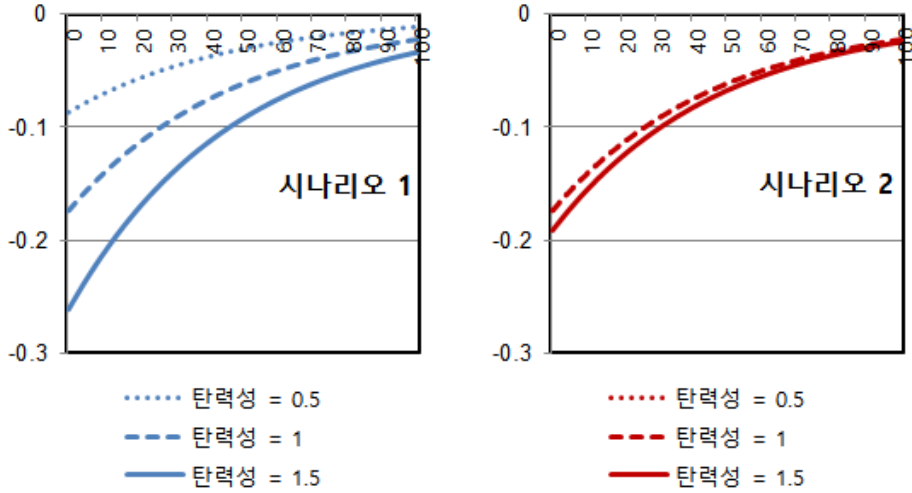
주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈부록 그림 4〉 온실가스 감축목표별 CO₂ 배출의 민감도 분석(총요소생산성)



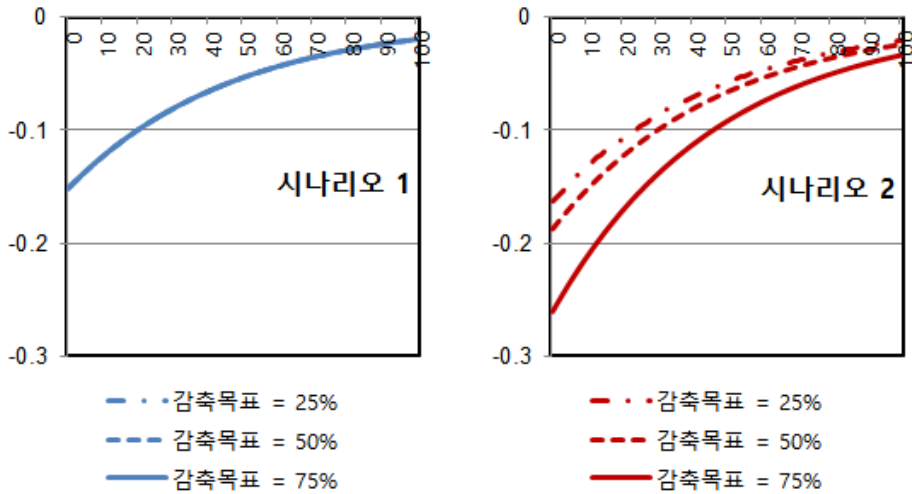
주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈부록 그림 5〉 CO_2 배출탄력성별 CO_2 배출의 민감도 분석 (에너지가격)



주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈부록 그림 6〉 온실가스 감축목표별 CO_2 배출의 민감도 분석 (에너지가격)



주) 세로축: 규제상태로부터 이탈한 비율(%), 가로축: 기간(분기)

〈부록 표 1〉 주요 변수들의 시나리오별 변동성 차이 (1)

온실가스 감축목표	소비 (c)	산출량 (y)	투자 (i)	자본스톡 (k)	노동투입 (h)
10%	0.07%	0.22%	0.24%	0.23%	0.50%
20%	0.20%	0.31%	0.36%	0.41%	0.67%
30%	0.37%	0.35%	0.46%	0.59%	0.71%
40%	0.57%	0.36%	0.54%	0.79%	0.66%
50%	0.81%	0.35%	0.61%	0.99%	0.53%
60%	1.09%	0.31%	0.67%	1.22%	0.33%
70%	1.40%	0.25%	0.71%	1.46%	0.07%
80%	1.74%	0.17%	0.76%	1.71%	-0.25%
90%	2.12%	0.08%	0.79%	1.99%	-0.61%

주) 시나리오 1 대비 시나리오 2의 표준편차의 증감률(%)로 표시함.

〈부록 표 2〉 주요 변수들의 시나리오별 변동성 차이 (2)

온실가스 감축목표	CO ₂ 감축비용(z)	CO ₂ 배출(em)	환경의 질 (q)	에너지소비 (en)	자본가동률 (u)
10%	-34.84%	2.56%	2.56%	0.21%	0.21%
20%	-34.78%	5.86%	5.86%	0.30%	0.29%
30%	-34.76%	10.13%	10.13%	0.34%	0.34%
40%	-34.75%	15.85%	15.85%	0.36%	0.35%
50%	-34.76%	23.88%	23.89%	0.35%	0.34%
60%	-34.78%	35.97%	35.98%	0.32%	0.31%
70%	-34.82%	56.19%	56.21%	0.27%	0.26%
80%	-34.87%	96.75%	96.77%	0.21%	0.20%
90%	-34.93%	218.66%	218.70%	0.13%	0.12%

주) 시나리오 1 대비 시나리오 2의 표준편차의 증감률(%)로 표시함.