

溫室가스 低減政策과 技術進步

趙慶煒* · 羅仁康**

논 초 록 본 연구는 Goulder and Schneider(1999)에서와 같이 기술진보가 온실가스 저감 정책으로 인해 유인되는 내생적 성장모형을 구축하고 이를 한국경제를 대상으로 분석하였다. 본 연구는 정책유인기술이 온실가스저감정책 뿐만 아니라 경제성장에 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다. ITC(induced technological change)를 감안한 모형은 ITC를 감안하지 않은 모형에 비해 단기적으로 톤당 저감비용을 42%, GDP 손실은 1%p 줄이며 장기적으로는 톤당 저감비용이 73%, GDP 손실이 1.8%p 줄어드는 효과를 가져온다. 그러나 R&D 투자와 저감활동간의 대체효과(trade off)와 R&D투자와 물적투자간의 밀어내기효과(crowding out effect)로 인해, ITC로 인한 온실가스 저감비용 감소분이 총 저감비용을 완전히 상쇄하지 못해 저감비용은 여전히 발생하는 것으로 분석된다.

핵심 주제어: 정책유인기술진보, 온실가스저감정책

경제학문헌목록 주제분류: D5, C6

* 에너지경제연구원 연구위원, e-mail: glcho@keei.re.kr

** 인천대학교 경영학과 조교수, e-mail: igna@incheon.ac.kr

I. 서 언

환경문제뿐만 인식되던 지구온난화현상은 에너지·경제문제 나아가 에너지절약 기술개발 및 기술이전문제 등으로 확대되고 있다. 온실가스감축과 관련된 기존의 많은 연구들은[Burniaux et al(1992), 강승진(1999), 조경엽(2000), 신동천(2000), Bernstein et al(2000)] 감축목표량을 달성하기 위한 비용 효과적인 수단이 무엇인가에 초점이 맞추어져왔다. 이들 연구가 제시하는 공통점은 개별이행보다는 배출권 거래제를 통해 모든 국가 또는 모든 기업이 공동으로 감축목표를 달성하는 것이 보다 비용 효과적인 방법이며, 또한 공동저감수단에 참여하는 주체들이 많을수록 비용저감효과가 커진다는 것이다. 그러나 이들 모형에서 기술은 신이 주신 선물로서 저감정책 도입이나 R&D 투자 등 경제적 비용을 지불하지 않아도 자동적으로 진보하는 것으로 가정하고 있다. 이들 모형 중 Burniaux et al(1992)와 조경엽(2000)은 온실가스 저감정책에 따른 신기술(backstop technology) 발전 문제를 모형에 감안하고 있으나, 내생적 기술진보 모형으로는 분류되지 않는다.¹⁾ 이들 모형에서 온실가스 저감정책 등 외부여건이 변하면 탄소를 배출하지 않는 신기술 에너지는 경제성을 확보할 수 있어 시장에 도입될 수 있다. 그러나 신기술로 생산된 에너지 가격은 외생적으로 주어질 뿐만 아니라 초기의 도입시기 또한 외생적으로 결정된다. 일단 신기술이 도입되면 시장 침투율(diffusion)은 저감정책에 따른 기존 에너지의 가격과의 경쟁을 통해 결정되는 메커니즘으로 모형이 설계되어 있다. 따라서 이들 모형은 R&D 비용 및 기술의 이전효과 등 기술발전이 갖는 특성을 내생적으로 고려하지 못하고 있으며, 기술발전에 따른 저감정책 자체가 다시 영향을 받는 순환적 관계를 설명하는데 한계를 가지고 있다.

최근 들어 이러한 온실가스 저감정책으로 유인된 기술진보(induced technological change: ITC)를 전통적인 내생적 성장모형과 연계한 연구가 활발히 진행되고 있다. Goulder and Schneider(1999)의 연구에서는 Romer(1986)와 Lucas(1988)의 내생적 성장모형에서와 같이 비경합적인 기술진보 뿐만 아니라 Rebelo(1991)와 Jones and Manuelli(1990) 모형에서와 같이 경합적인 기술진보를 혼합한 모형을 제시하고 있다. 이들 모형에서 경합적인 기술진보는 R&D 투자에 의해 축적이 되고, 나

1) 신기술은 신원자력, 풍력 및 태양광 등 현재는 경제성이 없어 도입되지 않고 있으나 미래에 도입될 수 있는 기술로 정의하고 있다.

아가 생산에 필요한 에너지 사용량을 줄여 단위당 온실가스 감축비용을 낮추는 역할을 한다. 그러나 ITC에 대한 R&D 투자는 기존의 R&D 투자를 상쇄(crowding out)하기 때문에 결국 온실가스 저감으로 인한 GDP는 여전히 감소하는 것으로 분석되고 있다.

ITC의 효과를 분석한 Buonanno, Carraro and Galeotti(2003)은 Goulder and Schneider(1999)의 일국가 CGE모형을 Global CGE 모형으로 확대했고, 기술진보가 생산성에도 영향을 미치지만 생산량대비 배출비용에도 직접적으로 영향을 미치도록 모형을 설계했다. 따라서 Goulder and Schneider(1999) 모형에서는 온실가스 감축목표가 에너지절약을 통해서만 달성되지만 이들 모형에선 에너지절약뿐만 아니라 에너지 단위당 탄소배출비용이 개선되어 달성될 수도 있다. 따라서 이들 모형에서 기술진보로 인한 톤당 저감비용의 감소효과는 매우 큰 것으로 나타나고 있다. 그러나 R&D 비용과 저감비용은 서로 역의관계(trade-off)가 있기 때문에 R&D 비용을 포함한 GDP 손실은 ITC를 반영할 때 오히려 더 커진다는 결과를 도출하고 있다.

반면 Gerlagh and Zwaani(2003)는 ITC가 도입되면 장기적으로 GDP의 순이익이 달성된다는 결과를 도출하고 있다. 이들 모형의 주요한 특징은 에너지를 화석연료(탄소배출)와 비화석연료(비탄소배출)로 구분하고 기술(learning-by-doing)은 화석연료 사용을 줄이는 방향으로 또는 비화석연료 생산을 증가시키는 방향으로 발전한다는 점이다. 따라서 배출량저감은 초기에는 에너지절약으로 주로 달성되지만 장기에는 탄소 저배출 기술에 의해 달성되기 때문에 저감시기를 가능한 늦추는 것이 바람직하다는 결과를 도출하고 있다. 또한 장기에 있어서는 에너지사용을 줄이지 않아도 저감목표량을 달성할 수 있기 때문에 온실가스감축과 경제적 순이익을 동시에 달성할 수 있다는 결과를 도출하고 있다.²⁾

앞서 살펴보았듯이 기술진보의 파급경로를 어떻게 구성하느냐에 따라 모형마다 매우 상이한 결과를 도출하고 있다. Goulder and Schneider(1999) 모형에서는 기술이 이전효과(spillover effect)를 통해 산업생산량을 증가시키고, Buonanno, Carraro and Galeotti(2003) 모형에서는 기술이 생산량뿐만 아니라 탄소 저배출 기술에도 영향을 미치고 있으며, Gerlagh and Zwaani(2003) 모형에서는 환경정책으

2) 그러나 이들 모형에서 연도별 GDP 변화를 현재가치로 환산한 총 GDP는 온실가스 감축의무가 시행되면 감소하는 것으로 나타나고 있다.

로 인한 기술은 화석연료를 절약하는 방향 또는 비화석연료 생산을 증가시키는 방향으로 발전한다. 따라서 모형구조에 따라 기술진보의 효과는 매우 상이하게 나타난다.

본 연구는 Goulder and Schneider(1999)에 기초하여 모형을 구축하였다. 따라서 기술은 R&D투자 등 경제적 비용을 지불함으로써 축적이 되고, 이는 이전효과를 통해 각 산업의 생산량에 영향을 미친다. 실증분석 모형을 구축하는데 있어 커다란 제약조건 중의 하나가 기술관련 데이터의 부재를 꼽을 수 있다. 따라서 본 연구는 캘리브레이션을 위해 Goulder and Schneider와 같이 기술의 파급경로를 단순화하였다.

본 연구가 Goulder and Schneider(1999)와 다른 점은 한국경제를 대상으로 분석한다는 점과, 산업을 <표 1>에서 보듯이 에너지원별에 따라 세분하였을 뿐만 아니라 생산함수의 구조도 상이하다는 것이다. 현실적으로 에너지마다 매우 상이한 온실가스 배출 기여도를 가지고 있을 뿐만 아니라 산업에 미치는 효과도 에너지의존도에 따라 매우 다르게 나타나게 된다. 따라서 본 연구는 에너지산업을 에너지원별에 따라 세분함으로써 온실가스 감축에 따른 에너지원별 수요변화를 보다 자세히 분석할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

기술이 생산성에 기여한다고 가정할 경우 생산함수가 규모에 대한 수확체증(increasing returns to scale: IRS) 함수로 바뀐다는 문제가 발생한다.³⁾ Goulder and Schneider와 달리 본 연구에서는 Rutherford가 개발한 MCP 연산방법을 활용하여 IRS의 문제를 해결하였다. Goulder and Schneider는 IRS 문제를 해결하기 위해 생산기여도 함수가 단속적으로 점프하는 형태를 취하고 있다. 그러나 본 모형에서는 생산기여도함수를 연속적으로 증가한다고 가정하고 특정연도에 생산량이 급격히 증가하는 현상을 배제하였다.

3) 기술이나 지식은 비경합적(nonrival)이며 부분적으로 배제적(partially excludable)인 특성을 가지는 생산요소이므로 이는 규모에 대한 수확체증을 초래하고 결국 생산집합의 비볼록성(nonconvexity) 문제를 야기시킨다[조하연(1996)]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 기술진보를 외생변수로 간주하거나 공공재로 규정하여 누구나 무상으로 쓸 수 있다고 가정하는 것이다. 이러한 경우 생산함수가 규모에 대한 수확불변(Constant Returns to Scale: CRS)의 특성을 유지할 수 있기 때문에 시장청산(market clearance), 영의 이윤(zero profits), 소득균형(income balance) 등 3가지 일반균형조건을 쉽게 도출할 수 있다. 따라서 본 모형에서도 Goulder and Shenider(1999)와 같이 기술을 경합적인 기술진보와 비경합적인 기술진보로 나누고 비경합적인 기술진보는 공공재로 가정하고 분석하였다.

이러한 모형구축을 통해 본 연구는 ITC를 감안한 경우 온실가스저감정책이 저감 비용 및 국민경제에 미치는 파급효과를 분석하는데 목적을 두고 있다. 본 연구의 분석결과는 정책유인기술이 온실가스저감정책 뿐만 아니라 한국경제에 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다. 2008년부터 매년 BaU(기준시나리오) 대비 30%씩 온실가스를 감축하는 경우 톤당 저감비용과 GDP 손실에 대한 분석결과를 요약하면 다음과 같다. ITC가 없는 경우에 비해 ITC를 감안하면 2008년에 톤당 저감비용은 63,000원/TC(약 42%) 감소하고 GDP 손실은 1%p(약 6.7조원) 감소하는 것으로 분석된다. ITC로 인한 장기적인 비용감소효과는 더욱 커져 2030년에 톤당 저감비용은 103,000원/TC(약 74%), GDP 손실은 약 1.8%p(약 23조원) 감소하는 것으로 분석된다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다.

제 II 장에서는 혼돈을 피하기 위해 모형의 주요 특성만을 선별하여 수록하였으며, 기타 관련된 내용은 부록에 자세히 수록하였다. 제 III 장에서는 BaU대비 30%의 온실가스 감축목표를 달성하는데 ITC가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 분석하였다. 마지막으로 결론과 본 연구의 개선방향은 제 IV 장에 수록하였다.

〈표 1〉 분석대상

	부문	산업연관표 분류 명칭	산업연관표 소분류 번호
산업 부문	농수 산업	농림수산, 음식료	0001 ~ 0011
	에너지집약산업	섬유 · 가죽, 목재 · 종이, 인쇄 · 출판복제, 화학제품, 비금속광물, 제1차금속	0033 ~ 0056, 0061 ~ 0089
	기타산업	그외 모든 산업	
	석탄	석탄, 석탄제품	0012, 0057
	원유	원유	0013
	천연가스	천연가스	0014
	석유제품	석유제품	0058 ~ 0060
	도시가스	도시가스	0126
	전력 & 열	전력, 열공급업	0125, 0127
투자 부문	R&D투자	교육기관, 연구기관, 기업내 연구개발	0156 ~ 0158
	물적투자	민간고정자본형성, 정부고정자본형성	0032, 0033
소비 부문	가계	민간소비지출	0030
	정부	정부소비지출	0031

주: 산업연관표 1995, 한국은행

II. 모 형 구 조

1. 내생화된 기술진보와 생산함수

본 모형은 Goulder and Schneider(1999), Buonananno, Carraro and Galeotti (2003) 와 같이 기술을 경합적인 기술진보와 비경합적인 기술진보로 나누고 비경합적인 기술진보는 공공재로 가정하고 분석하였다. 자본은 물적자본(physical capital) 과 지적자본(knowledge capital) 두 가지로 구성되어 있다. 물적자본과 지적자본에 대한 소유권은 모두 가계가 가지고 있으며 가계는 이를 산업에 대여함으로써 수익을 얻는다고 가정하였다.⁴⁾ 지적자본은 R&D투자를 통해서 축적되며 R&D투자는 다른 재화와 마찬가지로 노동, 자본 및 중간재화를 사용하여 형성된다. 따라서 지적자본축적은 무상으로 이루어지는 것이 아니라 교육, 훈련, 기타 제반비용을 수반하게 되며, 이를 사용한 기업은 이에 대한 대가를 지불하게 된다. 그러나 R&D는 완전경쟁시장 하에서 생산된다고 가정함으로써 R&D 생산기업의 독점적 이윤을 배제하였다. 본 연구에서는 Romer-Lucas에서 언급한 기술의 외부성 또는 이전효과(spillover effect)를 감안하기 위해 아무런 보상 없이 누구나 사용할 수 있는 사회 전체의 기술을 모형에 감안하였다. 그러나 비배제성 기술은 사회전체의 R&D투자에 의해 축적이 되기 때문에 내생적 기술진보라 할 수 있다. 이를 설명하기 위해 각 산업의 생산함수부터 살펴보기로 하자.

각 산업에서 생산되는 t 기의 최종재화 ($Y_{i,t}$) 는 노동, 물적·지적자본과 중간재화를 사용하여 생산된다.

$$Y_{i,t} = \phi(\bar{A}_t) \left[\alpha_{akt} AKLE_{i,t}^{\rho_y} + \alpha_x XA_{i,ne,t}^{\rho_y} \right]^{1/\rho_y} \quad (1)$$

$$AKLE_{i,t} = A_{i,t}^a K_{i,t}^\eta L_{i,t}^\gamma E_{i,t}^{1-\alpha-\eta-\gamma} \quad (2)$$

$AKLE_{i,t}$ 는 경합성을 갖는 기술 또는 지적자본 (A), 물적자본 (K), 노동

4) 현실적으로 소유권은 투자를 수행한 기업이나 정부에 있을 수 있으나, 완전경쟁시장을 가정할 경우 투자가 저축과 일치한다는 점에서 자본에 대한 소유권을 가계가 가진다고 가정하였다.

(L), 에너지재화 (E)로 구성된 복합재화를 의미하며, $XA_{i,ne,t}$ 는 t 기에 i 부문에서 사용한 비에너지 중간투입재화로 구성된 복합재화를 의미한다.⁵⁾ \bar{A}_t 는 외부성을 가지는 사회전체의 기술수준을 의미한다. $\phi(\bar{A})$ 는 사회전체의 기술수준에 대한 증가함수로 생산에 미치는 기여정도를 나타낸다.

$$\phi(\bar{A}) = \frac{(\bar{A})^{1/(1-\gamma_a)}}{\bar{A}}, \quad 0 < \gamma_a < 1, \quad \phi(\bar{A}) \geq 1 \quad (3)$$

결국 식 (1)에 나타난 t 기의 i 부문 생산함수 $Y_{i,t}$ 는 $\phi(\bar{A})$ 을 제외하면 규모에 대한 수확불변이라는 가정이 성립된다. 그러나 외부성을 갖는 $\phi(\bar{A})$ 가 추가되면 생산함수는 규모에 대해 수확체증 함수로 변하게 된다. 그리고 $1/(1-\rho_y)$ 는 부문별 $AKLE_{i,t}$ 복합재화와 $XA_{i,ne,t}$ 복합재화간의 대체탄력성 (σ)을 의미한다.⁶⁾

Goulder and Schneider(1999)에서와 같이 각 부문의 배제성을 가지는 지적자본은 다음과 같이 축적된다고 가정하였다.

$$A_{i,t+1} = (1-\delta_a)A_{i,t} + \nu_a RD_{i,t} \quad (4)$$

$RD_{i,t}$ 는 i 부문이 t 기에 가계로부터 구매한 R&D투자지출을, δ_a 는 지적자본에 대한 감가상각율로서 폐기되는 기술을 나타낸다. 그리고 ν_a 는 R&D투자의 기술축적에 대한 기여도를 의미한다. 다시 말해서 ν_a 가 1보다 크다면 R&D투자가 아주 성공적이어서 기대 이상으로 기술진보가 이루어지는 반면 ν_a 가 1보다 작다면 투자에 비해 기술진보가 성공적이지 못하다는 것을 의미한다.⁷⁾ 식 (4)에서 보듯이 지적수준과 R&D투자는 선형적 관계(linear relationship)를 가지고 있다. 따라서 현재의 지적수준이 R&D투자비용 또는 생산성에는 직접적으로 영향을 미치지 못하는 것으로 간주하였다. 이는 Romer(1990)가 지적한 현재의 R&D투자는 미래

5) 복합재화의 구성과정은 부록에 자세히 수록되어 있다.

6) 이하 대체탄력성에 대한 설명은 생략하기로 하겠다.

7) Goulder and schneider(1999)은 사회 전체적으로 볼 때 성공적 투자와 그렇지 못한 투자는 서로 상쇄되어 1에 수렴한다고 주장하고 있다.

의 R&D투자비용 또는 생산성에 영향을 미친다는 동태적 파급효과(spillover effect)를 감안하지 못하지만, R&D투자는 노동, 자본, 중간재화뿐만 아니라 지적자본의 함수이기 때문에 현재의 지적자본이 미래의 R&D 투자비용 또는 생산성에 간접적으로 영향을 미치게 된다.

비배제성을 가지는 사회전체의 지적자본도 배제성을 가지는 자본과 동일한 형성 법칙을 갖는다고 가정하였다.

$$\overline{A}_{t+1} = (1 - \delta)\overline{A}_t + \overline{v_a} \overline{RD}_t \quad (5)$$

\overline{RD} 은 사회전체의 R&D 투자수준이며 $\overline{v_a}$ 는 잠재적 파급효과의 정도를 나타낸다. 즉 $\overline{v_a}$ 가 零이면 특정산업의 생산수준은 타 산업의 R&D 투자에 영향을 받지 않게 된다.

물적자본 $K_{i,t}$ 는 다음과 같은 법칙에 의해 축적된다.

$$K_{i,t+1} = (1 - \delta_k) K_{i,t} + I_{i,t} \quad (6)$$

$t+1$ 기에 부문 i 의 자본량은 감가상각 $\delta_k K_{i,t}$ 을 제외한 t 기의 자본량 ($K_{i,t}$)과 투자($I_{i,t}$)에 의해 형성된다. 이 밖의 생산함수에 대한 설명은 부록에서 자세히 설명하였다.

2. 가계부문

대표소비자로 구성된 가계는 주어진 가치분소득이라는 통시적(intertemporal) 예산제약조건하에서 통시간 효용(intertemporal utility)을 극대화한다. 효용함수는 다음과 같이 시간에 대해 분리 가능한(separable) CES(constant elasticity of substitution) 함수로서 소비재화와 여가로 구성된다.

$$\max_{C,H} U_t(Z_t) = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{Z_t^{1-\theta}}{1-\theta} \quad (7)$$

$$s.t. \quad Z_t = [\alpha_{z,t} (CE_t)^{\rho_z} + (1 - \alpha_z) (1 - H_t)^{\rho_z}]^{1/\rho_z}, \quad (8)$$

$$CE_t = [\alpha_{ce} XA_{c,ne,t}^{\rho_{ce}} + (1 - \alpha_{ce}) E_{c,t}^{\rho_{ce}}]^{1/\rho_{ce}} \quad (9)$$

여기서 β 는 시간에 대한 할인율을 의미하며, $1/\theta$ 는 통시간 대체탄력성 (intertemporal elasticity of substitution) 을 나타낸다. H_t 는 근로시간을 의미한다. 따라서 할당된 시간을 1이라고 가정하면 $1 - H_t$ 는 여가시간을 의미한다. CE_t 는 비에너지 아밍톤복합재화 ($XA_{c,ne}$)와 에너지 복합재화 (E_c)로 구성된 복합소비 재화를 나타낸다. 따라서 t 기에 가계에서 소비한 총 소비재화(full consumption goods)는 복합소비재화와 여가로 구성된 Z_t 로 표기할 수 있다.

다음은 소비자의 통시간 예산제약식을 보여주고 있다.

$$\begin{aligned} \sum_t P_{ce,t} CE_{c,t} + \sum_t P_{k,t} I_t + \sum_t P_{RD,t} RD_t = \\ \sum_t W_t H_t + \sum_t P_{k,t} K_t + \sum_t P_{a,t} A_t + \sum_t Tr_t \end{aligned} \quad (10)$$

제약식에 나타난 가격은 모두 세후가격을 나타내며, 시간에 대한 할인율을 반영한 가격을 의미한다. 현재가치로 환산된 노동임금소득, 물적 및 지적자본 대여로부터의 소득과 정부의 가계이전소득은 현재가치로 환산된 소비와 물적 및 지적자본투자로 지출된다. 자본과 노동은 부문간 이동이 자유롭다고 가정하였다. 따라서 각 부문은 동일한 가격으로 자본과 노동을 구매할 수 있다. 그리고 가계가 받은 노동임금 ($W_t H_t$)은 산업부문에서 지불한 총 임금 ($\sum_t L_t$)과 동일하다. 본 연구는 유동성 제약이 없는 것으로 간주하고 있기 때문에 식 (10)에서는 가계는 일정기에 필요한 돈을 무제한 빌릴 수 있다는 암묵적 가정이 내재되어 있다.⁸⁾ 정부부문, 국제수지와 투자부문, 그리고 연산을 위한 말기조건에 대한 수식은 부록에 자세히 수록하였다.

8) 유동성제약이 없다는 가정은 매우 비현실적인 가정이다. 따라서 이에 대한 향후연구가 필요하다.

Ⅲ. Benchmark 데이터와 캘리브레이션

1. Benchmark 데이터

본 모형은 한국은행에서 발표한 1995년도 I/O 데이터에 벤치마킹(benchmarking)을 하였다. R&D투자지출은 산업연관표 분류상 “교육기관, 연구기관 및 기업 내 연구개발”에 대한 지출로 가정하였다. <표 2>는 SAM(Social Account Matrix) 구성을 위한 지적자본과 물적자본에 대한 투자 및 수익을 보여주고 있다. 1995년도 총 R&D투자는 약 26조 4천억원으로 물적자본 투자 132.4조원의 약 20%에 달하는 것으로 나타나고 있다. 물적자본 수익은 154.6조원인 반면 지적자본 수익은 28조원으로 물적자본 수익의 약 18%에 달한다. 따라서 1995년을 기준으로 볼 때 물적자본 투자수익율은 지적자본 투자수익율보다 높게 나타나고 있다.

〈표 2〉 지적자본과 물적자본에 대한 투자와 수익 (1995)

	물적자본(조원)	지적자본(조원)	지적자본/물적자본
투자	132.4	26.4	20%
수익	154.6	28.0	18%
수익/투자	117%	106%	

근로소득세와 물적 자본소득세는 총 소득세수입을 총 소득으로 나누어 도출하였다.⁹⁾ 지적자본소득세율에 관한 정보가 없어 지적 자본에 대한 소득세율은 0이라고 가정하였다.

〈표 3〉 근로소득세율과 물적 자본소득세율 (1995)

	세율	소득(조원)	세수입(조원)
노동임금	0.08	179.9	14.7
물적자본	0.06	164.5	9.4

자료 : 세수입은 한국통계연감, 2000, 통계청.

근로소득 및 자본소득은 산업연관표의 피용자보수와 영업잉여로부터 도출.

9) 근로소득세율과 물적 자본소득세율은 한계세율 또는 유효세율이 아닌 법정세율을 의미한다.

2. 캘리브레이션

CGE모형의 가장 큰 단점은 외생적으로 추정해야 하는 모수들이 너무 많다는 것이다. 특히 선진국에 비해 산업별 데이터가 부족하고 CGE모형이 널리 사용되지 않았던 우리나라에 대한 정확한 모수값을 찾기는 매우 어려운 상황이다. 따라서 본 모형에서는 손양훈과 신동천(1997), 조경엽(2000), Bernstein et al(1999), Gouldner and Schneider(1999) 등 기존의 국내외문헌과 유사한 모수값을 사용하도록 노력하였다. 그러나 선행연구에서 사용된 모수값들도 엄격한 추정을 통해 도출한 값들이 아니기 때문에 본 연구는 모수값에 대한 민감도 분석을 통해 이러한 단점을 보완하도록 노력하였다. 단, 가중치 모수(share parameter)의 값은 MPSGE에서 기준 연도의 실질 데이터와 주어진 대체탄력성을 가지고 프로그램 내에서 자동으로 추정되기 때문에 본 연구에서 제시하지 않았다.

〈표 4〉는 본 모형에서 사용한 재화간 대체탄력성을 보여주고 있다. 생산부문의 재화간 대체탄력성은 모든 부문이 동일한 값을 갖는다고 가정하였다. 우선 수출재화와 국내소비재화간의 불변전환탄력성(constant elasticity of transformation)은 3.0이라고 가정하였다. 이는 손양훈과 신동천(1997)이 사용한 부문별 불변전환탄력성 값 2~4의 평균값을 의미한다.

〈표 4〉 생산부문과 소비부문의 대체탄력성

생산부문		소비부문	
대체재화	탄력성	대체재화	탄력성
XD, XE^*	3.0	$1/\theta$	0.5
$AKLE, XA_{ne}$	0.0	$CE, 1-H$	0.8
AKL, E	0.5	XA_{ne}, E	0.0
A, K, L	1.0	ELE, NEL	0.1
ELE, NEL	0.1	$OCG, LNG, CRUD$	0.5
$OCG, LNG, CRUD$	0.5	$OIL, CGAS, COAL$	2.0
$OIL, CGAS, COAL$	2.0	XM, XD	2.0
XM, XD	2.0		

주: 1. * XD, XE 의 대체탄력성은 수출과 국내재화의 불변전환탄력성을 의미.

2. 소비부문의 intertemporal elasticity of substitution ($1/\theta$)과 소비재와 여가($CE, 1-H$)의 대체탄력성을 제외한 대체탄력성은 물적 및 지적 투자부문에서도 동일하다고 가정.

AKLE 복합재화와 비에너지 아밍톤 복합재화 XA_{ne} 간의 대체탄력성은 Bernstein et al. (1999) 에서와 같이 0으로 가정하였다. 생산요소간 대체탄력성은 성장모형에서 일반적으로 사용하는 콥더글라스(Cobb Douglas) 함수형태로 가정하여 대체탄력성을 1로 설정하였다. 환경정책 변화에 따른 파급효과는 기술과 타 생산요소와 대체탄력성에 의해 민감하게 반응할 것으로 예상되어 이에 대한 민감도 분석을 하였다.

에너지는 일반적으로 전력과 비전력에너지간의 대체탄력성이 낮은 반면, 석유와 가스와의 대체탄력성은 상대적으로 높은 것이 사실이다. 따라서 <표 4>에 나타나 있듯이 전력 (ELE)과 비전력 (NEL)은 0.1로 설정하고 석유제품과 천연가스 그리고 석탄과의 대체탄력성은 2.0으로 상대적으로 높게 설정하였다.¹⁰⁾ 그리고 천연가스, 원유와 석유·가스 (OCG)와의 대체탄력성은 석유, 석탄과 가스의 대체탄력성보다 상대적으로 낮기 때문에 0.5로 설정하였다.¹¹⁾

가계부분의 통시간 대체탄력성 ($1/\theta$)은 Goulder and Schneider (1999), Bernstein et al (1999) 과 같이 0.5로 가정하였다. 소비재와 여가의 대체탄력성은 Rasmussen and Rutherford (2001) 에 제시한 0.8을 사용하였다. 이 밖에 소비복합재화간의 대체탄력성은 생산부문과 동일하다고 가정하였다.

이 밖에 외생변수로 결정되는 균형이자율은 잠재성장률과 물가상승률을 감안하여 0.06으로 가정하였다. 따라서 균제상태 (steady state) 에서 이자율은 $\frac{1}{\beta} - 1$ 과 동일하기 때문에 β 값은 0.943이 된다. 물적자본에 대한 연간 감가상각율은 0.07로 가정하였다.¹²⁾ 균제상태 (steady state) 에서 자본에 대한 균형조건 ($K^* = \frac{\text{자본소득}}{\text{이자율} + \text{감가상각율}}$) 을 활용하면 1995년도 물적자본 스톡은 약 1,189조원에 달한다.¹³⁾ 그리고 지난 5년간 연평균 GDP증가율이 약 5%에 달하고 있기 때문에 균형 경제성장률을 5%로 가정하였다.¹⁴⁾ 따라서 균형투자 $[I^* = (\text{성장률} + \text{감가상$

10) 이는 Bernstein et al. (1999) 와 동일하다.

11) 우리나라 산업연관표 분류상 원유와 천연가스를 사용하는 산업은 석유제품산업과 도시가스 산업이다. 따라서, 이에 대한 대체탄력성이 적용되는 산업은 석유제품산업과 도시가스 산업에 국한된다.

12) 이는 기기나 건물의 평균 수명이 약 14년~15년임을 뜻한다.

13) 자본소득(영업잉여)은 부문별로 주어지기 때문에 같은 방식으로 부문별 균형 자본스톡을 구할 수 있다.

14) IMF로 인해 경제성장률에 왜곡이 있음에도 불구하고 지난 5년간의 연평균 경제성장률을 균형

각률) K^*] 는 142.7조원에 달한다.

기초과학은 상당한 오랜 기간동안 유지되기 때문에 지적자본의 감가상각율은 물적자본의 감가상각율보다 낮은 0.04로 설정하였다.¹⁵⁾ 또한 R&D투자의 기술축적에 대한 기여도를 나타내는 ν_a 와 $\overline{\nu_a}$ 는 Goulder and Schneider(1999)에서와 같이 1로 가정하였다. 다시 말해서 성공적 R&D 투자와 실패한 R&D 투자가 서로 상쇄되어 평균적으로 1로 수렴한다는 의미를 가지고 있다.

물적자본과 같이 균형조건을 활용하여 추정한 사회전체의 균형 지적자본스톡은 215.5조원에 달해 물적자본스톡의 18%에 달하고 있다. 주어진 균형성장률과 감가상각율을 가지고 추정한 균형투자액은 25.9조원이다. 물적자본과 마찬가지로 실질투자액과의 차이는 소비를 조정하여 일치시켰다. 동일한 방법으로 SAM 테이블 구성에 필요한 지적자본스톡도 부문별 지식잉여를 활용하여 동일하게 추정하였다.

마지막으로 공공재적 특성을 가지는 지적자본에 대해 살펴보기로 하자. 어느 경제에서나 기술진보는 추정방법에 따라 매우 상이한 값이 도출되기 때문에 명시적으로 이에 대한 데이터가 발표되지 않고 있다. 일반적으로 공공재적 특성을 지닌 기술진보는 규모에 대한 수확불변이라는 가정 하에 노동과 자본에 대한 보상을 제외한 Solow 잔차(residual)로 측정하고 있다. 그러나 2차대전 이후 Solow 잔차로 측정된 미국의 기술진보는 현실과 달리 1970년대에 접어들면서 둔화되거나 정체되는 것으로 나타난다. 따라서 Greenwood and Jovanovic(1990)은 Solow 잔차로 기술진보를 측정하는 기존의 연구에 대한 강한 비판을 제기하면서 현재 우리가 직면한 급격한 기술진보를 측정하기 위해서는 새로운 기준이 필요하다고 주장하고 있다. 이들은 Solow 잔차(residual) 대신 자본의 상대가격(p)으로 기술진보(q)를 $p = 1/q$ 로 추정하였다. 자본의 상대가격은 소비자물가에 대한 자본가격 비율을 의미한다. 따라서 위 식은 새로운 장비 또는 기기를 구매하기 위해 얼마만큼의 소비나 생산을 포기하는지에 대한 척도가 된다. 따라서 기술이 진보할수록 자본의 상대가격은 하락하게 된다는 의미를 내포하고 있다.

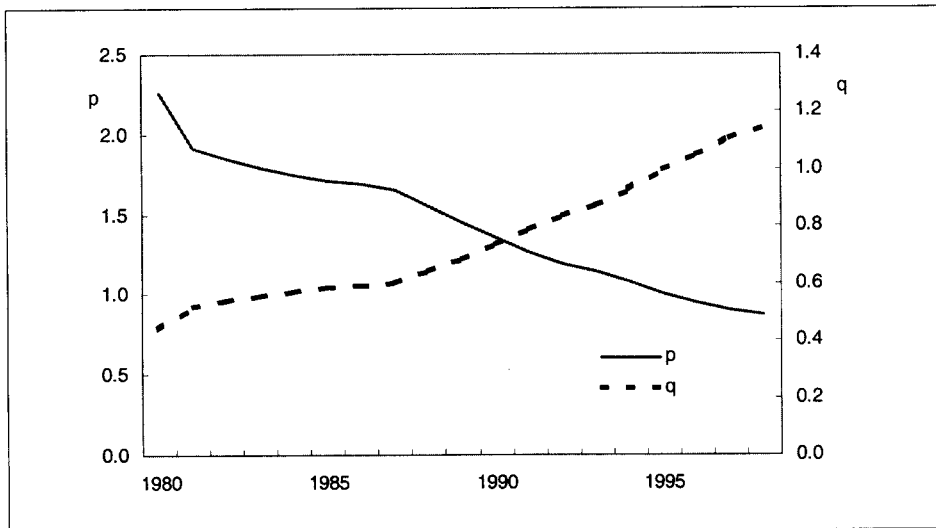
다음 그림은 Greenwood and Jovanovic 방법에 의해 추정된 1980년 이후 우리나라

성장률로 가정한 이유는 향후 우리경제의 성장률은 선진국과 같이 점차 둔화될 것으로 전망되기 때문이다.

15) Goulder and Schneider(1999)는 지적자본의 감가상각율을 0으로 가정하였다.

라의 기술진보를 보여주고 있다. 지난 20년간 우리나라의 기술은 약 1.2배 증가하여 왔다. 따라서 본 연구에서는 기술의 생산성에 기여하는 정도가 2001년 대비 2030년에 1.2가 되도록 하기 위해 γ_a 를 0.01로 설정하였다. 그러나 Greenwood and Jovanovic 추정방법이 합리성은 있으나 아직 일반적으로 인정된 추정방법이 아니기 때문에 본 연구에서는 γ_a 에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

〈그림 1〉 Greenwood and Jovanovic 방법에 의해 추정된 한국의 기술진보



자료: 한국은행 (www. bok. re. kr)

IV. 분석결과

분석은 기준시나리오(BaU: Business as Usual) 하의 경제전망부터 출발하였다. 기준시나리오란 ITC와 이산화탄소 감축의무가 없다는 전제하의 경제성장을 의미한다.¹⁶⁾ 우리나라는 선진국과 달리 감축의무가 없기 때문에 임의적으로 2008년부터 이산화탄소 감축의무를 BaU대비 매년 30%씩 감축하는 것으로 설정하였다.¹⁷⁾ 이

16) BaU 경제지표전망은 조경엽(2001)와 동일하기 때문에 본 논문에는 수록하지 않았다. 기본적으로 GDP 성장은 KDI 전망과 일치하도록 하였으며, 에너지원별 전망은 에너지연구원의 전망치와 일치하도록 추정하였다. 마지막으로 온실가스배출은 IPCC 가이드라인에 제시된 에너지원별 TOE당 배출계수를 사용하여 추정하였다.

산화탄소 감축의무가 주어진 상태에서 ITC 도입에 따른 파급효과는 ITC가 없는 경제와 비교함으로써 분석하였다. ITC가 없는 경제는 R&D투자와 공공재적 특성을 가지는 기술진보가 없는 경제를 일컫는다. BaU대비 이산화탄소를 30% 감축하는 경우 <표 5>에 나타난 바와 같이 연도별 저감량은 2008년에 50.1백만 톤, 2010년에 53.3백만톤 2030년에 72.7백만톤이다. 따라서 2008년부터 2030년까지 감축해야할 총량은 879.1백만톤에 달한다.¹⁸⁾

<표 5> 이산화탄소 감축량 (백만 TC)

	30% 감축
2008	50.1
2009	51.7
2010	53.3
2011	54.2
2012	55.2
2013	56.1
2014	57.1
2015	58.0
2016	58.9
2017	59.8
2018	60.6
2019	61.6
2020	62.5
2025	67.4
2030	72.7
2008년~2030년 총 저감량	879.1

1. 정책유인기술진보(ITC)가 저감비용에 미치는 효과

감축 의무량이 연도별로 주어진 상태에서 ITC 도입이 톤당 저감비용과 GDP 손

17) 교토의정서에 따르면 Annex I 국가(주로 선진국)들은 2008년부터 1990년 온실가스배출 수준 대비 5.2%를 감축하기로 합의하였다.

18) 이산화탄소 이외에도 지구의 온도에 영향을 주는 다양한 온실가스가 있다. 그러나 온실가스의 85% 이상이 이산화탄소로 구성되기 때문에 본 연구에서는 이산화탄소에만 초점을 맞추고 있다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소 감축을 온실가스 감축으로 부르기로 하겠다.

실에 미치는 효과는 <표 6>에 정리되어 있다. 정책유인기술진보(ITC)가 없는 경우 2008년에 톤당 저감비용은 약 150,800원인 반면, ITC를 감안한 경우 저감비용은 약 87,700원으로 약42%의 비용이 감소된다. 1차 회계연도가 끝나는 2012년에는 ITC로 인해 약 51%의 톤당 저감비용 감소효과를 기대할 수 있으며, 시간이 지날수록 감소효과는 더욱 커져 2030년에는 톤당 저감비용이 약 74% 감소할 것으로 분석된다. 이와 같이 시간이 지날수록 감소효과가 커지는 이유는 기술이 시간에 비례하여 축적될 뿐만 아니라 저감량이 클수록 기술의 중요성이 커지기 때문이다.¹⁹⁾

<표 6> 연도별 감축의무 이행시 ITC가 저감비용 및 GDP 손실에 미치는 효과

	저감비용 (천원/TC)			BaU 대비 GDP손실 (%)		
	No ITC	ITC	No ITC대비 ITC 효과(%)	No ITC	ITC	ITC와 No ITC 차이(%p)
2001	-	-	-	-0.67	0.00	-0.67
2002	-	-	-	-0.76	0.00	-0.76
2003	-	-	-	-0.85	0.00	-0.85
2004	-	-	-	-0.96	-0.01	-0.95
2005	-	-	-	-1.08	-0.03	-1.05
2006	-	-	-	-1.22	-0.08	-1.14
2007	-	-	-	-1.39	-0.17	-1.22
2008	150.8	87.7	-41.8	-1.72	-0.73	-0.99
2009	150.2	83.6	-44.3	-1.84	-0.72	-1.12
2010	149.4	79.7	-46.6	-1.92	-0.71	-1.21
2011	148.5	76.1	-48.7	-1.97	-0.69	-1.28
2012	147.6	72.7	-50.7	-2.01	-0.68	-1.33
2013	146.7	69.5	-52.6	-2.03	-0.67	-1.36
2014	145.9	66.5	-54.5	-2.05	-0.65	-1.40
2015	145.1	63.6	-56.2	-2.07	-0.64	-1.43
2016	144.4	60.9	-57.8	-2.08	-0.62	-1.46
2017	143.8	58.3	-59.4	-2.09	-0.61	-1.48
2018	143.2	55.9	-61.0	-2.11	-0.59	-1.52
2019	142.6	53.6	-62.4	-2.12	-0.58	-1.54
2020	142.1	51.4	-63.8	-2.13	-0.56	-1.57
2025	140.1	42.2	-69.8	-2.18	-0.50	-1.68
2030	138.7	35.7	-74.2	-2.24	-0.46	-1.78

19) 연도별 저감량이 매년도 BaU대비 30%로 동일하다 할지라도 경제가 성장함에 따라 절대적 저감량은 미래에 더욱 커지게 된다.

GDP 측면에서도 기술진보의 효과가 뚜렷이 나타나고 있다. 흥미로운 점은 저감 정책이 2008년에 도입되더라도 GDP에 미치는 효과는 그 이전부터 나타난다는 것이다. 이는 본 모형이 완전예측능력을 가정한 완전동태모형이기 때문에 경제주체는 미래의 정책변화를 미리 예측하고 현재의 의사결정을 하기 때문이다. 이와 같은 미래의 정책변화가 현재의 의사결정에 미치는 효과를 정책예시효과(preannounced effect)라 부른다. 온실가스 저감정책이 GDP에 미치는 정책예시효과는 ITC가 없는 경우가 있는 경우에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 항상소득가설에서와 같이 미래의 소비변화를 최소화하기 위한 하나의 경제행위로 해석할 수 있다. 온실가스 저감 정책이 도입되어 미래의 GDP감소가 클 것으로 예측되면 소비자는 현재의 소비를 줄이고 저축을 늘려 미래의 소비감소를 최소화할 것이다. 따라서 온실가스감축이 이행되면 미래의 소득감소가 크게 나타나는 No ITC하에서 현재의 GDP손실이 크게 나타난다.

온실가스 감축이 시작되는 2008년부터의 GDP변화를 살펴보기로 하자. ITC를 감안하면 이산화탄소 감축으로 인한 GDP 손실은 ITC가 없는 경우에 비해 대폭 감소할 것으로 예측된다. ITC가 없는 경우, 2008년에 GDP 손실이 1.72%이던 것이 2030년에는 2.24%로 상승한다. 이는 기술진보효과가 없는 상태에서 감축해야할 절대적 저감량이 2008년에 비해 2030년에 많기 때문이다. 반면 ITC가 있는 경우 BaU 대비 2008년의 GDP 손실은 0.73%에서 2030년에 0.46%로 점차 줄어드는 것으로 나타나고 있다. 이는 시간이 지남에 따라 절대적 저감량이 상승하지만 기술 또한 진보하기 때문이다. 다시 말해서 ITC의 증가효과가 저감량 증가효과를 상쇄하는 정도가 시간이 지남에 따라 점점 더 커지기 때문이다. 따라서 ITC가 없는 경우에 비해 ITC가 있는 경우의 GDP손실은 2008년에 0.99%p감소하고 2030년에는 1.78%p만큼 감소한다.

2. R&D 투자 및 물적 투자 변화

물적투자와 R&D투자 변화를 살펴보면, ITC가 있는 경우에 기술이 진보함에도 불구하고 GDP 손실이 계속해서 발생하는 이유와 ITC가 없는 경우에 GDP 손실이 점차 커지는 이유를 좀 더 명확하게 파악할 수 있다.

〈그림 3〉와 〈표 7〉은 ITC가 있는 경우 BaU대비 R&D투자, 물적투자 및 총 투

자의 변화를 보여주고 있다. R&D 투자는 이산화탄소 감축의무가 시행된 2008년에 BaU 대비 약 6.3%까지 증가하다가 2012년부터 BaU 수준 이하로 떨어지기 시작하여 약 0.7% 감소수준을 유지하는 것으로 나타나고 있다. R&D투자와 달리 물적투자는 BaU 대비 감소율이 2008년에 약 4%로 가장 높게 나타나다가 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과로 온실가스감축으로 인한 총 투자의 감소율은 2008년에 약 2.3%에서 2030년에 약 1.4%으로 줄어들게 된다.

ITC가 온실가스감축 비용을 줄일 수 있음에도 불구하고 R&D투자가 지속적으로 증가하지 않고 이와 같이 초기의 증가가 점차 하락하는 현상은 다음의 두 가지 효과에 의해 설명될 수 있다. 첫 번째로 R&D 투자와 저감활동과의 대체효과(trade off)를 들 수 있다. R&D투자가 증가하여 기술이 진보되면 각 산업의 생산량이 증가한다. 산업의 생산량 증가는 에너지 수요증가를 유발하기 때문에 감축 목표량 달성을 위한 추가적 비용이 발생한다. 따라서 R&D 투자 증가로 인한 생산성증가 효과는 저감비용 상승효과에 의해 상쇄되어 R&D 투자가 지속적으로 증가하지 않는다.

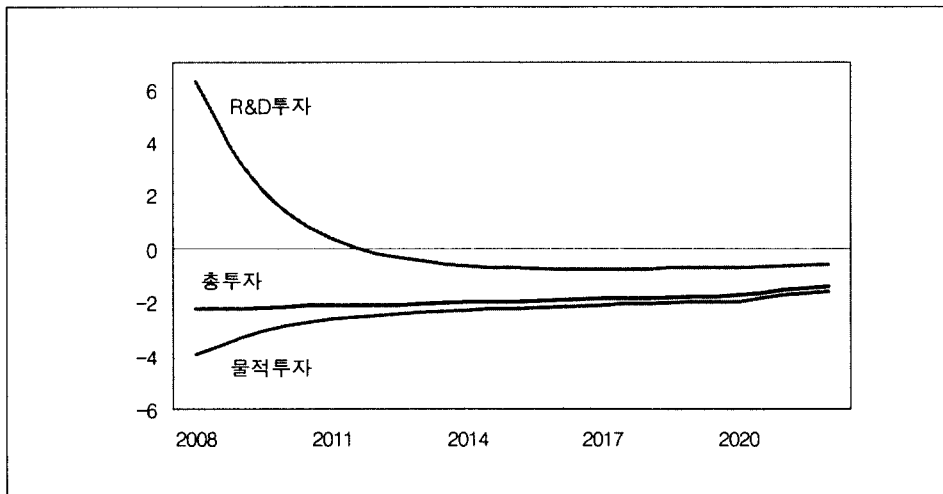
두 번째 이유로서 R&D투자와 물적투자 사이에 발생하는 밀어내기효과(crowding out effect)를 들 수 있다. 온실가스 감축목표를 최소비용으로 달성하기 위해서 감축 초기에 물적자본에 대한 투자를 줄이고 R&D투자를 증가시키는 것이 경제적이다. 그러나 R&D 투자가 증가하고 물적투자가 감소하게 되면 물적자본이 지적자본에 비해 상대적으로 희소한 생산요소가 된다. 따라서 R&D 투자가 증가하면 기술에 대한 이윤이 감소하고 상대적으로 희소한 물적자본에 대한 이윤이 증가하여 초기의 R&D투자 증가율이 점차 하락하고 물적자본에 대한 투자가 점차 증가할 것이다.²⁰⁾ 이상에서 설명한 두 가지 이유로 인해 <그림 2>에서 보듯이 R&D투자와 물적자본에 대한 투자는 반대방향으로 움직이게 된다.

총 투자가 R&D투자와 물적투자의 합으로 구성되기 때문에 이상에서 설명한 두 가지 효과에 대한 순효과는 총 투자의 변화로 나타난다. 본 연구의 실증분석 결과 총투자가 시간이 지남에 따라 감소하지만 계속해서 BaU보다는 낮은 수준에 머무는

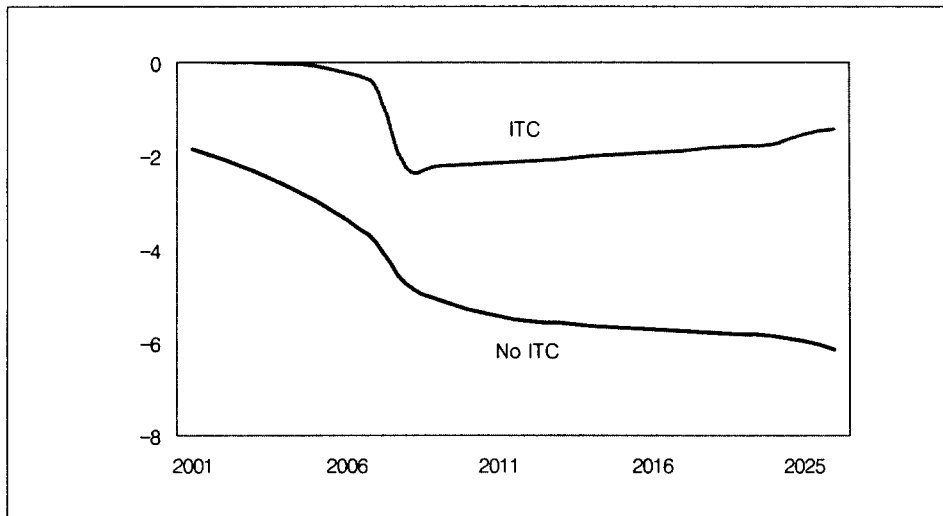
20) Goulder and Schneider(1999) 연구에서도 밀어내기 효과로 인해 ITC가 존재하더라도 저감비용이 발생한다. 본 연구는 Goulder and Schneider와 분석방법과 분석대상이 상이하여 연구결과를 직접 비교하지 않았다. 이들은 미국경제를 대상으로 분석하였다. 그리고 이들 분석은 탄소세가 외생적으로 주어지거나 R&D에 대해 보조금을 지급할 때 나타나는 파급효과 분석에 초점을 맞추고 있다.

것으로 나타나고 있다. 따라서 ITC는 이산화탄소 감축으로 인한 GDP 손실을 축소시켜주는 방향으로 작용하지만 여전히 GDP 손실이 발생하는 것으로 분석된다. 그러나 <그림 3>에서 보듯이 ITC가 없는 경우에는 물적자본에 투자 감소를 구축할 수 있는 R&D투자가 없기 때문에 총 투자는 지속적으로 감소하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 ITC가 없는 경우 GDP 손실은 온실가스 감축량 증가와 더불어 증가하게 된다.

<그림 2> 정책유인기술도입 하의 BaU대비 R&D투자, 물적투자 및 총투자변화(%)



<그림 3> BaU대비 총 투자변화 (%)



〈표 7〉 감축의무 이행시 BaU 대비 투자변화 (%)

	No ITC	ITC		
	총투자	총투자	물적투자	R&D투자
2008	-4.72	-2.26	-3.98	6.31
2009	-5.06	-2.21	-3.30	3.15
2010	-5.27	-2.18	-2.90	1.37
2011	-5.41	-2.14	-2.65	0.37
2012	-5.51	-2.10	-2.49	-0.18
2013	-5.58	-2.06	-2.38	-0.48
2014	-5.63	-2.01	-2.30	-0.64
2015	-5.68	-1.97	-2.23	-0.72
2016	-5.71	-1.92	-2.17	-0.75
2017	-5.75	-1.88	-2.11	-0.76
2018	-5.78	-1.83	-2.06	-0.75
2019	-5.81	-1.79	-2.01	-0.74
2020	-5.84	-1.74	-1.96	-0.72
2025	-5.98	-1.54	-1.73	-0.64
2030	-6.14	-1.41	-1.59	-0.59

3. 에너지소비 및 산업 생산량 변화

에너지원별 수요 감소는 탄소배출기여도에 따라 결정된다. 〈표 8〉에서 보듯이 탄소배출 기여도가 높은 석탄 수요 감소는 온실가스 감축목표(BaU 대비 30%)보다 많은 40%에 달한다. 석유의 경우 감축목표 보다 낮은 BaU 대비 약 20%의 수요 감소가 예측된다. 상대적으로 청정연료인 천연가스는 10%의 내외의 감소율을 기록할 것으로 분석이 된다.

본 모형에서 기술진보는 에너지효율이나 에너지 단위당 배출비율에 직접적으로 연계되어 있지 않다. 따라서 온실가스감축 목표는 에너지수요 감소로 달성될 수밖에 없기 때문에 ITC가 있는 경우와 ITC가 없는 경우의 에너지수요의 변화가 유사하게 나타난다. 단지 에너지원별 수요 감소에서 약간의 차이가 나는 이유는 ITC가 에너지원간 또는 에너지와 다른 생산요소간 대체성에 영향을 미치기 때문이다.

산업생산량 변화는 에너지 의존도가 높은 산업이 상대적으로 의존도가 적은 산업에 비해 BaU 대비 감소율이 높게 나타나고 있다. 전력산업을 제외하고는 모든 산업의 생산량 감소는 ITC가 있는 경우에 적게 나타나고 있다. 전력생산은 ITC가

없는 경우에 BaU 대비 16.8%, ITC가 있는 경우에 18.8% 감소하는 것으로 나타나고 있다. 전력 다음으로 생산량 감소가 큰 산업이 에너지 집약산업이다. 에너지 집약산업의 생산량 감소는 ITC가 없는 경우에 BaU 대비 7.8%, ITC가 있는 경우에 4.3% 감소하는 것으로 나타나고 있다. 총 산업 생산량은 ITC가 없는 경우에 BaU 대비 4.5%, ITC가 있는 경우에 2.1% 감소하는 것으로 나타나고 있다. 시간 경과에 따른 감소율은 GDP 변화와 유사하게 ITC가 없는 경우에는 점차 증가하는 반면 ITC가 있는 경우에는 점차 하락한다.

〈표 8〉 BaU 대비 2008년도 에너지소비 및 산업별 생산량 변화 (%)

		No ITC	ITC	ITC와 No ITC 차이(%p)
일차에너지소비	석탄	-41.8	-41.2	-0.6
	천연가스	-8.8	-13.5	4.8
	석유	-20.9	-20.7	-0.1
산업생산량	전력	-16.8	-18.8	2.0
	농업	-2.0	-0.3	-1.7
	에너지집약	-7.8	-4.3	-3.6
	기타 산업	-3.4	-1.3	-2.1
	TOTAL	-4.5	-2.1	-2.4

4. 민감도분석

〈표 9〉는 주요 모수값 변화에 따른 민감도 분석을 보여주고 있다. 분석결과에 가장 큰 영향을 미치는 모수는 기술변수와 관련된 γ_a 와 온실가스 저감율이다. 〈그림 4〉은 γ_a 가 0.01일 때 톤당 저감비용과 GDP 손실을 각각 1이라고 가정하고 γ_a 변화에 따른 톤당 저감비용과 GDP 손실 변화를 보여주고 있다. γ_a 가 0.001로 하락하면 GDP 손실은 약 2배 증가하고 톤당 저감비용은 약 1.6배 증가한다. 반대로 γ_a 가 0.02로 증가하면 GDP 손실은 약 0.7배 증가하고 톤당 저감비용은 약 0.5배 증가한다. GDP 손실이 톤당 저감비용보다 γ_a 변화에 더 민감하게 반응을 보이고 있다.

BaU 대비 저감율에 대한 GDP손실과 톤당 저감비용의 민감도는 〈그림5〉에 나타

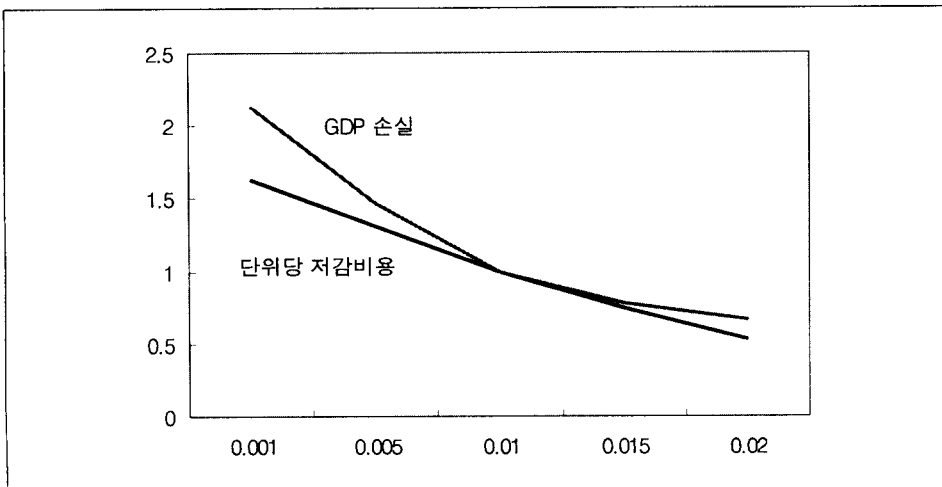
나 있다. 저감율이 BaU 대비 30%일 때 톤당 저감비용과 GDP 손실을 각각 1이라고 할 때, 저감율이 20%로 감소하면 GDP 손실은 약 0.3배 증가하고 톤당 저감비용은 약 0.26배 증가한다. 반대로 저감율이 50%로 증가하면 GDP 손실은 약 3.6배 증가하고 톤당 저감비용은 약 3.9배 증가한다. 저감비용이 증가할수록 톤당 저감비용이 GDP 손실보다 민감하게 반응을 한다.

이와 같이 본 연구결과는 모수값에 민감하게 반응하고 있어 현실 데이터를 통해 보다 엄격한 모수 추정이 요구된다 하겠다.

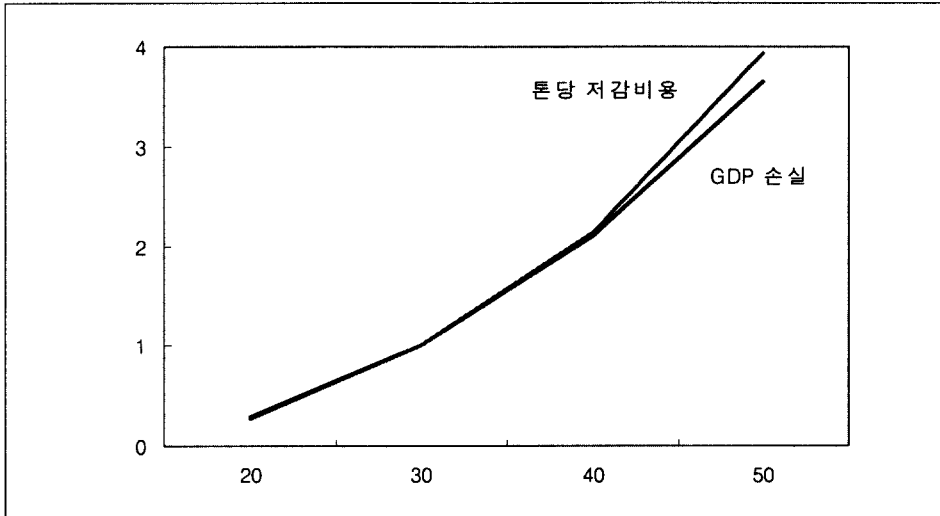
〈표 9〉 모수값 변화에 따른 민감도분석

	2008년도		2030년도	
	저감비용	BaU 대비 GDP 변화 (%)	저감비용	BaU 대비 GDP 변화 (%)
$\gamma_a = 0.005$	115.5	-1.07	77.11	-1.06
$\gamma_a = 0.015$	65.2	-0.57	8.32	-0.22
통시간 대체탄력성 = 0.2	81.7	-0.38	18.9	-0.35
통시간 대체탄력성 = 0.8	90.3	-0.95	42.61	-0.52
통시간 대체탄력성 = 2	93.4	-1.15	51	-0.58
A, K, L, E 간 대체탄력성 = 0.5	91.1	-0.63	37.83	-0.28
A, K, L, E 간 대체탄력성 = 2	82.3	-0.95	32.19	-0.46
BaU 대비 저감율 20%	23.1	-0.21	0.23	-0.01
BaU 대비 저감율 50%	345.6	-2.66	215.17	-2.4

〈그림 4〉 γ_a 변화에 따른 GDP손실 및 저감비용 변화



〈그림 5〉 BaU 대비 온실가스 저감을 변화에 따른 GDP손실 및 저감비용 변화



VI. 결 론

온실가스감축과 관련된 기존의 대부분의 연구는 기술진보를 저감정책도입과 상관없이 자동적(autonomous)으로 이루어지는 외생변수로 간주하고 있다. 따라서 저감정책도입이 R&D와 기술개발에 영향을 미치고 이는 다시 저감정책 자체에 영향을 주는 순환적인 관계를 설명하는 데에 한계를 가지고 있었다. 따라서 본 연구는 온실가스 저감정책으로 인해 유발될 수 있는 기술진보가 내생적으로 결정되는 연산 가능한 일반균형모형을 구축하였다. 정책유인기술진보(ITC)의 내생화는 Romer (1986)와 Lucas(1988)의 내생적 성장모형에서와 같이 비경합적인 기술진보뿐만 아니라 Rebelo(1991)와 Jones and Manuelli(1990) 모형에서와 같이 경합적인 기술진보를 혼합하여 구축하였다. 따라서 본 모형은 기술이 갖는 두 가지 특성, 즉 이전 효과(spillover effect)와 이윤동기에 의한 기술진보를 동시에 반영하고 있다고 할 수 있다.

본 연구는 정책유인기술이 온실가스저감정책 뿐만 아니라 한국경제에 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다. 2008년부터 매년 BaU 대비 30%씩 온실가스를 감축할 때 톤당 저감비용과 GDP 손실에 미치는 결과를 요약하면 다음과 같다. ITC가 없는 경우에 비해 ITC가 도입되면 2008년에 톤당 저감비용은 63,000원

/TC(약 42%) 감소하고 GDP 손실은 1%p(약 6.7조원) 감소하는 것으로 분석된다. 장기적으로 ITC의 비용감소효과는 더욱 커져 2030년에 톤당 저감비용은 103,000원 /TC(약 74%), GDP 손실은 약 1.8%p(약 23조원) 감소하는 것으로 분석된다. 그러나 R&D 투자와 저감활동 간의 대체효과(trade off)와 R&D투자와 물적투자와의 밀어내기효과(crowding out effect)로 인해 ITC를 감안하더라도 GDP손실은 여전히 발생하는 것으로 분석된다.

마지막으로 향후 보완해야할 점들을 지적하면 다음과 같다. 본 연구결과는 모수 값 변화 특히 γ_a 값 변화에 매우 민감하다는 단점이 있다. 따라서 보다 신뢰성 있는 γ_a 값을 추정하기 위해서는 보다 합리적인 방법으로 기술진보 데이터를 추정해야할 것이다.

또한 본 연구에서는 연산의 단순화를 위해 R&D 투자가 완전경쟁시장 하에서 공급될 수 있다고 가정하고 있다. 그러나 현실경제에서는 R&D투자에 대한 불확실성과 비가역성(irreversibility)이 존재하여 기다림에 대한 선택의 가치가 높을 수 있으며, 유출효과가 존재하여 투자가 더디게 일어날 수 있다. 이러한 이유로 인해 모든 나라에서 R&D투자는 특허권 등 제도적 장치를 통해 독점적 이윤을 보장하고 있다. 따라서 완전경쟁시장을 가정하는 것보다 R&D투자에 대한 독점적 이윤이 보장되는 불완전 경쟁시장을 가정하고 분석하는 것이 보다 합리적이라 할 수 있다.

향후 연구에서는 기술진보의 파급경로를 보다 다양화할 수 있는 분석모형이 요구된다. 본 연구에서는 기술진보가 타 산업의 생산성을 향상시키는 이전효과(spillover effect)만을 고려하였다. 그러나 온실가스 저감정책이 도입되면 에너지절약형 기술(에너지효율 향상기술)이 빠르게 진보하거나 동일한 에너지를 사용하더라도 탄소를 적게 배출할 수 있는 기술개발이 빠르게 진행될 수 있다. 온실가스저감정책과 관련된 다양한 기술진보를 고려한 분석은 향후 연구과제로 남겨 두기로 하겠다.

■ 참고 문헌

1. 강승진, “에너지-경제-환경 시스템의 모형화에 관한 연구,” 에너지경제연구원, 연구보고서, 1999, 99-12.
2. 손양훈, 신동천, “환율변동이 에너지 산업에 미치는 영향,” 『경제학연구』, 제45집 제1호, 1997, 123-139.
3. 신동천, “규모의 경제와 탄소세의 경제적 효과: CGE모형을 이용한 분석,” 『자원·환경경제연구』, 제9권 제5호, 2000, 973-997.
4. 조경엽, “온실가스 저감정책과 파급효과: Global CGE 모형에 의한 분석,” 『경제학연구』, 제48집 제4호, 2000, 323-368.
5. 조경엽, “내생화된 불확실성 기술진보와 온실가스 저감정책,” 에너지경제연구원, 기본연구보고서, 2001, 2001-04.
6. 조하현, “거시경제학의 최근 동향: 내생적 성장이론,” 『경제학연구』, 제44집 제1호, 1996, 157-184.
7. Bernstein, P. M., W. O. Montgomery, T. F. Rutherford and G. F. Yang, “Global Impacts of the Kyoto Agreements: Results from MS-MRT Model,” *Resource and Energy Economics* 21, 1999, 375-413.
8. Burniaux, J., J. Martin, G. Nicoletti, and J. O. Martins, “A Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO₂ Emission: A Technical Manual,” OECD Working Papers 116, 1992.
9. Buonanno C., C. Carraro and M. Galeotti, “Endogenous Induced Technology and the Cost of Koto,” *Resource and Energy Economics* 25, 2003, 11-34.
10. Goulder, L. H. and S. H. Schneider, “Induced Technological Change and the Attractiveness of CO₂ Abatement Policies,” *Resource and Energy Economics* 21, 1999, 211-253.
11. Gerlagh R. and B. van der Zwaan, “Gross World Product and Consumption in a Global Warming Model with Endogenous Technology Change,” *Resource and Energy Economics* 25, 2003, 35-58.
12. Greenwood, J. and B. Jovanovic, “Financial Development, Growth, and the Distribution of Income,” *Journal of Political Economy* 98, 1990, 1076-1107.
13. Jones, L. E. and R. E. Manuelli, “A Convex Model of Equilibrium Growth: Theory and Implications,” *Journal of Political Economy* 98, 1990, 1008-1056.
14. Lau, A. P. and T. F. Rutherford, “Approximation Infinite Horizon Models in a Complementarity Format: A Primer in Dynamic General Equilibrium Analysis,” *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2001,
15. Lucas, R. E., “On the Mechanics of Economic Development,” *Journal of Monetary Economics* 22(1), 1998, 3-42.
16. Rasmussen, T. N. and T. F. Rutherford, “Modeling Overlapping Generations in a Complementarity Format,” Department of Economics, University of Aarhus and University of Colorado, 2001.

17. Rebelo, S., "Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth," *Journal of Political Economy* 99, 1991, 500-521.
18. Romer, P. M., "Increasing Returns and Long Run Growth," *Journal of Political Economy* 94(5), 1996, 1002-1037.
19. Romer, P. M., "Endogenous Technological Change," *Journal of Political Economy* 98(5) part 2, 1990, 71-102.

■ 부 록

A1. 생산부문

〈그림 A〉에 나타나 있듯이 $E_{i,t}$ 의 복합단계는 에너지간 대체정도에 따라 매우 복잡한 구조로 구성된다. t 기에 부문 i 에서 사용한 총 에너지 $E_{i,t}$ 는 非전력복합 에너지재화 (NEL_i)와 전력에너지 (ELE_i)의 CES 방정식으로 정의하였다.

$$E_{i,t} = [a_{ele} ELE_{i,t}^{\rho_e} + a_{nel} NEL_{i,t}^{\rho_e}]^{\frac{1}{\rho_e}} \quad (A1)$$

부문 i 에서 수요되는 非전력복합에너지는 다음과 같이 석유·가스복합재화 (OCG_i)와 원유 ($CRUD_i$)와 천연가스 (LNG_i)의 CES식으로 구성된다.

$$NEL_{i,t} = [a_{ocg} OCG_{i,t}^{\rho_{nel}} + a_{crud} CRUD_{i,t}^{\rho_{nel}} + a_{lng} LNG_{i,t}^{\rho_{nel}}]^{\frac{1}{\rho_{nel,i}}} \quad (A2)$$

그리고 부문 i 에서 수요되는 석탄·석유·가스복합재화는 도시가스 ($CGAS_i$), 석탄제품 ($COAL_i$)과 석유제품 (OIL_i)과의 CES식으로 생산된다.

$$OCG_{i,t} = [a_{oil} OIL_{i,t}^{\rho_{ocg}} + a_{cgas} CGAS_{i,t}^{\rho_{ocg}} + a_{coal} COAL_{i,t}^{\rho_{ocg}}]^{\frac{1}{\rho_{ocg,i}}} \quad (A3)$$

본문 식 (1)에 나타난 부문 i 에서 생산된 최종재화 $Y_{i,t}$ 는 〈그림 A〉에 맨 윗 단계에 나타나 있듯이 수출재화와 국내소비재화로 전환된다. Y_i 가 불변전환탄력성 (Constant Elasticity of Transformation)에 의해 수출재화 (XE_i)와 국내소비재화 (XD_i)로 전환된다고 가정하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$[a_{x,i} XE_{i,t}^{\rho_x} + (1 - a_{x,i}) XD_{i,t}^{\rho_x}]^{1/\rho_x} = Y_{i,t} \quad (A4)$$

중간투입재화로 사용되는 아밍톤 복합재화 ($XA_{i,t}$)는 국내재화 ($XD_{i,t}$)와 수입재화 ($XM_{i,t}$)간의 불완전대체관계로 구성된다. 부문 i 와 아밍톤복합재화 i 를

구분하기 위해서 아밍톤복합재화에 붙은 하첨자 i 를 j 로 바꾸어 XA_j 로 표기하기로 하자. 즉 본문 식 (1)에 있는 $XA_{i,ne}$ 는 i 부문에서 사용한 비에너지 아밍톤 재화를 의미하며 식 (A5)에 나타난 XA_j 는 국내에서 소비되는 j 아밍톤 복합재화를 의미한다. 아밍톤복합재화 j 는 생산부문에서 $XA_{i,j}$ 만큼 수요되고, 소비부문에서 $XA_{c,j}$ 만큼, 물적 및 지적자본 투자부문에서 각각 $XA_{k,j}$ 와 $XA_{RD,j}$ 만큼, 정부부문에서 $XA_{g,j}$ 만큼 수요되어 완전히 배분된다.

$$XA_{j,t} = [\alpha_{xa} XM_{i,t}^{\rho_{xa}} + (1 - \alpha_{xa}) XD_{i,t}^{\rho_{xa}}]^{1/\rho_{xa}} \quad (A5)$$

$$XA_{j,t} = XA_{i,j,t} + XA_{c,j,t} + XA_{g,j,t} + XA_{k,j,t} + XA_{RD,j,t} \quad (A6)$$

그리고 각 부문에서 사용하는 아밍톤 복합재화는 비에너지 중간재화 ($XA_{i,ne,t}$)와 에너지중간재화 ($col, crud, oil, gas, ele$)로 구분된다. 따라서 본문 식 (1)에 나타난 $XA_{i,ne,t}$ 는 산업부문에서 사용한 비에너지 아밍톤 복합재화이며 식 (A1), (A2), (A3)에 나타난 원유, 석유제품, 천연가스, 도시가스, 석탄제품 등의 에너지도 각각 산업부문에서 사용된 아밍톤 에너지복합재화로 간주할 수 있다.

A2. 소비부문

가계에서 소비하는 에너지는 생산부문에서와 동일한 단계를 거쳐 복합된다. 따라서 하첨자 i 를 c 로 바꿈으로써 부문 i 에서 사용한 에너지를 가계부문 c 에서 소비하는 에너지로 쉽게 다음과 같이 전환할 수 있다. 다음 방정식에 대한 설명은 생략하기로 하겠다.

$$E_{c,t} = [a_{elec} ELE_{c,t}^{\rho_e} + a_{nel} NEL_{c,t}^{\rho_e}]^{\frac{1}{\rho_e}} \quad (A7)$$

$$NEL_{c,t} = [a_{ocg} OCG_{c,t}^{\rho_{nel}} + a_{crud} CRUD_{c,t}^{\rho_{nel}} + a_{LNG} LNG_{c,t}^{\rho_{nel}}]^{\frac{1}{\rho_{nel}}} \quad (A8)$$

$$OCG_{c,t} = [a_{oil} OIL_{c,t}^{\rho_{ocg}} + a_{cgas} CGAS_{c,t}^{\rho_{ocg}} + a_{coal} COAL_{c,t}^{\rho_{ocg}}]^{\frac{1}{\rho_{ocg}}} \quad (A9)$$

A3. 정부부문

정부는 물적자본과 인적자본의 수익에 대한 소득세 ($\tau_{k,t}$, $\tau_{a,t}$), 제품별 수입에 대한 관세 ($\tau_{m,i,t}$), 근로소득에 대한 소득세 ($\tau_{w,t}$), 소비에 대한 소비세 ($\tau_{c,i,t}$)를 부과함으로써 세수입을 얻고, 이를 정부소비지출 (G_t)과 가계이전 (Tr_t)을 통해 지출한다. 정부 지출과 수입과의 차이는 재정적자 (D_t)로 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau_{k,t} P_{k,t} K_t + \tau_{a,t} P_{a,t} A_t + \sum_i \tau_{m,i,t} X M_{i,t} \\ + \sum_i \tau_{c,i,t} X A_{i,t} + \tau_{w,t} W_t H_t = G_t + Tr_t - D_t \end{aligned} \quad (A10)$$

본 연구에서는 정부예산이 균형에 도달하도록 재정균형조건을 부과하고 재정적자만큼 추가소비세 ($\tau_{c,t}$)가 내생적으로 결정되도록 하였다.²¹⁾ 총 세수입 (ϕ_t) 이 총 지출 (Γ_t)과 일치되도록 소비세가 조정되어 결국 매기의 정부재정적자(D_t)를 0이 된다.

$$\phi_t = \Gamma_t \quad (A11)$$

A4. 국제수지와 투자

본 모형은 소국개방경제 (small open economy)를 산정하고 있기 때문에 수입재화의 가격은 외생적으로 주어진 것으로 간주하였다. 그러나 무역수지불균형으로 인해 발생하는 해외자본이동에 대한 제약은 고정환율제도에서와 같이 환율이 고정되고 해외자본이동에 의해 무역수지불균형이 해소된다고 가정하였다. 소국개방모형 하에서 국제간 자본이동이 자유롭다고 가정할 경우 무역수지균형은 다음과 같이 표기할 수 있다.

21) 이와는 달리 기간별 재정적자는 발생할 수 있으나 전 기간에 걸친 정부예산은 균형이 된다는 조건을 부과할 수 있다. 이를 위해서는 $\sum_t \phi_t = \sum_t \Gamma_t$ 와 같은 제약식이 만족되는 추가적 단일 소비세 (τ_c')가 내생적으로 결정되도록 하면 된다. 이와 같은 제약식이 부과되면 기간별 재정불균형이 발생할 수 있으나 전 기간의 불균형은 해소되어 $\sum_t D_t = 0$ 이 성립된다.

$$\sum_i P_{x,i,t} XE_{i,t} - \sum_i P_{m,i,t} XM_{i,t} + PFX B_t = 0 \quad (A12)$$

여기서 $P_{x,i,t}$ 는 i 재화의 세후수출가격을 나타내며, $P_{m,i,t}$ 는 i 재화의 세후 수입가격을 나타낸다. PFX 는 환율로서 기간에 상관없이 고정된 것으로 가정할 때 불균형은 자본이동 B_t 가 내생적으로 변동함으로써 해소된다. 그리고 해외자본 이동에 따른 국내자본변동은 물적자본만을 변화시키는 것으로 가정하였다.²²⁾

다음은 저축과 투자의 항등식을 보여주고 있다.

$$I_t = \sum_i I_{i,t} = S_t + D_t - B_t - RD_t \quad (A13)$$

물적자본형성에 기여하는 총 투자 (I_t)는 총 저축 (S_t)에 무역수지적자의 합에서 정부 재정적자 (B_t)와 지적자본축적을 위한 R&D투자 (RD_t)를 차감한 것으로 정의된다. 정부 예산이 매 기마다 균형에 도달한다면 $D_t = 0$ 이 되며, 또한 변동환율제도하에서는 $B_t = B_0$ 로 고정된다.

A5. Terminal Condition

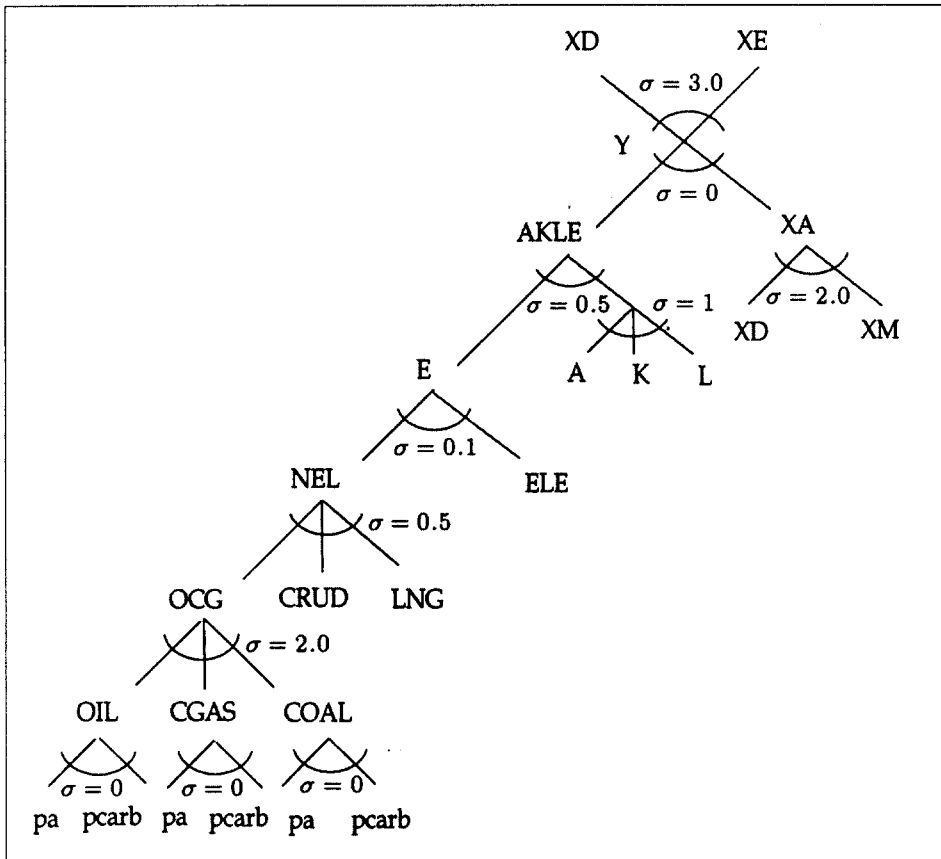
앞에서 설명한 이론적 모형은 시간이 무한(infinite period)하다는 가정을 전제하고 있다. 그러나 시간이 무한하다면 연산모형에서는 모형이 종결되지 않는 문제점을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 해를 도출하기 위해 Lau et al. (2001)이 제시한 방법에 따라 1995년~2030년에 국한된 연산모형으로 전환하였다. 이들이 제시한 방법은 연산모형이 무한시간 조건하에서 도출되는 균형과 근접한 값을 가질 수 있도록 마지막 기에 다음과 같은 제약식을 부과하였다.

22) 이와는 달리 변동환율제도에서와 같이 자본이동이 불변이고 환율이 변동한다고 가정할 때 무역수지균형을 $\sum_i P_{x,i,t} XE_{i,t} - \sum_i P_{m,i,t} XM_{i,t} + PFX_t B_0 = 0$ 으로 정의할 수 있다. 고정환율제도와 달리 변동환율제도에서는 초기 연도의 무역수지적자 (B_0)가 고정되고 환율이 내생적으로 결정된다. 따라서 환율에 하첨자 t 를 첨가하여 PFX_t 로 표기되어있다.

$$\frac{I_T}{I_{T-1}} = \frac{CE_T}{CE_{T-1}} \quad (A14)$$

$$\frac{RD_T}{RD_{T-1}} = \frac{CE_T}{CE_{T-1}} \quad (A15)$$

〈그림 A〉 생산부문의 생산구조



Greenhouse Gas Abatement Policies and Induced Technological Change

Cho, Gyeong Lyeob* · Na, In-Gang**

Abstract

This paper investigates the economic impacts of induced technological change (ITC) on Korean economy by using endogenous computable general equilibrium model as in Goulder and Schneider (1999). This study shows that ITC has significant effect on the abatement policy as well as the Korean economy growth. We find that ITC reduces the emission abatement cost by 43% and GDP loss by 1%p in the short run. In the long run, abatement cost is further declined up to the reduction cost of 73% and GDP loss of 1.8%p. Even though ITC reduces the cost, the total economic cost of greenhouse gas abatement policies still arise due to two effects: trade-off effect between R&D and abatement cost, and crowding-out effect of R&D on investment on physical capital.

Key Words: computational general equilibrium

* Research Fellow, Korea Energy Economics Institute

** Assistant Professor, Department of Business Administration, University of Incheon