

온실가스저감 및 신재생에너지 확대 위한 정책 포트폴리오의 과급효과 분석: 연산일반균형모형을 활용한 분석*

여영준* · 정성문** · 연정인*** · 오인하**** · 이정동*****

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

온실가스 저감 목표 실현을 위하여 우리나라의 경우, 온실가스 감축을 위한 에너지효율 향상 및 신기술/대체에너지 개발 부문의 R&D 투자 등 해당 부문의 다양한 정책이 도입 및 예정되어 있다. 온실가스 저감을 위한 탄소 배출 저감기술 및 신재생에너지 기술개발 분야의 정부 R&D 투자가 지속적으로 증가 및 대형화되는 추세이며, 이는 에너지 및 환경 부문의 국가 연구개발 투자 예산 규모가 연 평균 10%의 증가율을 보이는 것을 통해 파악할 수 있다. 이처럼, 우리나라뿐만 아니라 대부분의 국가들에 있어서 기후변화 문제 해결을 위하여 탄소저감 기술 및 신재생에너지 부문의 R&D 투자 확대 및 R&D 보조금 증대 정책에 초점을 맞추고 있는 상황이다. 하지만 이러한 R&D 투자 및 R&D 지원의 경우, 새로운 기술 개발 (invention)에 초점을 맞춘 정책으로, 이를 통해 기술혁신 결과물의 수용 (adoption) 및 확산(diffusion)을 함께 고려할 수 있는 정책 설계가 이루어져야 함을 다양한 선행연구들에서는 주장하고 있다. 예로, 우리나라 에너지 부문의 R&D의 경우 높은 R&D 성공률에도 불구하고, 시장창출로 연결되는 경우가 부족한 점이 한계점으로 지적되고 있다. 그러므로, 온실가스 배출 감축 목표와 신재생에너지 보급 확대라는 목표 달성을 위해서는 기술 주도 (Technology Push) 정책과 시장 주도 (Market Pull) 정책 간의 유기적 결합을 통한 정책 포트폴리오 설계가 이루어져야 한다.

즉, 지속적인 정부의 에너지 및 환경 부문에 대한 R&D 투자 확대와 더불어 국내 시장활성화를 위해 민간 R&D 투자 확대를 유도할 수 있는 방안 수립과 적절한 시장 기반의 정책 수립이 필요한 시점이라 할 수 있다. 그에 따라, 해당 온실가스 배출감축 목표 달성을 위해 우리나라 정부는 2015년부터는 배출권거래제를 실시하여 시장 기능의 활용을 통해 산업계의 탄소비용을 경감시키고, 국제 탄소시장을 대비하려는 계획이 있다. 이와 더불어, 배출권거래제를 시행하는 많은 국가들에서는 발전차액지원제도 (FIT; Feed in Tariffs) 및 신재생에너지 공급의무화제도 (RPS; Renewable Portfolio Standards) 등의 신재생에너지 보급확대 정책 시행을 통해 전체적인 온실가스 배출량을 줄이면서도 지속가능한 발전을 이루려고 노력하고 있다. 온실가스 배출량의 부문 별 비중을 살펴보았을 때, 에너지 부문이 차지하는 비중이 약 85%에 달하고 있는 점을 보았을 때, 에너지 부문이 기후변화 대응의 핵심 부문임을 각 국은 인지하고 있다. 이러한 배경 하에서 우리나라 정부 역시

* 여영준, 서울대학교 기술경영경제정책대학원 박사과정, 010-6388-2567, yyj913@snu.ac.kr

** 정성문, 서울대학교 기술경영경제정책대학원 박사과정, 010-9345-6758, narkimess@snu.ac.kr

*** 연정인, 서울대학교 기술경영경제정책대학원 박사과정, 010-8523-7837 yji1128@snu.ac.kr

**** 오인하, 건국대학교 신산업융합과 조교수, 02-450-0446, inhaoh@konkuk.ac.kr

***** 이정동, 서울대학교 기술경영경제정책대학원 교수, 02-880-8386, jeongdonglee@gmail.com

※ 본 연구는 2014년 KISTEP Fellowship Program의 일환으로 진행된 연구로서, 해당 결과물은 한국과학기술기획평가원 (KISTEP)에 귀속되어 있음을 밝힙니다.

2012년부터 기존의 발전차액지원제도로부터 신재생에너지 공급의무화제도로 전환하여, 신재생에너지 보급 확대를 위한 시장 기반의 정책을 실현하고자 노력하고 있다.

이처럼, 우리나라를 비롯한 세계 주요 국가들은 기후변화 대응 및 지속가능한 발전을 위해 온실가스 감축 정책과 에너지정책 등을 종합적으로 고려하고, 이와 더불어 이러한 환경 및 에너지정책이 효과적으로 시행될 수 있는 기술개발 부문에 대한 투자를 적극적으로 확대하고 있는 상황이다. 이러한 다양한 정책들을 통합적으로 고려하여 감축 package를 시행하는 데 있어서는 국내적 상황을 반영하여 자국의 산업 경쟁력에 손실을 주지 않는 방향으로 설계되어야 하는 것이 마땅하다. 그러나 우리나라의 경우 단순히 단일 정책의 효과성에만 초점을 맞춘 부분균형적 접근에 집중하는 경향이 매우 뚜렷하여 나머지 하나의 정책이 다른 정책에 미치는 영향(상보성 혹은 상충성)을 고려하는 전체적인 접근에는 소홀해온 것이 사실이다. (강희찬, 2012) 이렇게 우리나라에서 현재 시행하고 있거나, 도입 예정인 에너지 및 환경정책의 동시 도입에 따른 효과성 분석이 제대로 이루어지지 않은 상황에서 관련 기술 부문에 대한 R&D 투자만을 확대하는 것은, 경제 전체적으로 매우 비효율적인 결과를 낳을 수도 있을 것으로 판단한다. 그에 따라, 본 연구에서는 우리나라의 에너지 및 환경부문의 R&D 투자를 통한 기술개발 주도의 온실가스 감축 목표 실현과 그리고 배출권거래제 및 신재생에너지 공급의무화제도 등의 시장기반 정책 기반의 온실가스 감축목표 실현에 따른 파급효과 분석을 우선적으로 진행하고, 더 나아가 현재 우리나라가 시행 예정인 정책 혼합의 효과성을 분석하고자 한다. 이를 통해, 2015년 배출권거래제 도입을 앞둔 시점에 있어서, 정부가 추진하고 있는 정책혼합 실행에 대한 타당성을 분석함으로써 향후 우리나라의 온실가스 감축목표 달성을 위한 정책혼합의 방향성을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 연산일반균형 (Computable General Equilibrium, CGE) 모형에 기반한 분석을 진행하였다. 연산 일반균형 모형은 한국 경제 전반의 생산과 소비, 물적 흐름, 에너지 소비 양태를 묘사하며, 경제를 대표적 생산 및 소비주체로 이루어졌다고 가정하고 경제구조를 주체 간에 상품과 요소가 출입되는 생산 및 효용 함수로 연결하여 나타내고 있다. 생산자 및 소비자가 비용 최소화와 효용 극대화를 위한 최적의 합리적 선택을 하고 있다는 가정 하에 기준연도 경제구조의 자료를 기준으로 목적함수와 제약조건 등을 만들어 낸다. 이렇게 보정된 일반균형 경제체제는 다양한 충격실험을 가능하게 한다. 즉 어떠한 규제나 정책 등의 외부적 충격이 있을 때, 모형이 새롭게 찾는 균형 상태와 기존의 균형 상태를 비교함으로써 충격의 거시경제적 효과를 묘사할 수 있게 된다. 이렇게 연산일반균형 모형은 미시경제이론과 거시경제이론을 바탕으로 구축되는 미시-거시 시스템의 특성이 있다. 정책이나 규제의 효과 전망은 하향식 모형인 연산일반균형 모형에서 주로 기준안 대비 주요한 거시변수의 증가분 또는 감소분으로 표시되는데, 기준안에 전원 구성의 변화가 포함되어 있지 않는 경우에는 분석된 값이 정책효과를 제대로 평가할 수 없다는 문제가 발생한다. 이러한 이유 때문에 전력부문 관련 에너지 정책 효과분석을 시행하는 데 있어 하향식 모형에, 발전기술을 고려할 수 있는 상향식 모형을 추가한 하이브리드 모형의 필요성이 대두되고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 전원구성 및 전원계획을 고려하고 적용시킬 수 있는 모형을 개발하여 이에 따라 신재생에너지 공급의무화제도와 배출권거래제 등의 에너지 및 환경정책 도입에 따른 경제전반의 파급효과를 진행하고자 한다.

II. 선행 연구

1. 에너지 및 환경 부문 정부의 정책 개입 형태

Jaffe (2005)는 기후변화 대응에 있어서 이러한 기술혁신 및 기술변화가 매우 중요하나, 경제 주체들의 자발적인 기술혁신을 가로막는 장애물로서 기술혁신이 가지는 긍정적인 외부성을 언급하였다. 일반적으로 기술혁신은 공공재의 성격을 가지고 있으며, 스페일오버 효과 (spillover effect)를 통해 사회 전체에 확산되어 경제적 후생을 증진시키게 된다. (Geroski, 1995) 하지만, 기술혁신에 성공한 기업 입장에서는 성과나 이득을 전유하지 못하거나 충분히 보상받지 못하기 때문에, 기술혁신에 대한 경제적 유인이 미흡하여 사회 전체적으로 적정 수준의 기술혁신이 이루어지지 못하게 된다. 그에 따라, Jaffe (2005)와 Popp (2011)는 기후변화 대응에 있어서 기술혁신이 매우 중요하게 고려되고 있는 상황에서 두 종류의 시장실패를 해결하기 위한 정부의 주도적인 노력이 필요함을 강조하였다. 첫 번째는 환경오염 및 온실가스 배출이 지니는 부정적 외부성이며, 두 번째는 바로 기술혁신이 지니는 긍정적인 외부성임을 주지하였다. 즉, 저탄소 기술은 온실가스 배출과 기술발전이 가지는 두 가지 상반되는 외부성으로 인해 기술변화의 역동성이 저해되는 장애가 존재한다는 것이다.

이러한 맥락 하에서 윤우진 (2009)는 이 같은 이중의 외부성으로 인하여 기후변화 대응을 위한 친환경기술의 개발과 확산은 자발적인 시장의 힘에 의존하기보다는 공공 정책의 개입에 의해 사회적으로 적정한 수준까지 확대해 나갈 필요가 있음을 강조하였다. 더욱이 기후변화는 그 자체가 매우 불확실하며 개발된 기술이 기후변화 방지에 미치는 영향은 오랜 검증이 필요하기 때문에 관련된 기술혁신은 큰 리스크를 안게 되기 때문에 이러한 정부의 역할은 더욱 중요함을 윤우진 (2009)은 밝히기도 하였다. 또한, 시장실패 문제와 더불어 에너지 산업 및 부문이 가지는 특수성 역시도 대체에너지 및 저탄소 기술에 대한 연구개발에 있어서 민간 부문의 자발적 투자가 부족한 원인으로 지적되기도 한다. 에너지 부문에서는 제품의 차별화가 어려워 틈새 시장이 매우 제한되어 있고, 기존의 에너지 및 발전기술이 다른 대체에너지 기술로 전환되는 데 있어서 상당한 시간 및 자금이 소요되는 것이 일반적이라는 점 등이 에너지 부문 내 자발적 혁신이 저해되는 요인으로 작용하게 되는 것이다.

이상의 논의를 종합하여 보면, 기후변화와 대응을 둘러싼 높은 불확실성 및 에너지 산업의 특수성 등으로 인하여 저탄소 기술에 대한 민간기업의 투자가 만성적으로 부족하다는 사실 등은 가격정책 혹은 기술정책을 막론하고, 정부의 강력한 정책 드라이브가 필요함을 시사하고 있다. (Grubb, 2004; IPCC, 2007; 윤우진, 2010) 더 나아가, Grubb (2004)에 따르면, 기후변화 문제 대응 및 온실가스 감축 목표 실현을 위한 정부의 에너지 및 환경 부문 정책은 기술선도 (technology-push) 정책과 수요견인 (demand-pull) 정책으로 요약할 수 있다. 기술선도 정책이라 함은 기후변화 문제를 해결하기 위한 신기술 개발에 집중하여 저탄소 기술개발 및 대체에너지 관련 부문의 연구개발에 초점을 맞추는 정책 형태라고 할 수 있다. 정부 및 공공기관이 연구개발 자원을 관리 및 배분하는 방식이 이에 해당하며, 주요 정책 수단은 R&D 자금 및 R&D 보조금의 형태로 나타나게 된다. 이러한 기술주도 정책에 대해 지지를 표하는 학자들의 경우에는, 기후변화 문제가 장기간의 온실가스 축적 함수와 매우 연관 깊기 때문에, 우선적으로는 기술 혁신에 초점을 맞추고, 이후에 배출 규제 등과 같은 정책 수단을 도입한다면 기술혁신에 따른 낮은 수준의 저감비용 하에서 온실가스 저감 목표 달성이 가능함을 주장하고 있다.

이에 반해, 수요 견인 정책이라 함은 시장 친화적인 가격 정책이나 규제정책을 활용하여 친환경기술에 대한 수요가 시장 내에서 자연스럽게 창출되고, 확산되도록 유도하는 정책이라 할 수 있다. 이에 해당하는 정책 수단으로는 배출권거래제, 탄소세, 신재생에너지 공급의무화제도 등의 정책수단을 언급할 수 있다. 해당 관점

에 의하면, 시장에 대한 규제정책이 실시된다면 이윤 추구가 목적인 기업들의 경우, 해당 규제정책에 반응하여 다른 기업들에 대한 비교우위를 점하기 위해 저탄소 기술 등의 연구개발 부문에 대한 투자 및 기술혁신 활동을 적극적으로 하게 될 것임을 강조한다. 그에 따라, 이와 같은 수요견인 정책에 대해 지지를 표하는 학자들은 온실가스 배출 규제 등과 같은 정부의 규제정책이 지연되어 시행되면, 해당 부문의 기술혁신 역시도 지연됨을 주장한다. 그에 따라, 본 연구에서는 일차적으로 기술선도 정책의 대표적 정책수단이라 할 수 있는 에너지 및 환경 부문의 R&D 투자에 따른 온실가스 저감목표 실현과 우리나라가 도입 및 시행 예정인 대표적 수요 견인정책이라 할 수 있는 배출권거래제와 신재생에너지 공급의무화제도 시행에 따른 온실가스 저감목표 실현의 경우에 따른 파급효과를 살펴봄으로써 기존의 온실가스 저감을 위한 정부정책 구분에 따른 효과성 분석에 시사점을 제공하고자 한다.

표. 온실가스 저감 위한 정부정책 구분 및 비교

구분	기술선도 (Technology push) 정책	수요견인 (Demand pull) 정책
정의	저탄소기술 및 대체에너지 등의 기술개발의 위험 및 비용을 정부가 부담하여 기술혁신을 선도, 그를 통한 온실가스 저감 목표 실현	저탄소 기술 및 대체에너지 등의 신기술에 대한 수요를 확대시켜 관련 시장을 창출함으로써 기술혁신을 유도, 이를 통한 온실가스 저감 목표 실현
장기적 측면	온실가스 저감목표 실현은 기술혁신에 따른 급진적 혁신 (radical innovations)이 달성되지 않을 경우 매우 높은 수준의 비용을 수반할 것	온실가스 저감목표 실현은 점진적 혁신 (incremental innovations)에 의해서도 충분히 비용효과적으로 가능할 것
주요 정책 수단	연구개발에 대한 정부의 직접적 자금 지원 민간 기술개발에 대한 보조금/세제 지원	- 탄소가격: 탄소세 및 배출권거래제 - 신재생에너지 공급 규제: 발전차액지원 및 신재생공급의무화제도

2. 에너지 및 환경 부문 정책혼합에 대한 논의

우리나라를 포함한 세계 각국에서는 온실가스 감축을 위한 환경 및 에너지 부문에 다양한 정책 수단들이 시행 중에 있다. 강희찬 (2013)은 온실가스 감축을 위한 정책이 종합적인 관점에서 고려되어야 하는 이유로 온실가스 감축정책과 에너지 정책은 서로 불가분의 관계에 있으며, 종합적 시각에서 정책을 고안하지 않게 된다면 각 정책의 본래적 완전성 및 우선순위가 훼손되는 결과를 초래할 수 있으며, 국가 전체적 차원에서도 비효율성을 유발할 수 있기 때문임을 밝혔다. 우리나라 역시도, 2020년까지 온실가스 배출량을 BAU 대비 30% 감축하겠다는 목표 하에, 2015년 배출권거래제를 도입할 예정에 있으며, 이와 더불어 2012년부터는 이미 신재생에너지공급의무화제도가 시행되고 있는 상황이다. 이러한 상황을 두고 강희찬 (2013)은 각각의 개별 온실가스 감축정책의 효과만을 고려하는 부분적인 접근에 집중한 나머지, 각 정책 간의 상호작용 등의 종합적 접근에 소홀하고 있는 상황을 지적하며, 각각의 환경 및 에너지 부문의 정책들이 어느 정도의 기여를 하는지 등에 대한 명확한 근거가 없는 상태로 여러 제도들이 동시다발적으로 도입되는 우리나라의 상황을 경계하기도 하였다.

실제로 그 동안 기후변화 관련 에너지 및 환경정책 평가 및 도입에 따른 파급효과 분석을 하는 데 있어서는 단일 정책수단 분석 혹은 정책수단 간 비교에 초점이 맞추어져 왔다. 이는 각각의 정책수단들이 상호 대체적이라는 생각이 전제되어 있음에 기반한다. 하지만 최근에는 기후변화 관련 정책에 있어서 다수의 정책이 조합의 형태로 시행되고 있어 이에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 사실상 다양한 정책 수단들이

서로 상충되는 것도 있지만 서로 보완적인 역할을 할 수도 있기 때문이다. (Gunningham and Sinclair, 1999; OECD, 2007) Bernear and Stavins (2006)은 다수의 시장실패 문제가 발생하는 상황에서는 단일 정책수단이 아닌 적절한 정책조합이 필요함을 말하기도 하였다. 그리고 Sorrell and Sijim (2003)은 기후변화 관련 환경정책 및 에너지 정책 등의 정책적 수단이 조합의 형태로 시행되었을 때 각각 정책 간의 상호작용을 살피고, 그에 따른 정책 조합 평가를 강조하였다.

이처럼, 정책수단의 조합형태 시행에 따른 효과 분석이 중요한 이유는 정책수단 간 중복이 이중수혜나 이중규제를 야기할 수 있기 때문이다. (한진희, 윤경수, 2010; 정경화, 2010) 규제 혼합은 복수의 시장실패를 보정해줄 수 있지만, 부정적인 효과를 가져올 수도 있다. 이에 Johnstone et al. (2010)은 하나의 정책 목표 달성을 위해 한 개 이상의 정책적 수단을 활용하여 정책 혼합의 형태로 이를 접근하게 된다면 최악의 경우에는 역효과만 일어날 수 있음을 경고하기도 하였다. 따라서 규제수단을 혼합할 때에는 이들 간의 긍정적이고 부정적인 관계를 고려하여 서로 보완적인 규제수단들을 혼합하여야 한다. 우리나라를 포함한 다양한 국가들 내에서 온실가스 감축을 위한 정책들이 혼합의 형태로 시행되고 있으나 이러한 정책 혼합에 따른 효과성 분석은 여전히 미미한 단계라고 할 수 있다. 또한 강희찬 (2013)이 지적하였듯이, 개별 국가 간의 산업구조 및 감축기술 수준이 상이하고 각각의 온실가스 감축 정책 패키지는 국가마다 상이할 수 밖에 없으므로 우리나라가 시행 및 도입 예정인 감축 정책의 조합에 따른 파급효과 분석은 필수적이라고 할 수 있다. 그렇기 때문에 우리나라 정부가 이에 대한 충분한 검토를 거치지 않게 된다면, 이들 정책 조합은 장기적으로 우리나라의 경쟁력을 약화시키는 결과를 초래할 수도 있을 것으로 판단된다. 그에 따라, 본 연구에서는 우리나라 저탄소 경제체제로의 이행을 위한 기술선도 정책과 수요 견인정책 간의 파급효과 분석 이후, 이차적으로 우리나라가 현재 시행 및 도입 예정인 환경 및 에너지 정책 (배출권거래제, 신재생에너지 공급의무화제도) 혼합에 따른 파급효과 분석을 통해 해당 부문 정책 혼합에 대한 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

III. 모형 설계

1. 생산 부문 구조

1) 산업 부문 생산구조 (전력부문 제외)

본 모형에서는 i 산업에서 생산되는 재화는 일반적으로 해당 산업의 노동, 자본, 에너지 투입요소와 아밍톤 중간재화를 사용하여 생산된다. 개별 산업 i 의 최종재 생산구조의 경우 앞에서 언급하였듯이 nested CES 함수 형태로 이루어져 있으며, 각각의 투입물이 그룹화되어 nesting 구조를 갖게 되고 이러한 그룹이 다시 상위 단계에서 nesting 됨으로써 최종재 생산을 이루게 되는 구조를 갖고 있다. 최종재화의 생산 포섭과정을 살펴 보면, 자본, 노동의 투입요소로 구성된 부가가치 부문 (VA)와 전력 및 화석연료 투입으로 구성된 에너지 재화 (E)가 상위 단계에서 복합되어, 부가가치-에너지 복합재화 (VAE)를 형성하게 된다. 여기에서 에너지 복합재화 (E)는 전력 (ELE)과 비 전력 (NELE)으로 나누어지고 비 전력은 이산화탄소를 배출하는 화석연료의 복합재화로 구성된다. 비 전력 부문은 다시 화석연료의 특성에 맞게 석탄과 코크스가 포섭되어 구성되는 고체연료 복합재 (SLD)와 원유, 가스, 연료유, 납사(naphtha) 등이 포섭되어 구성되는 액체 연료 복합재(LQD)의 하부 구조를 이루고 있다. 그리고 각각의 고체연료 복합재와 액체 연료 복합재 내에서 각 화석연료는 복합재화와 이산화탄소가 복합된 화석연료 복합재화를 형성하게 된다. 구체적인 모형 구조에 대한 설명은 본 절에서는 생략하고 아래 그림을 통해 다중 생산구조를 제시하고자 한다.

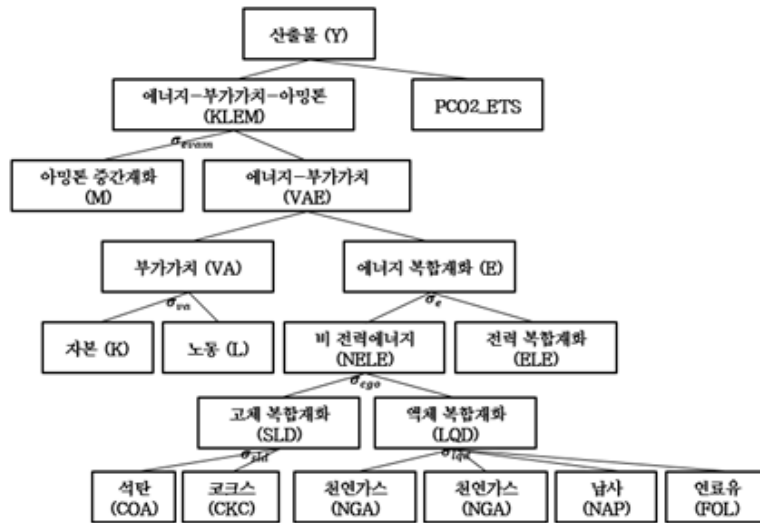


그림. 최종재화 생산 구조 (전력 부문 제외)

2) 전력부문 생산구조

전력 부문을 단일 부문으로 묘사한 다른 모형들과는 다르게, 분석을 위해 설계된 모형 내에서는 개별 발전 기술들이 균일한 재화인 전력을 생산하게 되는 구조를 모형화하고 이에 따라 발전기술 별로 생산된 전력량의 합을 구하여 이를 전력 부문의 생산량으로 계산함으로써 개별 기술들의 특성을 포함하고자 노력하였다. 우선, 발전기술 별로 고정된 자본의 양을 제외한 나머지 부가가치 및 중간재의 결합으로 구성된 발전 복합재화 (CN)은 각각의 발전 기술에 투입이 되는 중간재 및 화석연료 아밍톤 재화와 투입요소 노동과 지식이 포섭되어 구성되는 구조를 가지고 있다. 그리고 이 때 각 요소들 간의 대체탄력성은 0으로 가정되어 레온티에프 함수 형태를 이루게 된다. 그리고 이러한 발전 복합재화 (CN)은 상위 단계에서 발전기술 부문에 투입되는 고정 자본과 함께 결합하여 자본-발전 복합재화 (KM)을 구성하게 된다. Boehringer and Rutherford (2007)와 Ian Sue Wing (2006)는 이렇게 발전기술 별로 투입되는 자본의 양이 발전기술 별 용량 제약을 나타내며 이는 각 발전기술의 특징을 나타내는 요소로 작용함을 언급하였고 본 연구에서도 동일한 방법을 차용하여 발전기술에 투입되는 자본의 양을 발전기술의 특징을 지어주는 특화된 고정 요소(RKE)로 간주하였다.

그리고, 발전 부문의 기술의 경우, 각 발전 기술에 특화된 화석연료를 사용하게 되는데 예로 석탄 기반의 발전기술의 경우, 기술 특화 화석연료 투입 중간재로서 석탄을 사용하게 되는 것이 이에 해당한다고 볼 수 있다. 또한, 해당 모형 내에서는 발전 기술 별 특화된 화석연료 (PA_ELE) 뿐만 아니라, 백스톱 기술 (PBSP)을 고려하고 있는데 하위 단계에서 이들 화석연료와 백스톱 기술이 복합되며, 상위 단계에서는 이들 화석연료 및 백스톱이 복합된 발전기술 재화 (BCK)가 발전 부문 내 지식스톡 (Knowledge)과 함께 복합되는 구조를 취하였다. 이러한 복합 단계는 선행연구 고찰을 통해 파악된 Popp (2002; 2004; 2006)에서 기반한 ENTICE-BR 모형의 구조를 참고한 형태이다. 다시 말해, 전력 생산을 위해 투입되는 에너지 관련 복합재화로서 발전기술 별 특화 화석연료 (PA_ELE) 및 백스톱 기술 (PBSP)이 복합된 재화를 고려한 것이라 볼 수 있으며, 이 복합재화는 상위 단계에서 지식스톡 (Knowledge)과 함께 복합되는 형태를 취하고 있는 것이라 할 수 있다. 이러한 구조는 우선적으로 아래 생산 포섭구조를 통해 확인할 수 있다. 더불어, 이를 방정식의 형태를 취해 나타내보면 아래와 같이 이해할 수 있다.

$$EFF_{ENE} = [\alpha_H H_E^{\rho_{know}} + (PA_{ELE}^{\rho_{bck}} + PBSP^{\rho_{bck}})^{\rho_{know}/\rho_{bck}}]^{1/\rho_{know}}$$

$$PBSP_t = PBSP_0 / H_{E,t}^{\gamma}$$

위의 관련 방정식 및 생산 복합단계를 파악하면 알 수 있듯이, 화석연료-백스톱 복합재화 (BCK)와 지식스톡 (Knowledge) 간 대체관계로 인해 발전 부문의 지식 스톡이 증가하게 되면, 전력 생산과정에서 투입되는 화석연료 및 백스톱 복합재화 (BCK)의 양은 감소하게 된다. 즉, 이는 Popp (2002; 2004; 2006)이 기반한 ENTICE-BR 모형과 유사하게 발전 부문의 지식스톡 증가에 따른 에너지 효율향상을 반영하고자 했음을 이해할 수 있다. 발전 부문 내 지식스톡과 화석연료-백스톱 복합재화 간의 대체탄력성 σ_{know} 는 0.7로 설정하였다. (Popp, 2002; 2004) 또한, 기술 별 특화 화석연료 투입 부문과 백스톱 기술 간에는 불완전 대체관계 ($\sigma_{bck}=0.5$)를 가정하여 백스톱 기술이 화석연료와 비교하여 가격 경쟁력을 확보하였을 때, 시장에 진입할 수 있는 기저를 마련하고자 했다. 백스톱 기술이 기존의 화석연료 대비 생산비용에 대한 신뢰할 만한 자료가 충분한 상태가 아니었기 때문에, 오진규 (2011) 연구 내 신재생에너지 관련 비용 시나리오를 기반으로, 기준 연도인 2010년에는 백스톱 기술 가격이 화석연료 대비 5배 비싸다고 가정하고, 이 가격은 지식스톡 증가에 따라 감소함을 가정하였다.

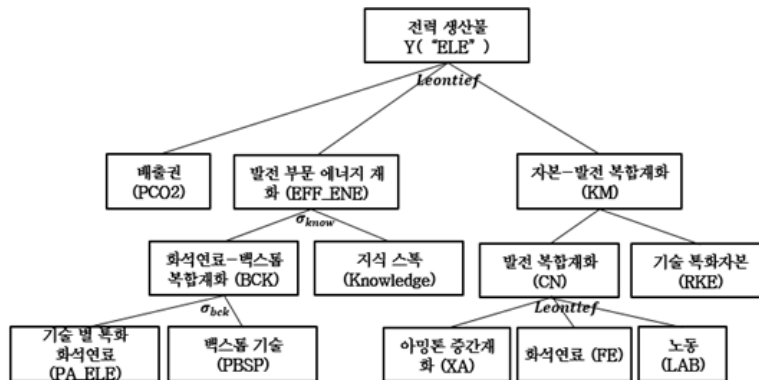


그림. 발전 부문 생산구조

이처럼, 형성된 발전 부문의 에너지 관련 복합재화 (EFF_ENE)는 상위 단계에서, 앞에서 설명한 자본-발전 복합재화 (KM)과 함께 복합됨으로써 전력생산을 하게 되는 구조를 모형 내에 반영하였다. 또한, 배출권거래제가 실시되는 경우에는 발전 부문 내 발전 기술 별 특화 화석연료의 투입량에 따라 배출권이 소모되는 구조를 추가적으로 고려하고자 했다. 이를 종합적으로 고려한, 전력 부문 내 전력 생산구조는 아래 그림과 같다.

2. 지식스톡 및 기술진보 모델링

본 절에서는 해당 연구에서 분석을 위해 설계한 모형 내에 각 산업 별 R&D 투자 및 지식스톡을 반영하여 지식의 파급효과 및 외부효과를 어떻게 반영하였는지 설명하고자 한다. 우선, 이를 위해서는 해당 모형 내에서 기반하고 있는 산업 분류에 따라 각 개별 산업의 R&D 투자량 및 지식스톡의 수준을 추계할 필요가 있다. 이를 위해서 양희원 외 (2012)의 연구 방법을 활용하였으며, 연구개발을 중간 소비로 간주하여 작성된 산업연관표를 바탕으로 연구개발을 자본화하고, 연구개발을 통해 창출된 지식이 생산요소로 작용한다고 가정함으로

써 기준 연도인 2010년의 각 산업 별 (해당 모형에서 기반하고 있는 21개 산업 분류) R&D 투자 수준 및 지식스톡의 수준을 추계하였다. 그에 따라, 각 산업 별 지식스톡은 대표 소비자에게 요소 부존으로 존재함을 가정하였다. 이렇게 추계된 각 산업 별 지식 스톡 및 R&D 투자 수준 을 기반으로 경합적 기술의 특성 및 비경합적 기술의 특성을 모형 내에 반영하고자 하였다.

앞에서 확인하였듯이, 전력 부문의 생산구조 내에서 백스탑 기술이 시장에 진입하기 위해서는 각 발전 기술 별 R&D 투자 비용을 함께 수반함을 파악할 수 있었다. 이는 Goulder and Schniedr (1999), 조경엽 및 김영덕 (2012), 그리고 Popp (2002; 2004; 2006) 등에서의와 같이 신재생에너지 및 백스탑 발전기술은 R&D 투자비용을 요구하는 경합적인 요인이라 이해할 수 있다. 하지만, Goulder and Schneider (1999), 그리고 조경엽 및 김영덕 (2012)는 이러한 경합적 요인 뿐만 아니라 외부효과를 유발하는 지식의 특성 및 비경합적인 요인까지도 함께 고려하고 있다. 그에 따라, 해당 모형 내에서도 비경합적 지식의 속성을 반영하고자 했는데, 비경합적 기술은 생산비용을 유발하지 않으면서 스피로버 효과로서 각 산업의 생산성에 기여하게 되는 방식으로 이를 고려하고자 하였다. (조경엽, 김영덕; 2012)

지식에 의한 외부성 및 스피로버 효과를 지니는 기술진보를 가정하면, 해당 모형 내 산업 부문의 생산함수는 아래와 같이 정리할 수 있다. 앞에서 파악한 방정식과 다르게, $\Phi(H)$ 가 포함되어 있는데, 이는 외부효과로 인한 각 산업 별 생산성의 증가 수준을 나타낸다고 볼 수 있다. 또한, 해당 방정식 내에서 VAE_i 는 자본, 노동, 에너지의 복합재화를 의미하고, 여기에서 E는 백스탑 기술을 포함한 에너지 복합재화를 의미하며, M_i 는 중간재화를 뜻한다. $\Phi(H)$ 를 제외하면, 아래의 각 부문 별 생산 방정식은 규모에 대한 수확불변이라는 특성을 지니지만, 외부효과를 의미하는 $\Phi(H)$ 함수가 고려되게 되면 규모에 대한 체증함수가 되기 때문에 일반균형의 원칙에 어긋나게 된다. (조경엽, 김영덕; 2012) 앞에서 언급하였듯이, 일반균형이 성립하기 위해서는 영의 이윤, 시장 청산, 그리고 소득 균형이라는 세 가지 조건이 충족되어야 하기 때문이다.

$$Y_i = \Phi(H)_i [\alpha_{vae} VAE_i^{\rho_{klem}} + \alpha_m M_i^{\rho_{klem}}]^{1/\rho_{klem}}$$

이를 해결하기 위해 Markusen (1990, 2000)이 제시한 연산 방법을 모형 내에 고려하여 연산 문제를 해결하고자 하였다. 아래의 방정식 내에서 (Y_i^β) 는 지식의 외부효과에 의한 생산성의 증가 수준을 의미하게 되며, β 는 규모에 대한 체증 정도를 나타내는 변수라고 할 수 있다. 더불어, 아래 방정식 내에서 $F(V_i)$ 는 규모에 대한 수확 불변인 방정식이라 할 수 있다. (위의 식에서 $\Phi(H)$ 제외한 식) 여기에서 β 는 산업 별 지식스톡 및 R&D 투자 수준에 따라 외부효과 정도가 달라질 수 있으므로 조경엽 및 김영덕 (2012)의 방정식과 같이 아래와 같이 스피로버의 수준을 모형 내에 반영하고자 했다. 여기에서 $H_t = \sum_i H_{i,t}$ 는 모든 산업의 지식스톡 및 R&D 투자를 합산한 값으로 이는 각 산업 별로 외부효과로서 생산성의 증가에 영향을 주게 되며, 해당 방정식 내에서 γ 의 값은 조경엽 및 김영덕 (2012) 연구를 참고하여 0.03으로 설정하였다. Markusen (1990, 2002)의 경우, 외부효과 정도를 나타내는 β 의 값을 변수가 아닌, 모수로 설정하였지만 해당 모형 내에서는 산업 별 지식스톡의 수준에 따라, 외부효과 정도가 달라짐을 모형 내에 반영하고자 했다.

$$Y_i = (Y_i^\beta) F(V_i) \quad ; 0 < \beta < 1$$

$$\beta_t = H_t^{1/\gamma} / H_t - 1 \quad ; \gamma < 1, H_t = \sum_i H_{i,t}$$

IV. 시나리오 설정 및 결과

1. 시나리오 설계

분석을 위해서 네 가지의 주요 시나리오를 설계하였다. 기준 시나리오 (SC_0) 하에서는 정부가 고려하고 있는 기술 포트폴리오 구성을 통한 온실가스 저감에 대한 접근 (온실가스 감축을 위한 기술 선도 정책)과 그에 따른 파급효과를 파악할 수 있도록 설정하였다. 이에 대응하여, 정부의 온실가스 감축을 위한 시장 기반 정책, 그에 따른 기술에 대한 수요를 견인하는 정책에 따른 파급효과 분석을 위해, 우리나라가 2015년부터 실시 예정인 대표적 온실가스 저감정책 (시장기반의 정책)에 해당하는 배출권거래제를 고려하여 두 번째 시나리오 (SC_1)를 설계하였다. 해당 시나리오 하에서는 산업 부문 별 연구개발 활동 및 지식스톡을 고려하지 않고, 단순히 배출권 시장에 의한 온실가스 저감에 따른 파급효과 분석을 위해 앞에서 언급한 지식스톡 및 기술진보는 모형 내에서 고려하지 않도록 설정하였다. Fischer (2008)가 온실가스 감축 및 기후변화 대응을 위한 정부 정책의 개입형태인 기술선도 정책과 수요견인 정책 가운데 어느 쪽이 더욱 효과적인지, 또는 두 가지 정책을 어떤 조합으로 가져가는 것이 바람직한지에 관해서는 이론적으로, 그리고 실증적으로 분석한 선행연구가 풍부하지 않음을 지적하기도 하였는데, 본 연구에서는 해당 시나리오 간 (SC_0과 SC_1 시나리오) 파급효과 분석 및 비교를 통해 이에 대한 시사점을 제공하고자 한다.

추가적으로 세 번째 시나리오 (SC_2)는 신재생에너지 발전 기술이 존재하고, 산업 부문 별 연구개발 투자에 따른 기술진보가 고려된 상황에서 배출권거래제가 실시되는 경우로 설정하였다. 이는 앞선 시나리오 (SC_0과 SC_1 시나리오) 간 비교에서 더 나아가, 보다 현실적인 우리나라의 환경 및 에너지 부문의 정책 포트폴리오 형태라고 볼 수 있다. 왜냐하면 온실가스 감축이라는 장기 목표를 달성하기 위해서는 기술변화의 방향과 속도를 유지하는 것이 중요하며, 그에 따라, 다수의 국가가 새로운 기술의 개발을 촉진하면서도 현재 이용 가능한 기술의 수요를 늘리는 양면적 전략을 펼치고 있기 때문이다. (윤우진, 2009) 또한, 이는 에너지 및 환경정책의 효과를 분석한 다수의 연구들에서는 기술진보를 모형 내에 고려했을 경우, 기후변화정책의 비용을 줄이는 효과가 있음을 보여주고 있음을 선행연구 고찰을 통해 파악할 수 있었다. (Nordhaus, 1997; Goulder and Schneider, 1999; Goulder and Mathai, 2000; Gerlagh and Zwaani, 2003; 조경엽 및 나인강, 2003; Popp, 2006; Bosetti, 2008) 이를 기반으로, 해당 시나리오 하에서는 우리나라 경제체제에서도 에너지 및 환경 부문의 기술진보가 고려되었을 경우, 온실가스 감축정책 (배출권거래제) 도입에 따른 경제체제 전반의 비용 절감의 효과가 나타나는지 파악을 하기 위한 목적도 있음을 밝히고자 한다.

마지막 네 번째 시나리오 (SC_3) 하에서는 세 번째 시나리오 (SC_2)에서 추가적으로 전력 부문에 대해 신재생에너지 공급의무화제도가 실시되는 경우를 고려하고 있다. 이는 2015년 배출권거래제가 우리나라에 실시된 이후 우리나라가 취하게 될 정책 혼합의 형태라고 볼 수 있다. 우리나라의 경우, 앞에서 언급하였듯이 2020년까지 온실가스 배출량을 BAU 대비 30% 감축이라는 목표를 설정하고, 2015년부터 배출권거래제 도입이 예정되어 있으며, 이를 위해 신재생에너지 확대정책인 신재생에너지 공급의무화제도 (RPS; Renewable Portfolio Standards) 가 2012년부터 시행되고 있는 상황이다. 즉, 네 번째 시나리오 (SC_3)의 경우에는, 에너지 및 환경 부문 내 저탄소 및 대체에너지 기술 개발을 위한 연구개발활동, 배출권거래제, 그리고 신재생에너지 확대정책 (RPS)가 모두 고려된 시나리오라고 할 수 있다. 그에 따라, 해당 시나리오 분석을 통해 우리나라가 온실가스 감축을 위해 설계한 정책 포트폴리오의 효과 분석을 진행하고자 하였다.

또한 보다 구체적으로 해당 시나리오와 앞선 시나리오 (SC_2) 간의 비교 분석을 보다 심도 있게 진행하고자 한다. 왜냐하면 앞선 선행연구들을 통해 살펴볼 수 있었듯이, 기존의 많은 연구들은 탄소세 및 배출권거래

제가 신재생에너지 확대정책과 비교하였을 때 더욱 비용효과적인 정책 수단이라는 점에 동의하고 있다. (강희찬, 2013) 또한, 기존의 연구들은 배출권거래제와 신재생에너지 확대정책이 동시에 시행되었을 경우, 단순히 총 비용만 높이며, 사회적 비효율을 증가시킨다는 결과를 제시했다. 하지만 우리나라의 경우 이들 정책이 혼합의 형태로 시행될 예정임에도 불구하고, 관련된 실증 분석 연구가 매우 부족한 상황이다. 그에 따라, SC_2 시나리오와 SC_3 시나리오 분석을 통해 정부가 현재 추진 중인 온실가스 감축을 위한 에너지 및 환경 분야 내 정책 포트폴리오 구성에 있어서 시사점을 제공하고자 한다. 본 연구에서 분석을 위해 모형 내에서 설계한 시나리오 및 시나리오 별 간략한 설명은 아래의 표를 통해 이해할 수 있다. 또한 분석을 위해 설계된 연산일 균형형 모형의 경우, 정태적 모형이기 때문에 목표 연도를 2020년으로 설정하고 2020년에 나타나는 거시경제 및 산업 별 주요 변수들 간의 증감 비교를 통해 효과 비교를 진행하였다.

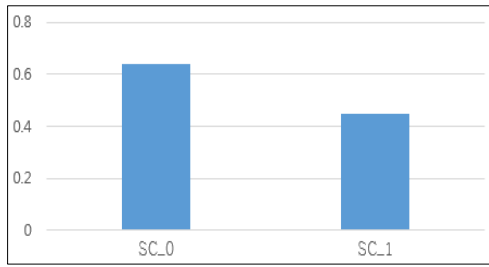
2. 결과 분석

1) 온실가스 감축 위한 기술선도 정책과 수요견인 정책 비교

앞에서 언급하였듯이, 기준 시나리오 (SC_0) 하에서는 정부가 고려하고 있는 기술 포트폴리오 구성을 통한 온실가스 저감에 대한 접근(온실가스 감축을 위한 기술 선도 정책)과 그에 따른 파급효과를 파악할 수 있도록 설정하였다. 이에 대응하여, 정부의 온실가스 감축을 위한 시장 기반 정책, 그에 따른 기술에 대한 수요를 견인하는 정책에 따른 파급효과 분석을 위해, 우리나라가 2015년부터 실시 예정인 대표적 온실가스 저감정책(시장기반의 정책)에 해당하는 배출권거래제를 고려하여 두 번째 시나리오 (SC_1)를 설계하였다.

우선적으로, 이들 시나리오 간의 온실가스 저감 효과를 살펴보면 아래 그림과 같이 파악할 수 있다. 첫 번째 시나리오 하에서는 우리나라의 온실가스 감축 목표인 2020년 BAU 대비 30% 감축 목표라는 제약 조건을 주지 않고, 단순히 연구개발 및 기술진보에 따른 온실가스 감축만을 고려한 경우인데, 이 경우 감축목표를 가지고 배출권거래제가 시행되는 경우를 고려한 두 번째 시나리오인 SC_1과 비교하였을 때 상대적으로 온실가스 감축 효과가 적음을 파악할 수 있다. 저탄소 및 대체에너지에 대한 연구개발 투자정책에서 탄소 가격이 존재하지 않는 경우, 새로운 기술에 대한 연구는 특히 보상받기가 어렵게 된다. 즉, 탄소배출에 가격을 부과하는 정책 없이 탄소 저감기술에 대한 개발을 수행할 유인은 거의 없게 되는 것이다. 그에 따라, 단순히 연구개발 투자와 그에 따른 기술진보에 의한 온실가스 감축 효과는 배출권 거래시장에 의해 탄소 가격이 형성되는 경우와 비교하였을 때 상대적으로 적게 나타나게 됨을 이해할 수 있다.

그리고, 각 시나리오 별 GDP 및 소비 부문의 변화 및 비교는 아래 표를 통해 확인할 수 있다. 이를 통해, 기술정책만을 고려한 시나리오에서 보다 높은 수준의 GDP 및 소비수준을 나타내는 것을 확인하였는데, 이는 지식의 공공재적 특성이 크게 작용하였기 때문으로 분석된다. 그에 따라, 분석 기간 내 산업 별 연구개발 활동에 따른 지식스톡의 축적에 따라 형성되는 사회전체의 지식스톡과 이로 인해 발생하는 외부효과에 의해 생산량이 체증하게 되며, 이는 대표 소비자의 소비수준 및 GDP를 증가시키게 되는 것이다. 이에 대한 결과로서 SC_0 시나리오 하에서의 GDP 및 소비수준이 SC_1 시나리오에 비해 상대적으로 높게 나타나는 것을 파악할 수 있다. 또한, SC_1 시나리오 하 온실가스 감축 목표와 그에 따른 배출권거래제가 시행되는 경우, 해당 감축 정책의 도입은 정책비용을 발생시킴을 이해할 수 있다. 경제체제 전반의 배출권거래제 도입에 따라, 사회 전반의 생산 시설 사용이 위축되고, 최종재화 생산을 위한 에너지 사용 가격의 상승으로 인해 전반적 생산비용이 증가하게 되는 것이다. 그에 따른 결과로서 경제체제 전반의 생산량 감소, 그에 따른 소비자들의 소비수준 감소, 그리고 GDP 손실이 나타남을 해당 지표들을 통해 파악할 수 있다.



	SC_0	SC_1
GDP 변화 (SC_0 대비 % 변화)	-	-0.73
소비 수준 변화 (SC_0 대비 % 변화)	-	-0.68

그림. SC_0, SC_1 시나리오 간 온실가스 배출 수준 (원)
표. SC_0 와 SC_1 시나리오 하에서 GDP 및 소비량 변화 (오른)

또한, 발전 부문 내의 각 시나리오 별 지표 변화를 살펴보자. 우선 각 시나리오 별 발전 부문 내 신재생에너지의 발전 비중을 살펴보면, SC_0 시나리오에 비해 SC_1 시나리오에서 보다 저탄소 발전체제로의 전환이 용이하게 발생함을 파악할 수 있다. SC_0 시나리오 하에서는 백스톱 및 저탄소 기술에 대한 R&D 투자와 그에 따른 시장 진입을 고려했음에도 불구하고, 이와 같이 신재생에너지 발전비중 상의 효과가 SC_1 시나리오보다 상대적으로 적게 나타나는데 이는 신재생에너지 및 저탄소 기술에 대한 R&D 투자는 새로운 기술의 발생 및 창조 (invention)에 효과를 크게 주는 요인으로 작용할 수는 있지만, 실질적으로 해당 신기술이 시장에 수용 및 확산 (diffusion)되는데 있어서는 한계가 있을 수 있음을 시사한다. 이는 Popp (2006)의 연구결과와 유사한 결과라고 할 수 있다. 그에 따라 해당 분석을 통해 온실가스 저감 및 저탄소 에너지체제로의 전환을 위한 기술정책의 한계성을 파악할 수 있다.

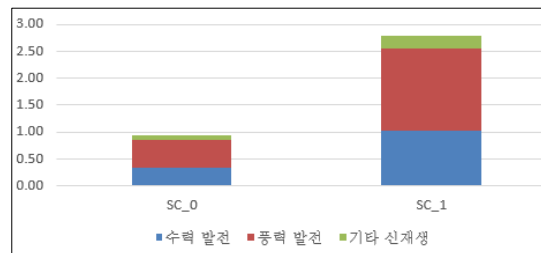


그림. SC_0, SC_1 시나리오 간 발전 부문 내 신재생 비중

2) 에너지 및 환경 부문 정책 포트폴리오 파급효과 분석

앞에서 확인할 탄소배출에 가격을 부과하는 정책 없이는 기업이 탄소저감기술에 대한 개발을 수행하고, 실질적으로 온실가스를 감축하게 되는 유인은 한계가 있음을 파악할 수 있었다. 하지만 현실에서는 기후변화 대응 및 온실가스 감축을 위해 연구개발정책 혹은 시장기반의 정책을 구분하여 도입하는 것이 아니라, 새로운 기술 개발을 촉진하면서도 이용 가능한 기술의 수요를 늘리는 양면적 전략을 펼치고 있다. 그에 따라, 본 절에서는 앞에서 논의한 단순한 정부의 정책 개입 형태 간 비교를 넘어 우리나라가 현재 고려하고 있는 에너지 및 환경 부문 내의 정책 포트폴리오의 파급효과를 분석하고자 한다. 본 절에서 고려하고자 하는 시나리오는 시나리오 SC_2와 SC_3인데 SC_2 시나리오의 경우 각 부분 별 연구개발 투자 및 지식스톡, 기술진보가 고려된 상황 하에서 배출권거래제가 실시되는 경우이다. 이 경우는 배출가격이 설정되어 있는 상황 하에서 저탄소 및 대체에너지 기술에 대한 연구개발 투자가 수행되는 경우라 할 수 있다. 그리고 SC_3 시나리오의 경우에는 SC_2 시나리오에 추가적으로 신재생에너지 공급의무화제도가 실시되는 경우를 고려한 시나리오를 의미한다.

표. 시나리오 별 GDP 및 소비량 변화

	SC_0	SC_1	SC_2
GDP 변화 (SC_0대비 % 변화)	-	-0.73	-0.67
소비 수준 변화 (SC_0 대비 % 변화)	-	-0.68	-0.21

우선, 시나리오 SC_2의 경우, 앞선 시나리오 SC_0과 SC_1과 GDP 및 소비 수준의 효과 비교를 하면, 아래 표와 같이 정리할 수 있다. 앞선 선행연구 고찰을 통해 에너지 및 환경정책의 효과를 분석한 다수의 연구들에서 기술진보를 모형 내에 고려했을 경우, 기후변화정책의 비용을 줄이는 효과가 있음을 보여주고 있음을 파악할 수 있었다. (Nordhaus, 1997; Goulder and Schneider, 1999; Goulder and Mathai, 2000; Gerlagh and Zwaani, 2003; 조경엽 및 나인강, 2003; Popp, 2006; Bosetti, 2008) 본 분석에서도 일련의 연구들이 제시한 결과와 유사하게, 기술진보가 고려된 상황 하에서 배출권거래제가 시행되는 경우 (SC_2), 기술진보가 고려되지 않는 상황 (SC_1)과 비교하였을 때 경제 전반이 부담하게 되는 환경정책의 비용을 다소 감소시킴을 파악할 수 있다. 기술진보가 고려된 상황 하에서 배출권거래제가 시행되면 산업이 부담하게 되는 배출 비용과 그에 따른 생산활동의 위축효과로 인해 여전히 GDP 및 소비 수준의 변화는 기준 시나리오와 비교하였을 때 음의 값을 가진다. 하지만, 기술진보가 고려되면 사회 전반의 지식스톡 축적에 따른 지식의 파급효과와 연구개발 투자에 따른 저탄소 및 대체에너지 기술의 시장진입이 이러한 GDP 손실 및 소비 부문의 위축 수준을 경감시켜주는 역할을 하게 되는 것이다.

또한, 전력 부문 내의 주요 지표를 온실가스 배출 수준과 전력 생산량을 우선 살펴보게 되면 SC_2 시나리오 내에서는 온실가스 배출 수준이 기술진보가 고려되지 않고 배출권거래제만 시행되는 경우인 SC_1 시나리오와 비교하였을 때 더욱 큰 수준임을 파악할 수 있다. 하지만 온실가스 배출이 감소함에 따라, SC_2 시나리오에 따른 전력 생산량이 SC_1 시나리오보다 더 감소하는 것이 아니라, 오히려 상대적으로 적은 수준으로 전력 생산량이 감소함을 알 수 있다. 이는 전력 생산구조 내에서 발전기술 별 연구개발 투자에 따라 온실가스를 배출하지 않는 백스톱 기술의 가격 경쟁력 확보 및 지식스톡 증가에 따른 에너지 투입요소 대체에 따른 결과로 해석할 수 있다. 그리고 발전 부문 내 에너지 믹스 상의 변화를 살펴보면, 실제로 SC_1 시나리오와 비교하였을 때 SC_2 시나리오 하에서 발전 부문 내의 석탄 및 가스 발전을 포함한 화석연료 기반의 비중이 감소한 데 반해, 신재생에너지의 발전 비중은 다소 증가함을 파악할 수 있다.

표. 시나리오 별 전력 부문 주요 지표 변화

	SC_0	SC_1	SC_2
온실가스 배출 수준 (SC_0 대비 % 변화)	-	-49.14	-50.50
전력 생산량 (SC_0 대비 % 변화)	-	-10.78	-10.65

	SC_0	원별 비중 (%)	SC_1	원별 비중 (%)	SC_2	원별 비중 (%)
석탄 발전	17.83	31.50	3.06	6.06	3.02	5.97
연료유 발전	2.91	5.15	0.00	0.00	0.00	0.00
가스 발전	11.90	21.01	23.00	45.53	22.87	45.21
원자력 발전	23.04	40.70	23.04	45.61	23.04	45.54
수력 발전	0.34	0.60	0.51	1.02	0.59	1.17
풍력 발전	0.51	0.90	0.77	1.52	0.81	1.60
기타 신재생	0.08	0.15	0.13	0.25	0.13	0.26
all	56.62	100	50.52	100	50.59	100

그림. 시나리오 별 전력 부문 에너지 믹스 변화

하지만, 우리나라의 경우 에너지 및 환경 부문의 R&D 정책과 배출권거래제뿐만 아니라, 신재생에너지 확대정책인 신재생에너지 공급의무화제도의 도입을 통해, 보다 효과적인 온실가스 감축 및 저탄소 에너지체제로의 전환을 꾀하고 있다. 그에 따라 본 절에서는 추가적으로 시나리오 SC_3을 고려하고자 한다. SC_3 시나리오는 우리나라가 시행 및 도입하게 될 가장 현실적인 에너지 및 환경 부문 내 정책 포트폴리오의 대표적 형태라고 할 수 있다. 정책수단의 조합형태 시행에 따른 효과 분석이 중요한 이유는 정책수단 간 중복이 이중수혜나 이중규제를 야기할 수 있기 때문이다. 그래서 본 절의 마지막 부분은 앞에서 설계한 SC_3 시나리오에 따른 파급효과 분석을 통해 향후 우리나라의 정교한 정책 믹스 운영에 있어 시사점을 제공하고자 한다. 온실가스 감축 및 신재생에너지 확대를 위한 정부의 추가적인 정책적 개입은 정책 비용을 더욱 발생시키는 것을 확인할 수 있다. 앞선 시나리오인 기술진보가 고려된 상황 하에서 배출권거래제가 실시되는 시나리오 SC_2와 비교했을 때 배출권거래제 및 신재생에너지 확대정책 양 제도가 동시에 도입되었을 때 더욱 큰 GDP 손실 및 소비 수준 감소 파악을 통해, 사회 전반적으로 더욱 큰 손실을 가져옴을 확인할 수 있다. 이는 온실가스 감축을 위해, 배출권거래제를 단독으로 사용하였을 때에는 가장 효율적인 기술을 사용하였으나, 신재생에너지 공급의무화제도가 함께 결합되었을 때 가장 가격 효율적인 감축 기술을 택할 유연성을 떨어뜨려, 경제적 비용을 발생시킬 수 있음을 지적한 Paltsev et al. (2009) 및 Morris (2009) 의 연구결과와 마찬가지로 해석할 수 있을 것이다.

그리고 SC_3 시나리오 내에서 고려하고 있는 정책 혼합에 따른 온실가스 저감 효과를 살펴보았을 때, 이전 SC_2 시나리오와 비교 시 신재생에너지 공급의무화제도의 도입에 따른 추가적 온실가스 배출 저감효과는 발생하지 않음을 파악할 수 있다. 이는 Morris (2009)와 Goulder and Stavins (2010)가 밝혔듯이 배출권거래제 하에서 경제체제 내에 총 배출 허용량이 존재하는 한, 신재생에너지 확대정책에 따른 추가적인 온실가스 배출 저감효과는 발생하지 않음을 해당 분석 내에서도 확인할 수 있다. 즉, 배출권거래제가 감축 목표를 정하고 그에 따라 시장 메커니즘에 의하여 배출권 거래가 운영되어 최소 비용으로 온실가스를 감축하는 데 목표를 하고 있기 때문에 발전 부문을 비롯한 다른 산업 부문에 있어서 감축 목표 (Cap)을 상회하는 온실가스 감축에 대한 동기부여가 부족하기 때문인 것으로 판단된다.

표. 시나리오 별 전력 부문 주요 지표 변화

	SC_0	SC_2	SC_3
GDP 변화 (SC_0대비 % 변화)	-	-0.67	-0.82
소비 수준 변화 (SC_0 대비 % 변화)	-	-0.21	-0.46

또한, 우리나라의 온실가스 배출 현황을 부문 별로 살펴보면, 발전 및 전환 부문이 가장 높은 온실가스 배출 집약도를 가지고 있으며, 철강산업 및 석유 화학산업이 그 뒤를 잇고 있다. 그에 따라, 해당 산업 부문의 생산량 및 온실가스 배출 수준의 변화도 함께 살펴보고자 한다. 모형 내에서 기반한 산업 분류에 의하면 화학제품 (13번), 선철 및 철강제품 (15번) 산업이 기타 산업에 비해 매우 높은 탄소 배출 집약도를 지니고 있음을 확인할 수 있었다. 그에 따라, 해당 산업 군의 각 시나리오 별 생산활동 및 온실가스 배출의 변화를 비교한 그래프는 위를 통해 확인할 수 있다. 이를 통해, 배출권거래제와 신재생에너지 확대정책이 결합된 형태로 시행되는 경우, 탄소 배출 집약도가 높은 산업들이 배출권거래제만 단독으로 시행되는 경우보다 생산량 감소 및 온실가스 감축 정도가 상대적으로 적은 수준을 가짐을 확인하였다.

표. 시나리오 별 석유화학 및 철강산업 지표 변화

기준 시나리오 (SC_0) 대비 % 변화		SC_0	SC_2	SC_3
석유화학산업	생산량	-	-1.85	-1.00
	온실가스 배출량	-	-2.43	-1.53
철강산업	생산량	-	-15.21	-14.10
	온실가스 배출량	-	-42.83	-40.90

이러한 경향은 석유화학 및 철강산업 외 화석연료 산업인 석탄, 원유, 천연가스 등에서도 유사한 경향을 나타냈다. Fischer (2006) 및 Boehringer (2007)의 연구에서도 이와 유사한 결과를 도출하였는데, 연구 내에서 Fischer (2006)은 신재생에너지 확대정책의 추가적 도입은 화석연료를 주로 사용하는 생산자의 수익성 및 화석연료 발전에 의한 전력량을 감소시키지만, 배출권 할당제는 한정된 배출권으로 그 할당량이 줄어 배출권 가격 하락을 유발함을 밝혔다. 그리하여 배출 집약적 산업 군이 반사이익을 얻을 수 있음을 밝혔다. 해당 분석에서 도출한 결과 역시도, 감축 목표가 있는 상황에서 배출권거래제와 신재생에너지 공급의무화제도가 조합의 형태로 시행되었을 경우, 탄소 가격 (배출권 가격)이 감소한 데 기인한다고 해석 가능하다. 위에서 언급한 Fischer (2006) 및 Boehringer (2007)과 유사하게 해당 분석을 통해, 탄소 집약적 산업은 오히려 반사 이익을 받을 수 있음을 위 결과는 시사하고 있다.

그리고, 발전 부문 내에서의 변화를 살펴보고자 한다. 전력 부문에 한해 온실가스 배출 수준을 보았을 때, 배출권거래제와 함께 신재생에너지 공급의무화제도가 실시됨에 따라, 해당 부문의 온실가스 배출량이 배출권 거래제만 단독으로 시행되는 경우에 비해 더 큰 수준으로 감축됨을 파악할 수 있었다. 신재생에너지 발전 및 공급의 쿼터가 추가적으로 규제로 도입되고, 배출권거래제 도입으로 배출권 가격이 설정됨에 따라 전력 생산 비용에 있어 화석연료 기반 부문에 있어 더욱 제약이 가해진 결과라고 할 수 있다. 그리고, 전력 생산량의 변화를 살펴보았을 때에는 배출권거래제와 신재생에너지 공급의무화제도가 조합의 형태로 시행되었을 때 전력 생산량의 감소 정도가 상대적으로 더욱 적음 (SC_2 시나리오 대비)을 파악할 수 있었다. 또한, 발전 부문 내 에너지 믹스 상의 변화를 SC_2 시나리오와 SC_3 시나리오를 비교하면, 신재생에너지 공급의무화제도가 배출권거래제도와 함께 조합의 형태로 시행될 때 신재생에너지 발전에 대한 쿼터가 주어짐에 따라, 발전 부문 내 신재생에너지의 비중은 더욱 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 파악할 수 있는 점은 배출권거래제와 신재생에너지 공급의무화제도가 함께 시행되는 경우, 발전 부문에 한해서는 어느 정도의 긍정적인 효과를 가져오는 것을 확인할 수 있다.

표. 시나리오 별 전력 부문 내 온실가스 배출 수준

	전력 부문 내 온실가스 배출	기준 시나리오 (SC_0) 대비 % 변화
SC_2	0.122	-50.50
SC_3	0.119	-51.67

	SC_0	원별 비중 (%)	SC_2	원별 비중 (%)	SC_3	원별 비중 (%)
석탄 발전	17.83	31.50	3.02	5.97	3.64	7.11
연료유 발전	2.91	5.15	0.00	0.00	0.00	0.00
가스 발전	11.90	21.01	22.87	45.21	20.46	39.93
원자력 발전	23.04	40.70	23.04	45.54	23.04	44.96
수력 발전	0.34	0.60	0.59	1.17	1.49	2.91
풍력 발전	0.51	0.90	0.81	1.60	2.24	4.36
기타 신재생	0.08	0.15	0.13	0.26	0.37	0.72
all	56.62	100	50.59	100	51.25	100

그림. 시나리오 별 전력 부문 에너지 믹스 변화

V. 결론 및 시사점

온실가스 감축을 위한 정책의 형태는 저탄소 및 대체에너지 기술 개발을 통해 온실가스 감축목표 달성을 유도하는 연구개발 정책이 포함된 기술선도 정책과 배출권거래제 및 신재생에너지 확대정책 등 시장 기반의 정책 두 가지로 크게 분류할 수 있다. 하지만, 기술선도 정책과 수요견인 정책 가운데 어느 쪽이 온실가스 감축을 위해 더욱 효과적인지, 또는 두 가지 정책을 어떤 조합으로 가져가는 것이 바람직한지에 관해서는 이론적으로, 그리고 실증적으로 분석한 선행연구가 풍부하지 않다. 그에 따라, 본 연구에서는 일차적으로 기술선도 정책의 대표적 정책수단이라 할 수 있는 에너지 및 환경 부문의 R&D 투자에 따른 온실가스 저감목표 실현과 우리나라가 도입 및 시행 예정인 대표적 수요 견인정책이라 할 수 있는 배출권거래제와 신재생에너지 공급의무화제도 시행에 따른 온실가스 저감목표 실현의 경우에 따른 파급효과를 살펴봄으로써 온실가스 저감을 위한 정부정책 구분에 따른 효과성 분석에 시사점을 제공하고자 하였다.

해당 분석 결과에 의하면 연구개발에 대한 정책에서 탄소 가격이 존재하지 않는 경우, 새로운 기술에 대한 연구는 특히 보상받기가 어렵게 되며, 탄소배출에 가격을 부과하는 정책 없이 탄소 저감기술에 대한 개발을 수행할 유인은 한계가 있음을 파악할 수 있었다. 그에 따라, 실질적으로 온실가스 배출 수준 상의 효과를 살펴 보았을 때 연구개발 정책에 따른 효과보다 배출권거래제만을 단독으로 시행하였을 때 (배출가격이 결정되는 경우), 보다 효과적임을 파악할 수 있었다. 더불어, 발전 부문 내의 에너지체제 상의 변화를 살펴보았을 때에도 마찬가지로, 배출 가격이 설정되어 있는 경우에 보다 저탄소 에너지경제체제로의 전환이 용이하게 일어남을 이해할 수 있었다. 이를 통해, 온실가스 감축 목표 달성을 위한 정책 수단으로서 연구개발 정책 및 기술선도 정책은 에너지 및 환경 부문에 있어서 한계를 지닐 가능성이 높음을 파악할 수 있다.

또한, 두 번째 분석에서는 기술진보가 고려된 상황 하에서 배출권거래제가 시행되는 시나리오 분석을 추가적으로 진행하였는데 해당 분석을 통해 온실가스 감축목표 달성을 위해 배출권거래제가 시행되는 경우, 연구개발정책은 보완정책으로서 역할을 할 수 있음을 파악할 수 있었다. 연구개발활동 및 투자에 따른 백스톱 및 저탄소 에너지 기술 및 사회 전반의 지식스톡의 축적에 따른 스펙오버 효과가 반영된 시나리오 SC_2 하에서는, SC_1 시나리오와 비교하였을 때 상대적으로 작은 수준의 GDP 손실 및 소비 수준의 위축으로 온실가스 감축 목표를 달성할 수 있음을 이해할 수 있었다. 앞선 선행연구들에서 파악할 수 있었던 기술진보가 고려되는 경우, 환경정책의 도입에 따라 발생하는 정책비용을 다소 완화시키는 것을 우리나라 경제체제 내에서도 파악한 것이다. 그리고, 기술진보가 고려된 상황 하에서 배출권거래제가 실시되는 경우, 배출권거래제만 단독으로 시행되는 경우 및 연구개발활동만 고려하는 경우의 시나리오들과 비교하였을 때 발전 부문의 저탄소 체제로의 전환을 더욱 더 유도하게 됨을 분석 결과를 통해 도출할 수 있었다. 이러한 일련의 분석 결과를 통해 에너지 부문의 R&D 활동과 배출가격화 정책이 동시에 고려되는 경우, 배출가격화 정책만을 사용하였을 때보다 온실가스 감축을 더욱 비용효과적으로 수행할 수 있음을 파악할 수 있다.

그리고 마지막 분석에서는 추가적으로 신재생에너지 공급의무화제도가 배출권거래제와 함께 조합의 형태로 시행되는 경우에 따른 파급효과 분석을 진행하였다. 해당 분석 결과는 배출권거래제만 단독으로 시행되는 경우와 결과를 비교함으로써 우리나라의 환경 및 에너지 부문의 정책 조합에 대한 시사점을 제공하고자 했다. 그에 따른 해당 SC_2와 SC_3 분석 결과는 신재생에너지 공급의무화제도가 배출권거래제와 조합의 형태로 시행되었을 때, 발전 부문에 한해서는 온실가스 감축 정도의 증가 및 신재생에너지 발전의 비중 확대라는 긍정적 효과를 가져옴을 제시하였다. 하지만, 배출권거래제와 신재생에너지 공급의무화제도가 온실가스 배출 감축을 위한 공통의 목적이 있으나, 두 정책의 조합에 의한 추가적인 온실가스 감축은 없는 것으로 확인되었다. 더불어, 두 정책의 조합은 배출권 가격의 하락을 가져오고 그에 따라 배출 집약적 산업의 배출량을 상대적

으로 증가시키는 결과를 가져오는 것을 확인하였다. 또한, 양 제도의 공존은 더욱 큰 GDP 손실 및 소비의 위축을 가져와 경제체제 전반의 비용을 증가시킴을 파악할 수 있었다. 그에 따라, 마지막 SC_2 와 SC_3 시나리오 분석을 통해 신재생에너지 확대정책 및 배출권거래제의 결합은 배출권거래제의 단독 시행 경우와 비교했을 때 발전 부문에 한해서만 어느 정도 긍정적인 효과를 가져올 뿐, 그 외 거시경제 및 산업 별 지표에 있어서는 더욱 부정적인 효과를 가져오는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 해당 분석에서는 신재생에너지 목표를 의무적으로 달성해야 하는 신재생에너지 공급의무화제도 하에서 배출권거래제가 운영되는 경우, 온실가스 감축목표 달성을 위해 보다 높은 감축비용을 지불해야 하는 비효율이 발생할 수 있음을 결론지을 수 있었다. 분석 결과를 종합하여 요약하면 연구개발에 대한 투자만으로는 온실가스 감축 목표 달성이 한계가 있고, 이러한 R&D 활동은 배출가격이 설정되는 배출권거래제와 함께 진행될 때 상호 보완적 정책으로서, 보다 비용효과적으로 온실가스 감축목표 달성이 가능함을 분석 결과는 제시하고 있다. 또한, 신재생에너지 목표를 의무적으로 달성해야 하는 신재생에너지 공급의무화제도 하에서 배출권거래제가 운영되는 경우, 온실가스 감축목표 달성을 위해 보다 높은 감축비용을 지불해야 하는 비효율이 발생할 수 있음을 본 연구는 시사하고 있다.

온실가스 감축이라는 장기 목표를 달성하기 위해서는 기술변화의 방향과 속도를 유지하는 것이 중요하며 그에 따라, 새로운 기술의 개발을 촉진하면서도 현재 이용 가능한 기술의 수요를 늘리는 양면적 전략이 필요하다. (Grubb, 2004; Johnstone et al., 2009; Popp, 2010) 그에 따라, 본 연구의 결과는 현재 정부가 고려하고 있는 온실가스 감축을 위한 에너지 및 환경 부문 내 주요한 정책적 접근인 에너지 및 환경 부문의 연구개발 투자, 배출권거래제 (2015년 시행), 그리고 신재생에너지 공급의무화제도 (2012년부터 시행 중) 간 효과 비교에서 더 나아가 정책 조합에 따른 파급효과 분석을 통해, 종합적인 시각에서 감축정책 조합에 대한 방향성을 제시하고자 하였다는 점에서 의의를 가진다고 볼 수 있다. 실제로 그 동안 기후변화 관련 에너지 및 환경정책 평가 및 도입에 따른 파급효과 분석을 하는 데 있어서는 단일 정책수단 분석 혹은 정책수단 간 비교에 초점이 맞추어져 왔다. 이는 각각의 정책수단들이 상호 대체적이라는 생각이 전제되어 있음에 기반한다. 하지만 최근에는 기후변화 관련 정책에 있어서 다수의 정책이 조합의 형태로 시행되고 있어 이에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 사실상 다양한 정책 수단들이 서로 상충되는 것도 있지만 서로 보완적인 역할을 할 수도 있기 때문이다. (Gunningham and Sinclair, 1999; OECD, 2007) 이처럼 온실가스 감축을 위한 정책이 종합적인 관점에서 고려되어야 하는 이유는 온실가스 감축정책과 에너지정책은 불가분의 관계에 있으며 종합적인 시각에서 정책이 고안되지 않을 경우, 각 정책의 본래적 완전성 및 우선순위가 훼손되는 결과가 초래될 수 있고, 국가 전체적인 차원에서도 비효율성을 유발할 수 있기 때문이다. 하지만, 우리나라의 경우 지금까지 각각의 개별 온실가스 감축정책의 효과만을 고려하는 부분적인 접근에 집중한 나머지, 각 정책 간의 상호작용 등의 종합적 접근에 소홀해온 것이 사실이다. 각각의 환경 및 에너지 부문의 정책들이 어느 정도의 기여를 하는지 등에 대한 명확한 근거가 없는 상태로 여러 제도들이 동시다발적으로 도입되어서는 안 될 것이다.

참고문헌

- 강희찬. (2013). 온실가스 감축정책 현황 및 개선방안 연구. 기후환경정책연구 2013-05 보고서. 한국환경정책 평가연구원.
- 국가과학기술위원회 (2009). 녹색기술 연구개발 종합대책(안), 제 29회 국가과학기술위원회, 2009.01.

- 국회예산정책처 (2012). 2012~2060년 장기 재정전망 및 분석, 국회예산정책처, 2012.06.
- 교육과학기술부, 한국과학기술기획평가원 (2010). 연구개발활동조사보고서.
- 김수이. (2009). 저탄소 경제시스템 구축 전략 연구: 경제•에너지•환경 통합모형을 이용한 시나리오 별 정책 효과 분석(기본연구보고서 09-18), 에너지경제연구원.
- 김수이, 조경엽, 유승직 (2008). 저탄소 경제시스템 구축 전략 연구: 경제, 에너지•환경 통합정책, 에너지경제연구원.
- 녹색성장위원회, 2009, 국가온실가스 중기(2020년) 감축목표 설정 추진계획.
- 문영석, 조경엽. (2005). 독점적 경쟁시장 하에서 온실가스 배출규제가 장기 에너지 전환에 미치는 효과, 경제학연구, 53, 1-25.
- 미래창조과학부, 2013, 2014년도 정부연구개발투자 방향 및 기준(안).
- 박재민. (2005). 연구개발투자 효과분석을 위한 계량모형 사전연구: Social Accounting Matrix (SAM) 구축을 중심으로. 과학기술정책연구원.
- 양희원 외. (2012). 지식기반 사회회계행렬 작성 방안 연구. 생산성 논집, 26, 257-285.
- 오상봉. (2012). 전원구성계획을 고려한 에너지•기후변화 정책분석 모형개발, 에너지경제연구원.
- 오진규. (2009). 에너지부문의 기후변화 대응과 연계한 녹색성장 전략 연구: 녹색성장 추진 기반구축 연구, 에너지경제연구원.
- 오진규 (2011). 에너지부문의 기후변화 대응과 연계한 녹색성장 전략 연구: 녹색성장 정책수단의 성장동인화 방안 연구, 에너지경제연구원.
- 유승직, & 조경엽. (2004). 조세 왜곡 하의 에너지·환경 정책의 효율성 평가. 에너지경제연구원 연구보고서, 1-128.
- 윤우준. (2009). 기후변화의 경제학과 정책적 시사점. e-Kiet 산업경제정보 제 457 호.
- 에너지경제연구원 (2011). 장기에너지전망 2011, 에너지경제연구원.
- 이원우. (2012). EU 배출권 거래제 현황 및 전망. 세계 에너지시장 인사이트. 에너지 경제 연구원. 제13-21 호.
- 조경엽, 나인강. (2003). 온실가스 저감정책과 기술진보, 경제학연구, 51, 32-55.
- 조경엽. (2010). 국가 온실가스 감축목표 평가와 시사점. 한국경제연구원.
- 조병욱, 김신중, 김점수. (2010), 한국 원자력발전의 온실가스 저감 기여도 및 경제적 효과 분석, 에너지공학, 19(4), 203-214.
- 지식경제부 (2008), 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획 (2009~2030), 지식경제부, 2008.12.
- 지식경제부 (2010), 제5차 전력수급기본계획 (2010~2024), 지식경제부, 2010.12.
- 한국은행 (2010), 우리나라의 국민계정체계.
- 한국은행 (2013), 2010년 산업연관표.
- 한국환경공단 (2012). 기후변화협약에 따른 제3차 대한민국 국가보고서, 대한민국정부.
- Bahn, O., Kypreos, S., Büeler, B. & Luethi, H.J. (1999). Modelling an International Market of CO2 Emission Permits. International Journal of Global Energy Issues, 12, 283-291.
- Bode, S. (2006). The effect of the German Renewable Energy Act on the Electricity Price. HWWA Discussion paper 358, Hamburg Institute of International Economics.
- Böhringer, C. (1998). The Synthesis of Bottom-up and Top-down in Energy Policy Modeling. Energy

- Economics, 20(3), 233-248.
- Böhringer, C. & Rosendahl, K.E. (2010). Green promotes the dirtiest: on the interaction between black and green quotas in energy markets. *Journal of Regulatory Economics*, 37, 316-325.
- Böhringer, C. & Rutherford, T.F. (2005). Integrating Bottom-up into Top-down: A Mixed Complementarity Approach. ZEW Discussion Papers, No. 05-28.
- Böhringer, C. & Rutherford, T.F. (2008) Combining Bottom-up and Top-down. *Energy Economics*, 30, 574-596.
- Böhringer, C. & Rutherford, T.F. (2009) Integrated Assessment of Energy Policies: Decomposing Top-down and Bottom-up. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33, 1648-1661.
- Böhringer, C. Rivers, N.J. Rutherford, T.F. & Wigle, R. (2012). Green jobs and renewable electricity policies: employment impacts of Ontario's feed-in tariff. *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy*, 12(1), 1-38.
- Bosetti, V. Carraro, C. Galeotti, M. Massetti, E. & Tavoni, M. (2006). WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model. *Energy Journal - Special Issue*, 13-38.
- Broek, M.v.d. Faaij, A. & Turkenburg, W. (2008). Planning for an Electricity Sector with Carbon Capture and Storage, Case of the Netherlands. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 351-366.
- Broek, M.v.d. Veenendaal, P. Koutstaal, P. Turkenburg, & W. Faaij, A. (2011). Impact of International Climate Policies on CO₂ Capture and Storage Deployment: Illustrated in the Dutch Energy System. *Energy Policy*, 39, 2000-2019.
- Buonanno, P., C. Carraro., & M. Galeotti. Endogenous Induced Technical Change and the Costs of Kyoto. *Resource and Energy Economics*, 25.
- D. Acemoglu, et al. (2009). The Environment and Directed Technical Change”, NBER Working Paper 15451.
- D. Popp. (2001). The effect of new technology on energy consumption. *Resource and Energy Economics*, 23, 215-239.
- D. Popp. (2002). Induced innovation and energy prices. *American Economic Review*, 92, 160-180.
- D. Popp. (2003). Pollution control innovations and the clean air act of 1990. *Journal of Policy Analysis and Management*, 22, 641-660.
- D. Popp. (2004). ENTICE: Endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48, 742-768.
- D. Popp (2006). R&D Subsidies and Climate Policy: Is there a “Free Lunch”? *Climate Change*, 77, 311-341.
- Dirkse, S. & Ferris, M. (1995), The PATH Solver: A Non-monotone Stabilization Scheme for Mixed Complementarity Problem. *Optimization Method and Software*, 5, 123-156.
- Drouet, L. Haurie, A. Labriet, M. Thalmann, P. Vielle, M, & Viguier, L. (2005). A Coupled Bottom-up/Top-down Model for GHG Abatement Scenarios in the Swiss Housing Sector. In: Loulou, R., Waub, J.P., Zaccour, G. (Eds.), *Energy and Environment*. Cambridge, 27-62.
- EIA (2010). *International Energy Outlook*, US Department of Energy/EIA.
- Fishcer, C. (2006). How can renewable portfolio standards lower electricity prices?. *Resources for the*

- Future. RFF Discussion Paper 06-20-REV, Washington, DC.
- Fischer, C., & Newell, R. G. (2008). Environmental and Technology Policies for Climate Mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 55, 142-162.
- Fischer, C., & Preonas, L. (2010). Combining Policies for Renewable Energy: Is the Whole less Than the Sum of its Parts?. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 4, 51-92.
- Goulder, L.H., & Schneider, S.H. (1999). Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies. *Resource and Energy Economics*, 21, 211-253.
- Goulder, L.H., Mathai, K. (2000). Optimal CO2 abatement in the presence of induced technological change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, 1 – 38.
- Goulder, L.H. (2004). Induced technology change and climate policy (Pew Center on Global Climate Change Report), Arlington, VA: Pew Center on Global Climate Change
- Grubb, M., Edmonds, J., ten Brink, P., Morrison, M., (1993). The Cost of Limiting Fossil-fuel CO2 Emissions: A Survey and Analysis. *Annual Review of Energy and the Environment*, 18, 397-478.
- Hofman, K., Jorgenson, D. (1976). Economic and Technological Models for Evaluation of Energy Policy. *Bell Journal of Economics*, 444-446.
- Hogan, W.W., Weyant, J.P. (1982). Combined Energy Models. In: Moroney, J.R. (Ed.), *Advances in the Economics of Energy and Resources*, 117-150.
- Hourcade, J.-C., Jaccard, M., Bataille, C. & Gershi, F. (2006). Hybrid Modelling: New Answers to Old Challenges. *Energy Journal - Special Issue*, 1-12.
- Howitt, R.E. (1995). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77, 329-342.
- International Energy Agency (IEA). (2010). Experience Curves for Energy Technology Policy.
- International Energy Agency (IEA). (2014). Energy Technology Perspective.
- International Energy Agency (IEA). (2014). World Energy Outlook.
- Jaffe, A. B. (1986). Technological opportunity and spillovers of R&D: Evidence from firms' patents, profits and market value. *American Economic Review*. 76, 984-1001.
- Jaffe AB, Lerner Josh. (2001). Re-inventing public R&D: Patent policy and the commercialization of national laboratory technologies. *RAND J. Econ.* 32, 167-98.
- Kiuiila, O. & Rutherford, T. (2010). Calibration of abatement cost function using CES technology. Working Paper, The Swiss Federal Institute of Technology.
- Kiuiila, O. & Rutherford, T. (2011). The cost of reducing CO2 emissions: integrating abatement technologies into economic modeling, Working Paper, University of Warsaw.
- Koopmans, C.C. & Velde, D.W. (2001). Bridging the Energy Efficiency Gap: Using Bottom-up Information in a Top-down Energy Demand Model, *Energy Economics*, 23, 57-75.
- Kumbaroğlu, G. & Madlener, R. (2003). Energy and Climate Policy Analysis with the Hybrid Bottom-up Computable General Equilibrium Model SCREEN: The Case of the Swiss CO2 Act. *Annals of Operations Research*, 121, 181-203.
- Lejour, A., Veenendaal, P., Verweij, G., Leeunwen, N.v. (2006). WorldScan: a Model for International Economic Policy Analysis, CPB, The Hague.

- Löschel, A. (2002). Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey. *Ecological Economics*, 43, 105-126.
- Loulou, R., Goldstein, G., & Noble, K. (2004). Documentation for the MARKAL Family of Models. www.etsap.org.
- Markusen, J. R. (1990). Micro-Foundation of External Economics. *Canadian Journal of Economics*, 23, 321-340.
- Markusen, J. R. (2002). General Equilibrium Modeling using GAMS and MPSGE: Tutorial. University of Colorado.
- Manne, A., Wene, C.-O. (1992), MARKAL-Macro: A Linked Model for Energy-Economy Analysis. Brookhaven National Laboratory, Report BNL-47161.
- McFarland, J.R., Reilly, & J.M., Herzog, H.J. (2004). Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-up Information. *Energy Economics*, 26, 685-707.
- Messner, S., Schrattenholzer, L. (2000). MESSAGE-MACRO: Linking an Energy Supply Model with a Macroeconomic Module and Solving Iteratively. *Energy - The International Journal*, 25(3), 267-282.
- Nordhaus, W.D. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Nordhaus, W.D. (2002). Modeling induced innovation in climate change policy. In: Grubler, A., Nakicenovic, N., Nordhaus, W. (Eds.), *Technological Change and the Environment*. Resources for the Future Press, Washington, DC.
- Nordhaus, W.D., & Yang, Z. (1996). A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *American Economic Review*, 86, 741-765.
- Okagawa, A. & Ban, K. (2008), Estimation of substitution elasticities for CGE models, Working Paper, Osaka University.
- Paltsev, S. Reilly, J.M., Jacoby, H.D., Eckaus, R.S., McFarland, J., Sarofim, M., Asadoorian, & M., Babiker, M. (2005). The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: Version 4, Report No. 125. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Cambridge, MA.
- Rutherford, T.F. (1995). Extension of GAMS for Complementarity Problems Arising in Applied Economic Analysis. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 19, 1299-1324.
- Rutherford, T.F. (1999). Applied General Equilibrium Modelling with MPSGE as a GAMS Subsystem: An Overview of the Modelling Framework and Syntax. *Computational Economics*, 14, 1-46.
- Rutherford, T.F. (2002). Lecture notes on constant elasticity functions, University of Colorado.
- S. Pacala, & R. Socolow. (2004). Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, *Science*, August 13, 2004.
- Schäfer, A., Jacoby, H.D. (2006). Experiments with a Hybrid CGE-Markal Model. *Energy Journal - Special Issue* 171-178.
- Strachan, N., & Kannan, R. (2008). Hybrid Modelling of Long-term Carbon Reduction Scenarios for the UK. *Energy Economics*, 30, 2947-2963.
- Sue Wing, I. (2006). The Synthesis of Bottom-up and Top-down Approaches to Climate Policy Modeling: Electric Power Technologies and the Cost of Limiting US CO₂ emissions. *Energy Policy*, 34,

3847-3869.

- Sue Wing, I. (2008). The Synthesis of Bottom-up and Top-down Approaches to Climate Policy Modeling: Electric Power Technology Detail in a Social Accounting Framework. *Energy Economics*, 30, 547-573.
- T. Barker, et al. (2006). The Costs of Greenhouse Gas Mitigation with Induced Technological Change. Working Paper 89.
- Thema, J., Suerkemper, F., Grave, K., & Amelung, A. (2013). The impact of electricity demand reduction policies on the EU-ETS: Modelling electricity and carbon prices and the effect on industrial competitiveness. *Energy Policy*.
- Wang, K., Wang, C., & Chen, J. (2009). Analysis of the economic impact of different Chinese climate policy options based on a CGE model incorporating endogenous technological change. *Energy policy*, 37(8), 2930-2940.
- Wilson, D. & Swisher, J. (1993). Exploring the Gap: Top-down versus Bottom-up Analyses of the Cost of Mitigating Global Warming. *Energy Policy*, 21, 249-263.