

# 정책 혼합에 따른 경제적, 환경적 파급효과 분석: 배출권 거래제도와 신재생공급의무화제도 중심으로

여영준\* · 오인하\*\* · 정성문\*\*\* · 이정동\*\*\*\*

## I. 서론

### 1. 연구의 배경과 목적

국제사회는 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 과다한 배출과 이에 따른 기후변화에 대한 우려와 함께 온실가스에 따른 피해를 방지하기 위한 계획을 수립하고 있다. 그에 따라 교토의정서 (Kyoto Protocol) 등을 통해 당면한 지구 온난화 문제를 해결하고자 협력하고 있다. 이에 따라 Annex-1으로 분류된 선진국들은 1차 의무 이행기간인 2008년부터 2012년까지 1990년 대비 평균적으로 5.2%의 온실가스를 감축해야 할 의무를 부담하게 되었다. 지금까지의 기후변화협상에 의하면 우리나라는 non-Annex 1 국가로서 온실가스배출량 감축 의무 부담국에 속해 있지 않지만, 향후 협상 여하에 따라 의무 부담국에 편입되거나 자발적 감축량을 설정하는 등 실질적인 온실가스 감축 정책을 추진해야 할 것으로 보인다. 이러한 배경 하에서 우리나라는 2011년 온실가스 배출을 2020년 기준안 (BAU) 대비 30% 감축이라는 중기 감축목표를 발표하였다. 이러한 감축목표가 정책해짐에 따라 각 부문별로 세부목표를 정하고 관리하는 온실가스 및 에너지 목표관리제가 도입되었으며 이에 따르면 2020년까지 온실가스 배출 전망치와 비교하여 산업부문 18.2%, 전환(발전) 26.7%, 수송 34.3%, 건물 26.9%, 농림어업 부문에서 5.2%를 감축하여 국가 전체적으로 30%를 감축하게 된다.

이후, 우리나라는 지속가능 성장을 위한 다양하고 체계적인 추진전략을 마련 및 진행 중에 있으며, 배출 집약적인 화석연료 사용을 억제하는 환경정책과 자연친화적인 재생에너지를 육성하는 정책을 실시하고 있다. 이와 같은 정책의 또 다른 배경으로는 화석에너지 고갈에 따른 에너지가격 상승과 경제침체로 인한 새로운 성장 동력의 필요성 대두, 범지구적 기후변화 대응노력에 대한 적극적 동참분위기 조성 등의 이유가 제시되고 있다. 이에 따라 정부가 도입 및 추진 중인 신재생에너지공급의무화제도 (RPS; Renewable Portfolio Standards)와 배출권거래제도 (ETS; Emission Trading Schemes)는 기후변화대응 및 온실가스저감을 위한 핵심정책으로서 효율적인 신재생에너지 보급 확대와 온실가스 감축을 목표로 한다고 볼 수 있다. 정부는 RPS 제도를 통해 전력 공급의무자로 하여금 태양광, 풍력 등의 신재생에너지를 2022년까지 전체 발전량의 10% 확보하는 것을 목표로 2012년 1월부터 추진 중에 있다. 배출권 거래제도 역시 2015년부터 1기 (2015년-2017년)과 2기 (2018년-2020년)으로 나누어 실행하되, 2020년까지 배출전망 치 대비 30% 온실가스 감축을 목표로 관련 시행령 제정이 진행 중에 있다.

RPS의 신재생에너지 공급의무자는 발전회사 또는 판매회사이고, 발전부문의 온실가스 배출량이 전체 배출량의 상당 부분을 차지하고 있다는 점을 감안했을 때 배출권 거래제도 역시 전력시장과의 연계를 기본으로

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

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

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

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

하고 있는 시장제도라고 할 수 있다. RPS 제도 하에서의 공급의무자는 전기요금을 통해, 그리고 신재생에너지 발전소 건설을 통한 신재생에너지 공급인증서 (REC) 자체 발급, 외부조달 및 거래를 통해 비용회수를 하게 되는 구조를 가지고 있다. 따라서 전기요금의 가격이 낮게 설정되거나 전기요금에 규제를 받는 경우 신재생발전을 통한 비용보전이 제대로 이루어지지 않을 가능성이 존재하고 이에 따라 신재생에너지 부문의 투자에 악영향을 미칠 수 있다. 또한 배출권 거래제도가 전력 부문을 포함하여 시행된다면 발전회사의 온실가스 감축을 위한 비용부담 증가 및 이로 인한 전력수급에 있어서 악영향을 끼칠 수 있는 우려가 제기되고 있다. 이에 따라 정경화 (2010)는 배출권 거래제도가 도입되면 RPS 하에 있는 전력산업은 에너지규제와 더불어 환경규제를 이중으로 받게 된다고 주장하기도 하였다. 이러한 기후변화 및 재생에너지 지원 정책이 대부분의 국가에서 조합의 형태로 시행되고 있음에도 불구하고, 우리나라의 경우 이들 정책조합에 따른 효과에 대한 관련 연구가 매우 제한적이다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 2015년 실시 예정인 배출권 거래제도 도입 이전에 신재생에너지 공급의무화제도와 배출권 거래제도 동시 시행에 따른 파급효과를 살펴보고 에너지 및 환경 부문의 정책 조합에 따른 파급효과 분석을 통해 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구는 연산일반균형 (Computable General Equilibrium, CGE) 모형에 기반한 분석결과를 활용하고 있다. 연산일반균형 모형은 경제체제를 생산, 소비, 투자의 흐름, 대외 거래 등을 생산 및 효용함수 등의 함수 형태로 묘사함으로써 경제체제를 주체들 간에 연결하여 균형점을 찾아내는 역할을 수행한다. 그에 따라 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 보정(calibrate)된 일반균형의 경제체제는 다양한 충격실험을 가능하게 한다. 즉 어떠한 규제나 정책 등의 외부적 충격이 있을 때, 모형이 새롭게 찾는 균형점과 기존의 균형점을 상호 비교함으로써 정책적 시나리오에 따른 거시 경제적 효과를 파악할 수 있게 되는 것이다. 이렇게 CGE는 미시경제이론과 거시경제이론을 바탕으로 구축되는 미시-거시 시스템 (micro-macro system)의 특성이 있다. 즉, 산업레벨의 미시적 자료가 통합되어 거시경제를 이루게 되기 때문에 미시적 분석과 거시적 분석결과가 상충되는 문제가 거의 발생하지 않는 장점이 있다.

대부분의 연산일반균형 모형은 하향식 모형 (Top Down model)에 기반하여 설계되어 왔다. 이러한 하향식 모형의 경우 경제체제 전반의 시장원리에 초점을 두고 있고 경제체제 내 일반균형을 찾는 데 목적이 있다. 그에 반해 상향식 모형 (Bottom Up model)의 경우 연구자가 원하는 특정 부문, 예로 에너지부문 및 전력산업에 초점을 두고 해당 부문 내 관련 기술적 정보에 초점을 두고 있는 모형이라 할 수 있다. 그리고 상향식 모형의 경우 하향식 모형과는 다르게 에너지 부문 내의 부분균형을 다루게 된다. 하지만 에너지 및 환경정책에 따른 파급효과를 분석하는 데 있어 최근 하향식 모형과 상향식 모형을 결합한 하이브리드 (Hybrid) 모형 개발 추세가 뚜렷하게 증가하고 있는 상황이다. 왜냐하면 기존의 하향식 모형의 경우 전력부문을 발전 원 별로 세분화하지 않고 총합된 하나의 부문으로 간략하게 묘사하고 있어 실제 에너지 및 환경정책에 따른 전원 구성의 변화 및 구체적인 파급효과 분석에 한계를 지니고 있었다. 오상봉 (2012)는 원전 계획 및 신재생에너지 정책 등 전력 관련 에너지 및 기후변화 정책이 경제 전반에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 우리나라 전원구성 및 전원계획을 고려한 모형의 개발이 필수적이라고 밝히기도 하였다. 미래 비용 및 편익의 분석은 단순히 현재 상태의 전원 구성이 계속될 것이라는 가정보다는 미래의 전원계획에 기반을 두고 이루어져야

한다는 것이다.

하향식 연산일반균형 모형의 경우 정책 시나리오 별 효과 분석을 하는 데 있어 주요 변수들의 기준안 대비 증가 혹은 감소분을 파악함으로써 진행이 되는데 이러한 하향식 모형 내에 전원 계획 및 전원 별 구성 묘사가 포함되어 있지 않게 되면 제대로 된 효과분석이 이루어지지 않을 수 있다. 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 우리나라의 전원구성을 묘사하고, 또한 전원계획을 함께 고려하는 하이브리드 모형 개발을 통해 신재생에너지 공급의무화제도와 배출권 거래제도 도입에 따른 경제 전반의 파급효과 분석을 진행하고자 한다.

## II. 선행 연구 고찰

### 1. 환경 및 에너지 정책 조합의 정당성 및 근거

그 동안 기후변화 관련 에너지 및 환경정책 평가 및 도입에 따른 파급효과 분석을 하는 데 있어서는 단일 정책수단 분석 혹은 단일 정책수단 간 비교에 초점이 맞추어져 있었다. 하지만 최근에는 다수의 국가에서 기후변화 관련 정책을 설계할 때 복수 정책이 조합의 형태로 시행되고 있으며, 이에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 그에 따라 해당 에너지 및 환경 부문의 정책 조합에 따른 효과 분석이 중요한데 이는 복수의 정책 수단들이 서로 상충되는 것도 있지만 서로 보완적인 역할을 할 수도 있기 때문이다. (Gunningham and Sinclair, 1999; OECD, 2007)

Bernear and Stavins (2007)은 다수의 시장실패 문제가 발생하는 상황에서는 단일 정책수단이 아닌 적절한 정책조합이 필요함을 말하기도 하였다. Gunningham and Sinclair (1999)는 기존 단일 도구적 접근은 한계가 있고, 그에 따라 추가적 정책적 수단 활용을 통해 단일 정책이 가진 약점을 보완하는 것이 중요함을 역설하며 정책수단의 혼합에 대해 강조하였다. 현재 마주하고 있는 기후변화 관련 문제에 있어서 경제체제가 단일 국면의 문제에 직면하고 있다면 최선의 최적상태 (First-best optimum)은 단일 정책적 수단을 통해 해결할 수 있게 된다. 하지만 다수의 시장실패 문제 등이 고려된다면 차선적 최적상태 (Second-best optimum)을 달성해야 한다.

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. Sorrell and Sijim (2003)은 보다 구체적으로 정책수단이 조합의 형태로 시행되었을 때 직접적 상호작용 (direct interaction)과 간접적 상호작용 (indirect interaction)으로 구분하여 바라보았다. 직접적 상호작용의 경우, 예로 배출권 거래제도 하에 있는 기업들이 탄소세 등으로 인해 영향을 받게 되는 경우라 할 수 있다. (한진희, 윤경수, 2010) 그리고 간접적 상호작용은 단일 정책도구의 대상이 되는 주체가 또 다른 정책에 의하여 간접적으로 영향을 받는 것이다. 여기에는 하류부문 에 적용되는 배출권 거래제와 전력공급자에 대한 신재생에너지 보급확대정책 (발전차액지원제도 및 신재생에너지 공급의무화제도) 사이의 간접적인 상호작용이 하나의 예가 될 수 있다. (한진희, 윤경수, 2010)

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. 따라서 규제수단을 혼합할 때에는 이들 간의 긍정적

이고 부정적인 관계를 고려하여 보완적인 규제수단들을 혼합하여야 한다. 그에 따라 Sorrell et. al. (2003)은 정책 조합을 하는 데 있어 각 정책수단의 범위, 목적, 작동방식, 적용시점 등을 고려해야 함을 이야기하였다. 이러한 배경에서 본 연구는 정부에서 시행하는 전력 부문의 신재생에너지 보급확대 정책과 온실가스 저감정책인 배출권 거래제도라는 정책 조합 시행에 따른 전력 산업 및 경제전반의 파급효과 분석을 통해 현재 정부가 추진하고자 하는 기후변화 관련 에너지 및 환경 부문의 정책수단의 조합을 평가하는 분석틀을 제공하는데 목적이 있다.

## 2. 정책수단 혼합에 따른 파급효과 분석

각국에서는 신재생에너지 관련 목표를 달성하기 위해 시행제도로서 신재생에너지공급의무제도와 발전차액지원제도를 운영하고 있으며 배출권 거래제도와 함께 운영하여 전체적인 배출량을 줄이면서도 지속 가능한 발전을 이루려고 하고 있다. 우리나라에서는 2002년부터 발전차액지원제도를 운용하였지만 2012년부터는 신재생에너지 공급의무화제도를 도입하여 신재생에너지 정책에 변화를 주었다. 하지만 기후변화 및 재생에너지 지원 정책이 조합의 형태로 시행될 예정임에도 불구하고, 우리나라의 경우 이들 정책조합의 효과에 대한 선행 연구는 매우 제한적이다. 이와 달리 유럽의 경우, 영국 및 독일을 중심으로 배출권 거래제도와 신재생에너지 정책 간의 연계 및 상호효과 분석에 대한 분석이 최근 활발하게 이루어지고 있는 중이다.

### 1) 배출권 거래제도와 신재생에너지 지원정책 조합 따른 온실가스 저감효과

몇몇의 선행연구에서는 배출권 거래제와 신재생에너지 보급 정책의 동시 시행이 추가적인 온실가스 감축에 어떠한 영향을 미쳤는지에 대한 연구를 진행하였다. Morris (2009)와 Goulder and Stavins (2010)는 배출권 거래제가 시행되고 있는 상황에서 신재생에너지 보급확대정책이 시행되었을 때 추가적 온실가스 배출량 감축 효과는 나타나지 않음을 보였다. Bye and Hoel (2009) 역시 유럽에서 도입 및 추진 중인 발전차액지원제도와 신재생에너지 공급의무화제도 등 신재생에너지 지원정책은 배출권 거래제도에 따른 배출량 한도 (Cap)이 정해져 있는 한, 실질적으로 추가적인 온실가스 배출 저감효과는 발생하지 않는다고 분석하였고 이러한 신재생에너지 정책을 “값비싸고 초점이 없는 정책 (expensive and pointless renewable fun)”이라고 평가하기도 하였다. 즉, 이러한 선행연구에서는 배출권 거래제도에 있어서 온실가스 배출 상한선이 존재하는 이상, 신재생에너지 보급정책 추가 도입에 따른 추가적 온실가스 저감효과는 존재하지 않는다고 이들은 평가하고 있다.

### 2) 배출권 거래제도와 신재생에너지 지원정책 조합 따른 거시 경제 파급효과

그리고 이러한 두 정책의 관계 및 그에 따른 경제적/환경적 파급효과 분석을 위하여 몇몇의 선행연구에서는 연산일반균형 (CGE) 모형을 이용하기도 하였다. Jan Abrell (2008)은 독일을 대상으로 CGE 방법론을 이용하여 EU ETS와 신재생에너지 보급확대정책 (FIT와 RPS) 간의 상호 효과 분석을 진행하였다. 그에 따라 CGE 모델링을 이용한 시나리오 분석 (시나리오 1: BAU 대비 20% 온실가스 감축목표 및 배출권 거래제 시행, 시나리오 2: BAU 대비 20% 온실가스 감축목표 및 배출권 거래제 시행 + 신재생에너지 20% 쿼터 적용 (RPS), 시나리오 3: BAU 대비 20% 온실가스 감축목표 및 배출권 거래제 시행 + 신재생에너지 20% 쿼터 적용 (FIT)) 을 통해 두 정책 간의 상호 효과에 대한 전망을 진행하였다. 그 결과, 배출권 거래제도가 단독으로 시행되었을 때에 비하여 신재생에너지 정책이 추가적으로 시행되었을 때 배출권 가격의 감소, 전기요금 감소, 사회후생의 감소를 일으킴을 밝혔다.

Christoph Bohringer (2009)는 CGE 모형을 통해 독일 발전 부문을 대상으로 EU-ETS가 시행되고 있는 상황에서 신재생에너지 정책 (RPS)이 추가적으로 시행되었을 때 경제적 및 환경적 파급효과 분석을 진행하였다. (시나리오 1: BAU 시나리오, 시나리오 2: Black Quota (배출권 거래제도 도입), 시나리오 3: Black & Green Quota (배출권 거래제도 및 신재생에너지 정책 RPS 도입) 양 제도가 동시에 시행되었을 때 배출권 가격이 감소하고, 그에 따른 탄소 집약 부문의 생산량 증가에 따라, 온실가스 배출집약도가 높은 발전 기술 부문이 반사이익을 얻게 됨을 밝혔다. 또한, RPS 제도는 EU-ETS의 사회적 비용을 상당히 증가시키는 것으로 분석하였다. 또한 배출권 거래제도에 추가적으로 신재생에너지 정책을 시행하는 데 있어 발생하는 사회후생 부문 손실은 다른 정책적 목표들로 정당화되어야 함을 밝혔다. 즉, 온실가스 감축이라는 단일한 주요 목표를 위해 두 정책이 시행된다면 두 정책의 동시 시행은 매우 비효율적이며, 그에 따라 다른 부문 (기술적 진보 및 혁신활동)에 있어서 두 제도 동시도입에 따른 파급효과 분석이 필요함을 밝혔다.

### 3) 배출권 거래제도와 신재생에너지 지원정책 조합 따른 비용, 편익 분석

또 다른 선행연구에 있어서는 비록, 배출권 거래제와 신재생에너지 정책의 도입에 있어 이러한 정책 믹스에 따른 비용-편익 분석을 할 때, 단순히 온실가스 배출량 저감효과, 에너지 안보 등의 정책적 목표에 초점을 둘 것이 아니라 에너지 효율, 기술진보 등과 같은 R&D 활동에 따른 긍정적 외부효과 (Positive Externalities) 역시 고려해야 함을 강조하였다 (OECD, 2011). 앞서 언급하였듯이, Abrell and Weight (2008) 역시도 배출권 거래제와 신재생에너지 정책 동시 도입에 따라 사회적 비용이 크게 증가하지만 이러한 사회적 비용을 바라볼 때, 기존 에너지원의 자기강화 메커니즘과 R&D 지원과 같은 정책적 요소도 함께 고려해야 함을 밝혔다. 그에 따라, Gonzalez (2007)은 신재생에너지 촉진정책과 EU-ETS의 상호작용에 대한 기존 문헌 분석을 통하여 상호연계방향을 제시하였다. 양 제도간의 시너지를 창출할 수 있도록 정책조치가 이행되어야 하며, 가장 큰 시너지 효과는 양 제도의 목표를 적절히 조화시킴으로써 달성될 수 있는 것으로 결론지었다.

### 4) 배출권 거래제도와 신재생에너지 지원정책 조합 따른 우리나라 사례 분석

이러한 유럽 및 미국의 활발한 연구들에 반해, 우리나라의 경우 2015년 배출권 거래제가 시행될 예정임에도 불구하고, 배출권 거래제도와 RPS 제도 간의 관계 및 그에 따른 경제적, 환경적 파급효과가 매우 부족한 실정이다. 정경화 (2010)는 영국 및 일본 등 다른 국가들의 배출권 거래제도와 RPS 제도 간의 상호 연계 사례를 살펴보고, 우리나라에서 RPS 및 ETS 양 제도의 도입이 전력시장에 미치는 영향을 살펴보았다. 전력시장에서 양 제도를 도입하게 되면 전력 수요 감소, 소매가격의 상승, 신재생전력 발전회사의 생산자 잉여 증가, 화석연료 발전업자의 생산자 잉여 감소, 그리고 소비자 후생 감소가 일어남을 밝혔다. 하지만 지금까지 이들 정책의 도입에 따른 우리나라의 경제적, 환경적 파급효과에 대한 실증적 분석은 미미한 실정이다. 그에 따라 본 연구에서는 연산일반균형 (CGE) 모형을 활용하여 이들 정책 조합에 따른 경제 전반의 파급효과 분석을 진행하고자 한다.

### III. 모형 설계

#### 1. 연구모형 개요

본 연구는 연산일반균형 모형을 사용하여, 한국 경제 전반을 모형화하였다. 연산일반균형 분석을 위해서는 우선적으로 기준 연도를 잡아 그 시점에서의 초기 균형상태 (Benchmark equilibrium)을 설정해야 한다. 그에 따라 본 연구에서는 분석을 위해 기준연도를 2009년으로 삼았고, 한국은행의 산업연관표 상에 나타난 재화의 흐름이 균형 상태에 존재하도록, 2009년을 기준연도로 사회회계행렬 (Social Accounting Matrix, SAM)을 작성하였다. 그리고 에너지 정책으로 인한 효과 분석에 더욱 용이하도록 한국 경제를 크게 28개 산업으로 분류하였으며, 에너지 경제연구원 등의 기관에서 발간한 에너지 밸런스 자료, 온실가스 배출전망 자료 등을 활용하였다.

그리고 본 연구에서 구축한 모형의 경우 묘사하는 경제의 범주를 우리나라에 국한시키는 소국 개방경제 (small open economy) 가정을 사용한 일국 (one nation) 모형이라 할 수 있다. 일국 모형은 한 국가의 생산 및 소비만을 정교하게 모델링하고 나머지 국가들은 초점이 되는 국가와 무역 및 자본 거래를 하는 역할만을 한다. 이러한 소규모 개방경제를 가정하는 경우 CGE 모형에서는 상품들의 국제시장 가격체계를 외생적인 것으로 다루게 된다. 이러한 가정은 전통적인 국제무역이론과 차이가 있는데 본 연구에서 가정한 소규모 개방경제의 경우 수출입재의 국제시장가격이 외생적으로 주어지고, 수입재와 국내재가 불완전 대체관계에 있다는 가정에 기반한다고 볼 수 있다. 그리고 포괄적인 에너지 및 경제 자료를 기반으로 하여 분석결과의 정확도를 높이려고 하였으며 경제주체의 근시안적 예측능력을 가정한 정태 (static)모형이다. 투입요소는 노동, 자본으로 이루어지며, 생산함수는 각 부문에서 서로 대체 가능한 재화끼리의 묶음(nesting)을 통한 복합재의 형성을 가정하고 있다. 그리고 본 연구는 생산과 소비를 표현하기 위해 CES (Constant Elasticity of Substitution) 함수를 사용하였다. 이는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Y = [A_1 X_1^\rho + \dots + A_m X_m^\rho]^{1/\rho} \quad ; \quad \text{식 (1)}$$

이 때 Y는 재화의 생산량을 의미하고  $X_m$ 은 투입요소 및 중간재,  $A_m$ 은 해당 투입물의 투입 비율(share)를 나타내는 모수라고 할 수 있다.  $A_m$ 은 투입 비율을 나타내므로 모든 투입물에 대하여  $A_m$  값을 더하게 되면 1이 된다. 이러한 CES 함수의 경우 모든 투입물 쌍이 동일한 대체탄력성을 가지게 되므로, 각 투입물 간의 대체 관계를 정교하게 반영할 수 없다는 단점을 가지게 된다. 이를 극복하기 위해 대다수의 연산일반균형 모형에서는 “Nested CES” 함수를 사용하게 되는데 이는 투입물을 그룹 짓고 각 그룹에 해당하는 CES 함수를 단계별로 구성하여 최종적으로 하나의 CES 함수에 모두 결합하도록 하는 방법이다. (McFarland et al, 2004) 본 연구에서도 역시 생산구조 및 소비구조를 표현하는 데 있어서 언급한 nested CES 함수를 활용하였으며 각각의 함수에서 사용하는 비율 모수 (share parameter)나 대체탄력성 (elasticity of substitution)은 기존 연구 및 문헌 등을 사용하여 적절한 값으로 사용하였다.

본 연구의 특징이라고 한다면 하이브리드 모형을 구축하였는데, 앞에서 밝힌 하이브리드 모형 구축을 하는 세 가지 방법 중 세 번째 방법에 해당하는 기본 하향식 (Top-down) 모형에 전력 부문에 대해 상향식 (Bottom-up) 모듈을 만들어 연결시키는 방법을 사용하였다. 그에 따라 전력 부문의 발전 기술들을 석유, 가스, 석탄, 원자력, 신재생 (수력, 풍력, 기타 신재생) 발전부문으로 구분해 고려하였고, 각 발전기술의 생산함수를 DRTS

(Decreasing Returns to Scale) 함수로 가정하였다. 그리고 Boehringer and Rutherford (2007)와 Ian Sue Wing (2006) 연구에서 수행한 방법을 참고하여 발전기술 별로 투입되는 자본의 경우 고정요소로 취급하였으며, 각 발전기술 별 특징은 고정요소의 크기, 화석연료 및 노동의 투입, 지식의 투입과 같은 요소의 투입량과 공급 탄력성 등을 통해 가정 및 표현하였다. 그리고 실제 모델링 작업은 Rutherford(1995)등에서 개발하고 소개한 GAMS 프로그래밍 언어 기반의 MPSGE(Mathematical Programming System for General Equilibrium Analysis)를 사용하였다. MPSGE는 MCP에 기반을 두어 경제의 생산 및 소비주체의 생산과 소비를 연결하고 있으며 시장청산, 영이윤, 소득균형조건 등을 체크해주는 CGE 모델링에 특화된 GAMS 하위언어이다.

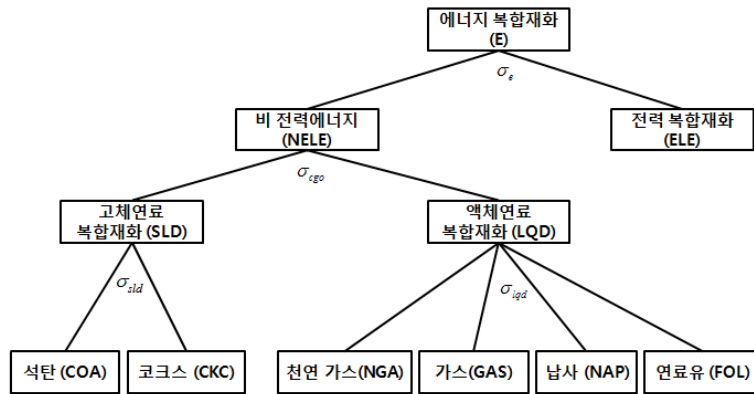
## 2. 생산부문 구조

### 1) 산업 부문 생산구조 (전력부문 제외)

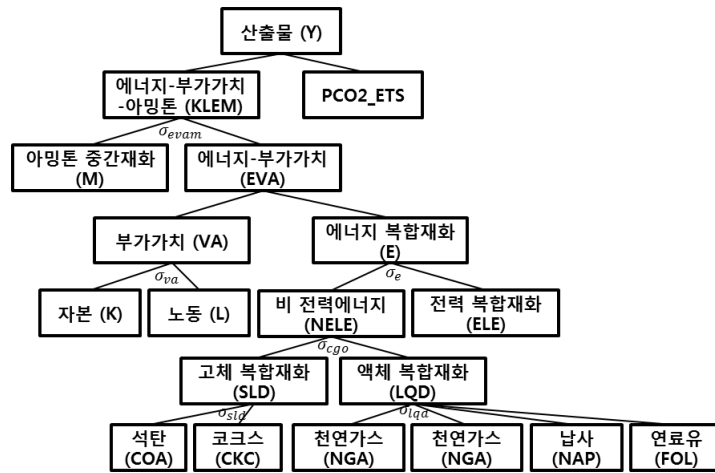
본 모형에서는  $i$  산업에서 생산되는 재화는 일반적으로 해당 산업의 노동, 자본, 에너지 투입요소와 아밍톤 중간재화를 사용하여 생산된다. 여기에서 짚고 넘어갈 점은 생산에 투입되는 각 재화는 아밍톤 재화로서 아밍톤 가정을 따른다는 것이다. Arimington (1969)의 가정은 대외 무역이 존재할 때 국내에서 생산된 재화와 국외에서 생산되어 수입된 재화가 서로 동일하지 않는다는 가정이다. 만일 국내재화와 수입재화가 서로 동일하며 완전 대체관계라고 가정하게 되면 국내재화 및 수입재화의 동시적 소비는 이루어지지 않고 양의 순 수입 값을 가지게 되면 국내재화, 음의 값을 가지게 되면 수입재화만을 소비하는 행태를 낳을 수 있게 된다. 하지만 현실에서는 생산자나 소비자가 국내 재화와 수입 재화를 동시에 소비하며 두 재화 사이에는 불완전대체관계가 존재한다. 이를 기반으로 본 모형에서도 아밍톤 가정을 따라 경제주체가 재화를 소비할 때, 국내재화와 수입재화를 불완전대체관계를 통해 복합재화를 만들어 소비한다고 가정함으로써, 현실적인 소비 양태를 표현하고자 했다.

그리고,  $i$  산업의 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. 우선 최종재의 경우, 자본, 노동의 투입요소로 구성된 부가가치 부문과 전력 투입과 화석연료 투입으로 구성된 에너지 재화 가 서로 그룹 지어져 부가가치-에너지 복합재화를 형성하게 된다. 여기에서 에너지 복합재화는 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 등이 포섭되어 구성되는 액체 연료 복합재(LQD)의 하부구조를 이루고 있다. 그리고 각각의 고체연료 복합재와 액체 연료 복합재 내에서 각 화석연료는 복합재화와 이산화탄소가 복합된 화석연료 복합재화를 형성하게 된다. 여기에서 이산화탄소는 연료 별 소비량에 따라 각각 상이한 배출계수를 통해 발생하게 되는데 이를 식으로 표현하면 아래 식(2) 같이 정의될 수 있다. 아래에서  $FE_{fe}$ 는 아밍톤 화석연료 복합재화  $XA_{fe}$ 와 이산화탄소가 복합된 화석연료 복합재화를 의미한다. 그리고 화석연료를 레온티에프 함수로 정의하는 이유는 배출은 에너지와 특정한 배출 계수로 고정되어 있기 때문이다. 이렇게 형성된 각각의 화석연료 복합재화는 연료의 특성에 맞게 고체연료 복합재화, 액체연료 복합재화로 포섭되며 앞서도 언급하였듯이 고체연료 복합재화를 구성하는 화석연료는 석탄, 코크스이며, 액체연료 복합재화를 구성하는 화석연료는 원유, 가스, 연료유, 납사이다.

$$FE_{fe} = \min[\alpha XA_{fe}, (1-\alpha)CO2_{fe}] \quad ; \quad \text{식 (2)}$$



(그림 1) 에너지 복합재화 포섭구조 (최종재 생산 부문)



(그림 2) 최종재 생산 포섭구조 (전력 부문 제외)

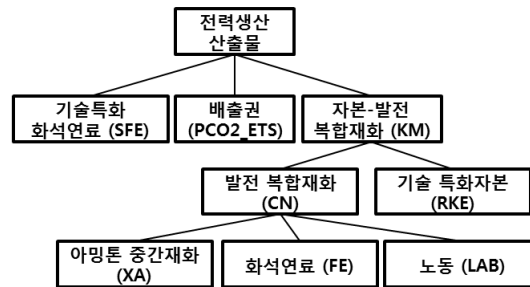
그리고 부가가치의 경우, 투입요소인 지식, 자본, 노동이 투입되어 형성된다. 이렇게 형성된 부가가치는 앞에서 언급한 에너지 복합재화 (E)와 결합하여 에너지-부가가치 복합재화 (KLE)를 형성하게 된다. 더불어, 에너지-부가가치 복합재화는 다시 아미톤 중간재화와 결합하여 에너지-부가가치-아미톤 복합재화를 형성하게 된다. 더 나아가 배출권에 해당하는 PCO2\_ETS 가 함께 일정 비율만큼 투입이 된다고 가정하였다. 이는 최종재 생산을 위해 사용되는 화석연료의 양과 비례하여 각 산업의 배출권이 함께 소모되는 것을 모형에 고려하였다. 그에 따른 전체적 생산구조는 위와 같이 확인할 수 있다.

## 2) 전력 부문 생산구조

전력 부문을 단일 부문으로 묘사한 다른 모형들과는 다르게, 개별 발전기술들이 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 아미톤 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.



(그림 3) 전력부문 발전기술 별 전력생산 구조

그리고, 발전 부문의 기술의 경우, 기술에 특화된 화석연료를 사용하게 되는데 예로 코크스 산업의 경우 특화된 투입 화석연료 중간재로서 코크스를 사용하게 되는 것이다. 그에 따라 자본-발전 복합재화 (KM)은 상위 단계에서 다시 발전기술 별로 특화된 화석연료 아미턴 재화와 함께 결합하게 된다. 그리고 이러한 화석연료를 사용하는 데 있어서 온실가스가 배출되고, 그에 따라 배출권이 소모되는 구조를 가정하여 모형화하였다. 여기서도 자본-발전 복합재화 (KM), 기술 별 특화 화석연료 투입량 (SFE), 그리고 배출권은 레온티에프 함수 형태로 결합되어 전력을 생산하는 구조를 가지게 된다. 관련 식과 전체적 발전 기술 별 전력 생산구조는 아래에서 확인할 수 있다

$$Y("ELE")_{et} = \min[\alpha_{KM} KM_{et}, \alpha_{ETS} PCO2\_ETS_{et}, \alpha_{sfe} SFE_{et}] \quad ; \quad \text{식 (3)}$$

또한 Boehringer and Rutherford (2012)은 발전기술 별로 공급량이 주어지는 계단식 공급함수가 아닌 DRTS 함수 (Decreasing Returns to Scale)를 활용하여 전력 공급을 묘사하고, 그에 따라 상향식 모형에 있어 발전 기술 별 공급탄력성을 정의하였다. 본 모형에서는 앞에서 살펴보았듯이, 발전 기술 별로 고정된 자본요소가 있음을 가정하였다. 이러한 발전 기술 별로 투입되는 고정 자본으로 인해 발전기술 별로 전력 생산량이 수확체감 (DRTS; Decreasing Returns to Scale) 함수 형태를 띠게 된다. 그에 따라 전력 부문은 발전 기술 별 DRTS 생산함수가 CES 함수의 형태로 결합된 형태라고 할 수 있다. 이러한 발전기술 별 DRTS 함수를 정의하게 되면 Boehringer and Rutherford (2012)와 Kiuila (2010)이 지적하였듯이, 전력 가격 변화에 따른 공급 부문의 갑작스러운 플립 플랩 현상을 보정할 수 있게 된다. 그에 따라 본 연구에서는 발전 기술 별 DRTS 생산함수 하에서 기술 별 공급탄력성을 도출하고 그에 따라 캘리브레이션을 통해 전력 생산에 있어서 투입요소들 간의 대체탄력성이 결정되는 구조를 확립하게 되었다. 여기에서 발전 기술 별 공급탄력성은 오상봉 (2012)이 사용한 수치를 기반으로 사용하였으며, 실제 전원구성 수치와의 정합성을 높이기 위해 시행착오를 거쳐 적정한 공급탄력성 수치를 도출하고자 하였다. 그에 따라 공급탄력성은 석유의 경우 0.8, 석탄 0.8, 가스 0.7, 수력 및 원자력은 0.1, 그리고 신재생에너지의 경우 1.5로 가정하였다. 이렇게 가해진 공급탄력성에

의해 각 발전기술 별 비용함수 및 생산함수에 있어서 고정요소와 기타 투입요소 간의 대체탄력성 및 모수가 결정되도록 모형에 반영하였다. 그리고 이를 통해 전력 생산 부문은 각 발전 기술 별로 정의된 DRTS 생산함수가 합쳐져 생산구조를 구성하게 되는 것이다.

### 3. 소비부문 구조

본 모형에서는 대표소비자 가계가 근시안적 시각을 가지고 그에 따라 효용 극대화 조건에 따라 행동함을 가정하였다. 가계의 복합재화에 대한 수요는 가계부문이 상품 구입을 위하여 사용할 수 있는 소득과 상품가격 체계에 의하여 영향을 받게 된다. 가계소득은 가계가 본원적 생산요소인 노동, 자본, 지식을 제공한 대가로 얻게 된다. 그리고 앞에서 언급하였듯이, 발전 기술 별로 특화된 고정요소로서 자본이 투입됨을 가정하였기 때문에 각각의 발전 기술에 투입되는 자본  $\overline{RKE}$ 을 따로 상정하였다. 그리고 본 모형에서는 배출권 거래제도 및 신재생공급의무화 제도에 따른 파급효과 분석을 위해 초기 대표 가계에 배출권 (CO2\_ETS)과 신재생에너지 공급 인증서 (REN) 가 요소 부존 (endowments)로 주어져 있음을 가정하였고, 이에 따라 발전 부문 혹은 산업 부문에서 이러한 배출권과 인증서를 소모하게 됨을 가정하였다. 이렇게 가계는 기업들에게 노동, 자본, 지식 등을 제공하고 얻은 소득 제약 하에서 소비 (Yc)를 하게 된다. 이에 따른 소득 균형 (Income Balance)식은 아래와 같이 정리 할 수 있다.

## IV. 시나리오 설정 및 결과

### 1. 시나리오 설정

#### 1) 기준안 (BAU; Business As Usual) 시나리오

본 연구에 사용된 모형에서는 BAU (Business-As-Usual) 시나리오를 구축하기 위해서 GDP 전망, 에너지 가격전망, 부문별·원별 에너지수요전망, 부문별·원별 온실가스 배출전망 등 다양한 외생적 장기전망이 필요하다. 따라서 본 연구에서 사용한 거시변수에 대한 전망은 대부분 에너지경제연구원(2011)의 장기전망을 차용하고 있다. 그에 따라 구축된 연산일반균형 모형과 수집된 데이터를 통하여 정책 개입이 없을 때의 일반적인 상황 (BAU)를 도출하게 되었다. 비용효과분석에 있어서 정책 개입이 없는 상황에서의 경제변수와 정책 개입이 있는 상황에서의 경제 변수를 비교하게 되므로, BAU 도출은 비용효과 분석을 하기 위한 기준이 된다고 할 수 있다. BAU (Business-As-Usual) 시나리오를 구축하기 위해서 GDP 전망, 에너지가격전망, 부문별·원별 에너지수요전망, 부문별·원별 온실가스 배출전망 등 다양한 외생적 장기전망이 필요하며, 이에 따라 각종 거시변수에 대한 전망은 에너지경제연구원(2011)의 장기전망을 차용하고 있다. 또한 석탄을 제외한 화석연료의 가격은 원유가 전망과 연동하여 변하도록 설정하였다. 이처럼 BAU 시나리오는 새로운 온실가스 정책 및 신재생에너지 확대 정책이 없다는 것을 가정한 가장 기본적인 시나리오이다. 이 시나리오를 통해 정상 상태에서의 온실가스 배출량과 경제 성장을 예측할 수 있다. 이러한 BAU 시나리오를 기준으로 각 시나리오 별 정책 충격에 따른 거시 변수들의 증감량 확인을 통해 파급효과 분석이 가능하게 됨을 밝힌다.

## 2) 시나리오 설정 (SC1 시나리오, SC2 시나리오)

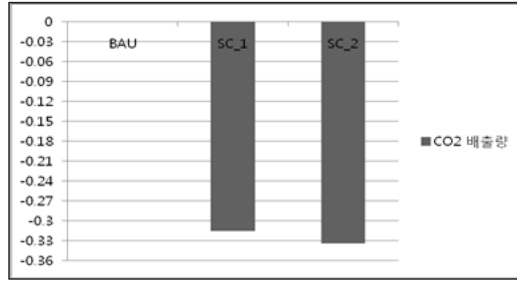
SC1 시나리오는 현재 시행되고 있는 RPS 제도 하에 있는 전력 부문을 제외한 다른 산업에 있어 배출권 거래제도를 시행했을 때를 가정하고 있다. 현재 구체적인 배출권 거래제도의 운영방식에 대한 방안은 확립되지 않았지만 배출권 거래제도가 전력 부문을 포함하여 시행되었을 때 신재생에너지공급의무화제도 하에 있는 전력산업은 에너지규제와 더불어, 환경규제를 동시에 받게 된다. 상대적으로 저렴한 화석연료 대신 신재생에너지 이용을 의무화하는 RPS 제도의 도입은 추가적인 비용을 유발시키게 된다. 또한, 배출권 거래제 실시에 따라 발전업자는 에너지효율 향상과 같은 온실가스 감축노력을 취하게 되어 추가적인 비용을 발생시키게 되는 것이다. 그에 따라 SC2 시나리오에서는 RPS 하의 전력 산업에 ETS 가 추가적으로 시행되었을 때를 가정한다. 그에 따라 SC1 시나리오와 SC2 시나리오 설정에 따른 환경적, 경제적 파급효과 분석을 통해서 향후 배출권 거래제도 및 신재생에너지 공급의무화제도의 설계 방안에 대한 시사점을 도출하고자 한다. 본 SC1, SC2 시나리오에서 가정하고 있는 RPS 제도의 의무 공급량 비율은 현재 운용되고 있는 수치를 사용하였다.

## 2. 결과 분석 및 해석

### 1) 거시경제 및 환경 파급효과

RPS 하에 ETS 가 추가적으로 전력 부문에 도입이 되었을 때 소비자 가격은 더욱 상승하게 된다. 신재생에너지 공급의무화제도의 경우 생산자가 신재생에너지를 사용하여 전력 생산의 일정 비율을 의무화하도록 하되, 이 의무량을 초과하거나 미달하는 양을 시장에서 거래하도록 함으로써 신재생에너지를 사용한 발전 단가가 시장에서 결정하도록 한다. 하지만 이는 전력가격의 상승을 일으키고 이는 최종소비자가 부담하게 되는데, 이러한 상황에서 배출권 거래제도가 도입되게 되면 기존의 배출집약도가 높은 발전기술에 의존을 하였던 발전 부문은 더욱 생산비용이 증가하게 된다. 그래서 실증 분석을 통해 확인한 결과, 경제 체제 전체의 온실가스 감축량에는 SC1과 SC2 시나리오의 차이가 크지 않았지만 전력 부문에서의 배출량은 SC1과 SC2 시나리오 모두 BAU 시나리오와 대비하여 감소하는 것을 확인하였다. 또한 양 제도의 동시 도입에 따라 발전 부문의 배출집약도가 높은 발전기술들이 더욱 위축된다는 사실을 파악할 수 있었다.

우리나라의 온실가스 배출 현황을 부문 별로 살펴보면 발전 부문이 앞에서 언급하였듯이 가장 높은 온실가스 배출 집약도를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 발전 부문을 순서로 철강산업, 그리고 석유 화학산업이 그 뒤를 잇고 있는데 위의 결과를 통해 실제, RPS 하에 ETS가 추가적으로 도입 및 시행되었을 때 발전 부문의 온실가스 감축량 증대를 확인할 수 있었다. 그리고 이와 함께 철강산업 및 석유/화학산업의 온실가스 및 생산량 변화 등의 결과를 살펴보면 아래와 같다. SC1 시나리오와 SC2 시나리오에서 모두 BAU 시나리오와 대비하여 ETS가 시행됨에 따라, 발전, 석유화학, 철강산업의 경우 탄소 집중도가 낮지만, 상대적 가격은 비싼 투입물로 생산을 대체하거나 탄소 배출량만큼 배출권을 확보해야 했을 것이다. 이에 따라 추가적으로 발생한 산업 부문의 비용은 그에 따른 소비자 가격 상승을 일으키게 되었다. 생산 비용의 증대에 따라 생산활동이 위축되고 그에 따라 자연스럽게 온실가스 감축이 이뤄짐을 파악할 수 있다.



(그림 4) RPS와 ETS 도입 시나리오 별 전력 부문 온실가스 감축량 변화 (%)



(그림 5: 왼쪽) RPS와 ETS 도입 시나리오 별 철강 및 석유화학산업 온실가스 감축량 변화 (%)

(그림 6: 오른쪽) RPS와 ETS 도입 시나리오 별 철강산업 및 석유화학 산업 가격 변화 (%)

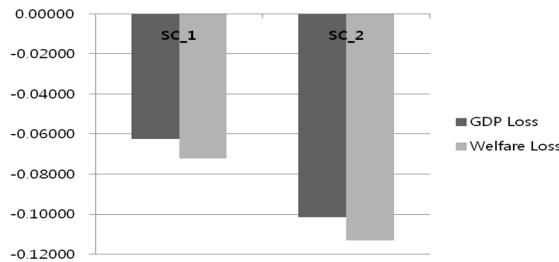
하지만 SC1 시나리오와 SC2 시나리오를 비교하였을 때의 결과를 살펴보면 전력 생산 부문에 있어 위축된 반면, 산업 별 생산활동의 변화를 살펴보았을 때 탄소 집약적 산업인 철강산업 및 석유화학 산업의 경우 오히려 생산량 및 온실가스 배출량이 SC2의 경우 덜 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 화석연료 산업인 석탄, 원유, 천연가스 등에서도 유사한 경향을 나타냈다. 이는 감축 목표가 있는 상황에서 배출권 거래제도가 추가적으로 시행되었을 경우, 탄소가격 (배출권 가격)이 상당히 감소한 데 기인한다고 해석할 수 있다. 이는 Boehringer (2007)이 밝힌 이유와 맥락을 비슷하다고 볼 수 있는데 우선 RPS 하의 전력 부문에 배출권 거래제도가 추가적으로 시행되었을 경우 첫 번째 효과 (First order effect)로서 RPS로 인해 신재생에너지 발전 부문의 비중이 증가하고, 그에 따라 비 신재생 발전 부문의 생산활동이 감소하게 된다. 그리고 추가적 두 번째 효과 (Second order effect)로서 배출권 거래제도 하에 총 배출 허용량이 정해져 있음에 따라 First order effect에 따라 배출권 가격이 감소하게 된다. 그에 따라 탄소 집약적 산업은 배출권 가격의 감소를 이용하여 배출권을 구매하는 대신 온실가스 배출을 늘리게 되는 것이다. 즉, RPS 하의 전력 부문에 있어 추가적으로 시행되는 배출권 거래제도로 인하여 탄소가격이 하락하게 되고, 이는 추가적인 온실가스 배출에 대한 비용을 감소시키는 역할을 하게 된다.

본 모형은 목표 연도를 2025년으로 가정하고 파급효과를 살펴보았는데, 초기 배출권 거래제도와 신재생에너지 공급의무화제도 시행으로 인하여 온실가스 배출이 감소할 경우, 탄소가격의 하락을 동반하게 되고 이는 또다시 탄소 집약적 산업의 생산량을 늘릴 여지를 주게 된다. 그에 따라 전력 부문에 대해 양 제도가 동시에 시행되었을 때 일반 예상과는 다르게 탄소 집약적 산업의 생산량 증가라는 결과를 낳게 되는 것이다. 그에 따라 온실가스 배출량의 변화 추이도 생산량 변화와 비슷한 경향을 보이면서 실질적으로 탄소 집약적인 산업 부문에 있어서의 추가적 온실가스 감축은 이루어지지 않고 오히려 상대적으로 온실가스가 덜 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 아래 표를 통해 실제로 CGE 모형을 돌려 시뮬레이션을 시행하였을 경우 SC1과 SC2에서 배출권 가격의 변화를 파악할 수 있고 이러한 배출권 가격 하락은 탄소 집약적 산업의 반사이익을 얻게 하는 것이다.

<표 1> 탄소 배출권의 가격 변화

BAU	SC_1	SC_2
-	1.000	0.6333

그리고 GDP 부문의 변화를 살펴보면, 온실가스 감축 및 신재생에너지 확대를 위한 정부의 정책개입은 정책비용을 발생시킴을 확인할 수 있었다. 그리고 SC1 시나리오와 SC2 시나리오를 비교하였을 때 전력 부문에 배출권 거래제도와 신재생에너지 공급의무화제도가 동시에 도입 및 규제됨으로써 더욱 더 큰 GDP 손실을 보임을 파악할 수 있었다. 이는 Boehringer (2007)과 Jan Abrell (2008)이 밝혔듯이 두 제도의 동시 시행에 따라 Compliance cost가 발생함에 기인한다 볼 수 있다. 또한 이러한 결과는 신재생에너지 공급의무화제도의 운영방식과 배출권 거래제도의 기본 원리에서 이유를 찾을 수 있다. 우선 경제체제 전반의 배출권 거래제도 도입에 따라 사회 전반의 생산시설 사용이 위축되고, 생산을 위한 에너지 사용 가격 상승으로 인하여 전반적인 생산비용이 증가하게 된다. 또한 신재생에너지 공급의무화제도로 인해 전력 소비자의 경우 소비하는 전력량의 일정 비율만큼 REC에 대한 가치를 함께 추가적으로 지불해야 한다. 이에 따라 소비자의 경우 환경 친화적인 에너지 소비에 대한 추가적 가격을 지불하게 됨으로써, 최종 소비자에 이에 대한 부담이 전가되는 제도라고 할 수 있다. 그에 따라 전력 부문에 도입되는 양 제도에 따라 사회 전반의 비용손실이 크게 나타남을 확인할 수 있다.



(그림 7) SC1, SC2 시나리오 별 BAU 대비 GDP, 후생 변화 (%)

## 2) 발전 부문 파급효과

SC1 시나리오는 신재생에너지 공급의무화제도가 전력 부문에 대해 실시된 상황에서 배출권 거래제도가 전력 부문을 제외한 산업 부문에 시행되는 경우이며, SC1 시나리오를 이해해보도록 하자. 우선 전력 부문에 신재생에너지 공급의무화제도가 도입되면 전력 단위당 일정 수준의 신재생 전력 비율이 결정되게 된다. 신재생 발전기술이 화석연료 기반 발전기술보다 생산 비용 및 한계 비용이 더욱 크기 때문에, RPS 도입은 기존 전력 판매에서 얻은 수익에 신재생에너지 발전기술에 대한 보조금을 주는 상황과 같아진다. 따라서 발전 부문에 있어서 화석연료 기반의 발전기술의 경우 한 단위의 전력을 생산하였을 때 RPS 제도로 인해 부과된 일정 비율의 공급인증서 (REC)를 구매해야 하고, 신재생에너지 기반 발전기술의 경우 한 단위의 전력 생산 시, 1 단위의 REC를 획득하게 된다고 생각할 수 있다. 그에 따라, 전력 소비자의 경우 소비하는 전력량의 일정 비율만큼 REC에 대한 가치를 함께 지불해야 하고, 소비자의 경우 환경 친화적인 에너지 소비에 대한 추가적 가격을 지불하게 되는 전력 가격 상승 결과를 낳게 됨을 확인하였다.

또한, 비 신재생 발전기술의 경우 총 전력 수요의 신재생에너지에 할당된 일정 비율을 제외한 양만큼 공급을 할 수 있기 때문에 이들의 생산활동은 제약된다. 그에 따라, 신재생에너지 공급의무화제도가 시행되었을

경우 비 신재생발전기술의 발전량이 감소하게 됨을 확인할 수 있었다. 이와 더불어 상대적 가격이 낮은 비 신재생발전기술의 발전량이 감소하는 데 반해 신재생에너지 기술의 비중은 더욱 증가하게 됨을 파악할 수 있었다. 이는 RPS 제도가 도입되는 경우 인증서 가격에 해당하는 양이 신재생에너지 발전 부문의 생산량만큼 신재생 발전 부문에 누적되어 신재생전력 부문의 비용 감소를 일으키게 되는 것에 기인한다. 그에 따라 기존 BAU 시나리오와 대비하여 전력 부문의 생산량은 감소하지만 신재생에너지의 비율이 점차 확대되는 것을 파악할 수 있었다. 이러한 발전 부문의 변화로 인해 비 신재생전력 부문은 발전량 감소에 따라 생산자 잉여가 감소할 것으로 예상되며 신재생전력 부문의 경우 인증서 시장을 통한 수입과 시장 점유율 확대 등으로 인해 생산자 잉여가 증가할 것으로 예상할 수 있다.

신재생에너지 공급의무화 제도 하에서 배출권 거래제도가 추가적으로 시행되는 SC2 시나리오의 경우, 전력 부문의 파급효과를 살펴보면 우선 배출권 거래제도 도입에 따른 비용이 추가적으로 포함됨으로써, 전력 공급의 곡선이 위로 상승하게 된다. 그리고 배출권 거래제의 추가적 도입에 따라 REC의 가격이 감소하게 됨을 확인할 수 있었다. 기타 선행연구들에 있어서는 양 제도의 도입에 따라 전력 가격의 변화에 있어서의 효과를 예측하는 것이 매우 애매모호한 것이라 여기고 있었다. 본 연구의 결과에 있어서도 전력 가격에 영향을 미치는 두 가지 경로를 이해할 수 있었는데 방금 언급하였듯이 첫 번째는 배출권 거래제도의 추가적 도입에 따른 전력 공급곡선 상승에 따른 가격의 증가이다. 또한 두 번째 경로는 REC 가격의 감소에 대한 REC 가격 하락에 의한 전기 요금의 감소이다. 앞에서 언급하였듯이, 소비자의 경우 소비하는 전력량의 일정 비율만큼 REC에 대한 가치를 함께 지불해야 하는데 REC 가격이 하락함에 따라 전기요금의 상승을 상쇄하게 되는 것이다. 하지만 이러한 REC 가격의 하락 효과보다 배출권 거래제 도입에 따른 추가적 비용 증가 효과가 더욱 큰 것으로 확인이 되며, 그에 따라 신재생에너지 공급의무화제도 하에서 배출권 거래제도가 추가적으로 시행되었을 때, 전력 발전량은 SC1 시나리오와 비교하였을 때 상대적으로 더욱 감소하게 되고, 전력 가격의 경우 상승하는 폭이 더욱 크게 됨을 확인할 수 있었다. 아래 표를 통해서도 신재생에너지 공급인증서 (REC)의 가격변화를 파악할 수 있다.

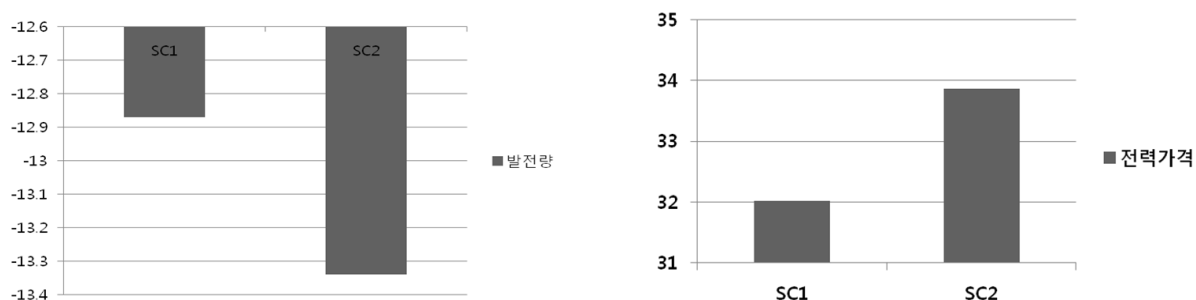
<표 2> 신재생에너지 공급인증서 (REC) 가격 변화

BAU	SC_1	SC_2
1	1.0762	1.0144

그리고 발전 부문의 전원 구성의 변화를 살펴보면 아래 그림과 같은 결과를 확인할 수 있다. 본 모형에서 발전기술 별로 공급탄력성을 다르게 가정하였는데 원자력 및 수력 발전 부문의 경우 공급탄력성을 0.1 로 매우 낮은 값을 가정하였다. 그에 따라 원자력 부문 및 수력 부문의 발전량에 있어서는 큰 변화가 없는 것으로 확인된 반면, SC1과 SC2 시나리오의 경우, 모두 신재생에너지 기술 부문의 발전량이 증가함을 파악할 수 있었다. 신재생에너지 공급의무화제도 혹은 배출권 거래제도의 도입에 따라, 실제로 우리나라의 발전 부문에 있어서 BAU와 비교하였을 때에는 저 탄소체제로 전환이 됨을 확인할 수 있었다. 하지만 배출권 거래제도와 RPS가 동시에 발전 부문에 도입이 되었을 때 비 신재생에너지 기술 부문의 점유율 변화를 자세하게 살펴보면 SC2 시나리오 하에서 오히려, 석탄발전 비율의 감소 폭이 상대적으로 작고 (SC1: BAU 대비 34.50% 감소, SC2: BAU 대비 31.78% 감소), 가스발전 비율이 역시 감소 폭이 상대적으로 작은 것을 확인 (SC1: BAU 대비 64.73% 감소, SC2: BAU 대비 62.38% 감소)할 수 있다.

이는 RPS 하에서 배출권 거래제도가 추가적으로 도입됨에 따라 탄소 가격이 하락 (SC1: 탄소가격 1, SC2:

상대 탄소가격 0.63) 하게 되고, 이로 인해 온실가스 배출에 대한 비용이 상대적으로 낮아지게 되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 즉, RPS 하에서 비 신재생에너지 발전 부문으로부터 신재생에너지 부문으로의 발전이 전환되고 있는 상황에서 배출권 거래제도라는 규제가 추가적으로 시행됨에 따라 신재생에너지 발전부문으로 더욱 에너지 믹스가 전환되어 상대적으로 탄소 배출에 대한 가격 및 비용이 감소하게 된 것이다. 이로 인해 오히려 배출집약도가 높은 석탄발전과 같은 비 신재생에너지 발전 부문이 반사 이익을 얻게 되는 효과를 확인할 수 있었다. 즉, 발전 부문에 있어서 앞에서 확인하였듯이 ETS 가 추가적으로 RPS와 함께 시행되었을 때 온실가스의 저감량이 더욱 큼을 확인할 수 있었는데 이는 단순히 전력에 대한 수요 감소와 그에 따른 발전 부문 생산활동의 위축으로 인한 효과인 것으로 분석되었다. 즉, RPS와 ETS 제도의 동시 도입에 따라 발전 부문의 저 탄소 에너지체제를 구성하겠다는 목표는 양 제도의 동시 도입에 따라 실현 여부가 불투명한 결과에 이르게 된다.



(그림 8: 왼쪽) SC1, SC2 시나리오 별 발전량 비교 (BAU 대비 %)

(그림 9: 오른쪽) SC1, SC2 시나리오 별 전력가격 변화 비교 (BAU 대비 %)

<표 3> RPS와 ETS 도입 시나리오 별 전원 구성 변화 (BAU 대비 %)

	SC1	SC2
석탄 발전	-34.50	-31.78
연료유 발전	-36.59	-38.73
가스 발전	-64.73	-62.38
원자력 발전	-1.63	-0.81
수력 발전	5.12	4.76
풍력 발전	161.25	142.60
기타 신재생	239.47	204.41
총 발전량	-12.87	-13.34

그리고 이와 더불어 신재생 전력의 공급 할당량은 고정되어 있고, REC 가격이 조정됨에 따라 배출권 거래 제도가 추가적으로 신재생 발전을 확대하진 않음을 파악할 수 있었다. 전체적인 발전량의 변화를 살펴보면 BAU와 대비하여 SC1과 SC2 시나리오 하에서 모두 전력 생산량이 감소하는 것을 파악할 수 있었고 SC1의 경우 SC2에 비해 상대적으로 감소량이 작음을 확인할 수 있었다. 또한 배출권 거래제도가 전력 부문을 제외 하고 시행되는 경우, 발전 부문 외 경제주체들의 생산활동은 위축되고, 그에 따라 전력 수요가 줄어들게 된다. 이와 더불어 배출권 거래제도가 RPS 하 발전 부문을 포함하였을 경우에는 위와 같은 요인으로 발전 과정의 비용이 상승하는 효과가 발생하여 SC2 시나리오의 경우 SC1에 비해 발전량이 상대적으로 감소하는 결과를

나타낸 것으로 해석된다.

이처럼 배출권 거래제도가 전력 부문에 한하여 추가적으로 시행되는 경우 신재생에너지 부문의 전체 비중은 크게 변화하지 않고 오히려, 탄소 집약적인 발전 부문의 비중을 증가시킴으로써 전력 부문의 저 탄소 체제로의 전환에 긍정적인 영향을 보이지 않게 됨을 전망할 수 있다. 그에 따라, 에너지 체제의 저 탄소체제로의 전환을 목적으로 한다면 배출권 거래제도가 이행되는 시점에 전력 부문은 포함하지 않고 RPS 제도만을 단독으로 시행하는 것이 더욱 적합함을 파악할 수 있었다. RPS 하의 발전 부문을 배출권 제도 시행을 통한 규제를 하게 된다면 신재생에너지 부문의 발전 구성이 오히려 감소하게 되고 화석연료 부문의 발전 비중이 오히려 증가하게 된다는 실증 분석 결과를 토대로 배출권 거래제도를 설계하는 데 있어 각별한 주의가 요구된다고 할 수 있겠다.

## V. 결론 및 시사점

본 연구에서는 신재생에너지 공급의무화제도와 배출권 거래제도를 중심으로 에너지 및 환경정책 조합에 따른 경제적, 환경적 파급효과를 살펴보고 그에 따른 정책적 시사점을 도출하고자 하였다. 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 있었다. 이처럼, 정책수단의 조합형태 시행에 따른 효과 분석이 중요한 이유는 정책수단 간 중복이 이중수혜나 이중규제를 야기할 수 있기 때문이다. 정책수단의 혼합은 복수의 시장 실패를 보정해줄 수 있지만, 부정적인 효과를 가져올 수도 있다. 따라서 이들 정책수단을 혼합할 때에는 서로 간의 긍정적이고 부정적인 관계를 고려하여 서로 보완적인 규제수단들을 혼합하여야 한다.

우리나라의 경우, 2012년부터 신재생에너지 공급의무화제도가 시행되었으며 2015년부터 배출권 거래제가 도입 예정이다. 배출권 거래제도의 구체적인 운영방안은 아직 확립되지 않았지만 배출권 거래제도가 시행되어, 발전 부문을 포함하게 되면 기존의 신재생에너지 공급의무화제도 하에 있는 전력산업은 에너지규제와 더불어 환경규제를 받아 부담이 가중되게 된다. 상대적으로 저렴한 화석연료 대신 신재생에너지 이용을 의무화하는 RPS 제도의 도입은 추가적인 비용을 유발시키게 된다. 또한, 배출권 거래제도 실시에 따라 발전업자는 에너지효율 향상과 같은 온실가스 감축노력을 취하게 되어 추가적인 비용을 발생시키게 되는 것이다. 하지만 이러한 기후변화 및 재생에너지 지원 정책이 대부분의 국가에서 조합의 형태로 시행되고 있음에도 불구하고 정책조합의 효과에 대한 선행연구는 매우 제한적이다. 그에 따라 본 연구에서는 2015년 실시 예정인 배출권 거래제 도입 이전에 신재생에너지 공급의무화제도와 배출권 거래제 동시 시행에 따른 파급효과를 살펴보았다.

분석 결과, 배출권 거래제도와 RPS 제도가 동시에 전력 부문에 시행되었을 때에는 단일 RPS 제도로 운영되는 시나리오에 비해 GDP 및 사회 후생부문의 변화를 살펴보면, 온실가스 감축 및 신재생에너지 확대를 위한 정부의 정책개입은 정책비용을 발생시킴을 확인할 수 있었다. 그리고 SC1 시나리오와 SC2 시나리오를 비교하였을 때 전력 부문에 배출권 거래제도와 신재생에너지 공급의무화제도가 동시에 도입 및 규제됨으로써 더욱 더 큰 GDP 손실을 보임을 파악할 수 있었다. 또한 REC 시장과 배출권 거래시장에 모두 직면해야 하는 발전 부문의 경우 이에 따른 생산에 있어서 초과 비용이 발생하며, 이에 따라 전력 생산량은 더욱 감소하고 전력 가격 역시 더욱 크게 증가함을 파악할 수 있었다. 그리고 RPS 제도로 단일 규제를 받는 경우에 비해, 배출권 거래제도가 추가적으로 시행되었을 경우 탄소 배출권 가격의 하락으로 인해 탄소 집약적 산업의 산출량 감소폭이 상대적으로 작고, 발전 부문에 있어서도 화석연료 기반의 발전 부분의 감소폭이 상대적으로 작아



짐을 확인할 수 있었다. 즉, RPS와 ETS 제도의 동시 도입에 따라 발전 부문의 저 탄소 에너지체제를 구성하겠다는 목표는 양 제도의 동시 도입에 따라 실현 여부가 불투명한 결과에 이르게 된다고 볼 수 있다.

## 참고문헌

- 강희찬 (2011). SERI 경제포커스: 2012년 신재생에너지 공급의무화제도 도입. 삼성경제연구소, 제 344호, 1-27.
- 김수이 (2008). 저탄소 경제시스템 구축 전략 연구: 경제, 에너지, 환경 통합정책 개발. 에너지경제연구원 기본연구보고서 08-18, 1-277.
- 김충실. (2005). 자유무역시대의 일반균형론. 대구: 경북대학교출판부.
- 김현제, & 조경엽 (2010). 신재생에너지 의무할당제의 국내산업에 대한 파급효과. 자원•환경경제연구, 19(4), 805-830.
- 노동운, & 김수이 (2008). 저탄소 경제시스템 구축 전략 연구. 에너지경제연구원 기본연구보고서 08. 1-246.
- 노상환 (2009). 우리나라 온실가스 배출권 거래제도의 도입에 관한 연구. 환경정책연구 8(4), 95-124.
- 도은진 (2012). 배출권거래제, 이상과 현실의 조화가 과제. LG Business Insight 2012. 18-22.
- 신동천 (1999). 국제무역의 연산균형분석. 서울:세경사.
- 오상봉 (2012). 전원구성계획을 고려한 에너지, 기후변화 정책분석 모형개발. 에너지경제연구원 연구보고서 12-14, 1-83.
- 온실가스 종합정보센터 (2011). 부문별, 업종별, 연도별 온실가스 감축목표 확정 발표. 온실가스 종합정보센터 보도자료. 2011년 7월 12일.
- 에너지경제연구원 (2010). 에너지수급 통계: 에너지수급밸런스. 에너지경제연구원.
- 에너지경제연구원. (2011). 2011 장기에너지전망.
- 정경화 (2010). 배출권거래제도와 신재생에너지 공급의무화제도 연계방안 연구. 에너지경제연구원 기본연구 보고서 10-15, 1-120.
- 조경엽 (2010). 국가 온실가스 감축목표 평가와 시사점. 한국경제연구원, 2.
- 조경엽, & 나인강 (2003). 온실가스 저감정책과 기술진보. 경제학연구, 51(3), 263-294.
- 지식경제부 (2010). 2010년 신재생에너지 정책방향. 지식경제부 보도자료. 2010년 2월.
- 통계청 (2010). 부문별 온실가스 배출통계. 국가온실가스 인벤토리 보고서 2010.
- Armington, P. (1969). A theory of demand for products distinguished by place of production. IMF Staff Paper, 16, 159-178.
- Bahn, O., Bueler, B., Kypreos, S., Luthi, H. J., & Scherrer, P. (1999). Modeling an international market of CO2 emission permits. International Journal of Global Energy Issues, 12, 283-291.
- Beckman, J., Hertel, T., & Tyner, W. (2011). Validating energy-oriented CGE models. Energy Economics, 33(5), 799-806.
- Benbear, L. S., & Stavins, R. N. (2007). Second-best theory and the use of multiple policy instruments. Environmental and Resource Economics, 37(1), 111-129.
- Berry, T., & Jaccard, M. (2001). The renewable portfolio standard: Design considerations and an implementation survey. Energy Policy, 29(4), 263-277.

- Bohringer, C., & Loeschel, A. (2006). Promoting Renewable Energy in Europe: A Hybrid Computable General Equilibrium Approach. *The Energy Journal*, Special Issue 2, 135-150.
- Bohringer, C., & Rutherford, T. (2006). Combining Top-Down and Bottom-Up in Energy policy analysis: A decomposition approach. *ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper*, 1-23.
- Bohringer, C., & Rosendahl, K. E. (2009). Green serves the dirtiest: on the interaction between Black and Green Quotas. *CESifo Working Paper*, 1-27.
- Bohringer, C., Nicholas, J. Rivers., Rutherford, T. F., & Randall, W. (2012). Green jobs and renewable electricity policies: employment impacts of Ontario's feed-in tariff. *The Berkley Electronic Journal of Economic Analysis Policy*, 12(1), 1-38.
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E., & Tavoni, M. (2006). A world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, 27(1), 13-38.
- Buonanno, P., Carraro, C., & Galeotti, M. (2003). Endogenous induced technical change and the costs of Kyoto. *Resource and Energy economics*, 25(1), 11-34.
- Butler, L., & K. Neuhoff. (2008). Comparison of feed-in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development. *Renewable Energy* 33(8), 1854-1867.
- C. Kemfert., H. Kremers., & T. Truong. (2005). The effectivity of technological innovation on mitigating the costs of climate change policies. *Discussion Paper*, German Institute for Economic Research, 1-29.
- Cornes, R. & T. Sandler. (1985). The simple analytics of pure public good provision. *Economica* 52, 103-116.
- De Jonghe, C., Delarue, E., Belmans, R., & D'haeseleer, W. (2009). Interactions between measures for the support of electricity from renewable energy sources and CO2 mitigation. *Energy Policy*, 37(11), 4743-4752.
- del Rio Gonzalez, P. (2007). The interaction between emissions trading and renewable electricity support schemes. An overview of the literature. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(8), 1363-1390.
- Fischer, Carolyn & Richard G. Newell. (2005). *Environmental and Technology Policies for Climate Change and Renewable Energy*. Resources for the Future, Discussion Paper 04-05, 1-39.
- Fischer, C., & L. Preonas. (2010). Combining policies for renewable energy: Is the whole less the sum of its parts. *International Review of* 4, 51-92.
- Frei, C. W., Haldi, P. A., & Sarlos, G. (2003). Dynamic formulation of a top-down and bottom-up merging energy policy model. *Energy Policy*, 31(10), 1017-1031.
- Fullerton, D. (1993). *Who bears the lifetime tax burden?*. Brookings Institution Press.
- Goulder, L. H. (1995). Environmental taxation and the double dividend: a reader's guide. *International Tax and Public Finance*, 2(2), 157-183.
- Goulder, L. H., & Schneider, S. H. (1999). Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies. *Resource and Energy Economics*, 21(3), 211-253.
- Goulder, L. H., Parry, I. W., Williams Iii, R. C., & Burtraw, D. (1999). The cost-effectiveness of alternative instruments for environmental protection in a second-best setting. *Journal of public Economics*, 72(3), 329-360.

- Goulder, L. H., & Mathai, K. (2000). Optimal CO<sub>2</sub> Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39(1), 1-38.
- Goulder, L. H., & Robert, N. Stavins. (2010). Interactions between State and Federal Climate Change Policies. NBER Working Paper 10-36, 1-14.
- Hwang, W. S. (2013). A computable general equilibrium approach for the quantitative evaluation of market structure : the case of the Korean electricity market. Seoul National University Ph.D. Thesis, 1-182.
- IEA (2010). *Key World Energy Statistics 2010*. Paris: IEA.
- J. Abrell., H. Weigt. (2008). The Interaction of Emissions Trading and Renewable Energy Promotion. *Economics of Global Warming Working Paper EGW (5)*, 1-17.
- Jaccard, M., Nyboer, J., Bataille, C., & Sadownik, B. (2003). Modeling the cost of climate policy: distinguishing between alternative cost definitions and long-run cost dynamics. *Energy Journal*, 24(1), 49-73.
- Janet L. Sawin (2003). Policy Lessons for the Advancement & Diffusion of Renewable Energy Technologies Around the World. International Conference for Renewable Energies, Thematic Background Paper, 1-56.
- Jensen, S. G., & Skytte, K. (2003). Simultaneous attainment of energy goals by means of green certificates and emission permits. *Energy policy*, 31(1), 63-71.
- Jorgenson, D. W., & Wilcoxon, P. J. (1990). Environmental regulation and US economic growth. *The Rand Journal of Economics*, 314-340.
- Kiuiila, O., & Rutherford, T. (2010). Calibration of abatement cost function using CES technology. Center for Energy Policy and Economics: The Swiss Federal Institute of Technology, 1-27.
- Kiuiila, O., & Rutherford, T. (2011). The cost of reducing CO<sub>2</sub> emissions: integrating abatement technologies into economic modeling. *Ecological Economics*, 87, 62-71.
- Kumbaroglu, G., & Madlener, R. (2003). Energy and Climate Policy Analysis with the Hybrid Bottom-Up Computable General Equilibrium Model SCREEN: The Case of the Swiss CO<sub>2</sub> Act. *Annals of Operations Research*, 121(1-4), 181-203.
- 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(4), 685-707.
- McFarland, J. R., & Herzog, H. J. (2006). Incorporating carbon capture and storage technologies in integrated assessment models. *Energy Economics*, 28(5), 632-652.
- Manne, A. S., & Wene, C. O. (1992). MARKAL-MACRO: A linked model for energy-economy analysis. Brookhaven National Laboratory Report BNL-47161.
- Mathiesen, L. (1985). Computation of Economic Equilibrium by a Sequence of Linear Complementarity Problems. *Mathematical Programming Study*, 23(2), 144-162.
- Morris, Jennifer F. (2009). Combining a Renewable Portfolio Standard with a Cap-and-Trade Policy: A General Equilibrium Analysis. Massachusetts Institute of Technology M.S.Thesis. N. Gunningham., & D. Sinclair. (1999). Regulatory Pluralism: Designing Policy Mixes for Environmental Protection. *Law & Policy*, 21(1), 49-76.
- OECD. (2011). Interactions between Emission trading systems and Other overlapping policy instruments.

- OECD CFA(2011)4, 1-14.
- Okagawa, A., & Ban. K. (2008). Estimation of Substitution Elasticities for CGE Models. Discussion Paper No. 08-16. Osaka: Graduate School of Economics and Osaka School of International Public Policy, Osaka University.
- Paltsev, S., J.M. Reilly., H.D. Jacoby., & J.F. Morris. (2009). The Cost of Climate Policy in the United States: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Report 173, 1-61.
- R. G. Lipsey., & Kelvin Lancaster. (1956). The general theory of second best. *Review of Economic Studies*, 24(1), 11-32.
- Rosenthal, R. (2008). *GAMS - A User's Guide*. Washington, DC: GAMS Development Corporation.
- Rutherford, T. (1995). Extension of GAMS for complementarity problems arising in applied economic analysis. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 19(8), 1299-1324.
- Rutherford, T. (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. (2002). Lecture notes on constant elasticity functions. University of Colorado.
- Rutherford, T. (2005). *GAMS - MPSGE Manual*. Washington, DC: GAMS Development Corporation.
- Schafer, A., Jacoby, H.D. (2006). Experiments with a Hybrid CGE-Markal Model. *Energy Journal Special Issue*, 171-178.
- Sorrel. S., & J. Sijm. (2003). Carbon trading in the poliy mix. *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 420-437.
- Sorrell. (2003). Who owns the carbon? Interactions between the EU emissions trading scheme and the UK renewables obligation and energy efficiency commitment. *Energy & Environment*, 14(5), 677-703.
- Strachan, N., & Kannan, R. (2008). Hybrid modelling of long-term carbon reduction scenarios for the UK. *Energy Economics*, 30(6), 2947-2963.
- Tietenberg, T. H. (1990). *Economic instruments for environmental regulation*. Oxford University Press.
- Weyant, J. P., & Olavson, T. (1999). Issues in modeling induced technological change in energy, environmental, and climate policy. *Environmental Modeling & Assessment*, 4(2-3), 67-85.
- Wing, I. S. (2006). The Synthesis of Bottom-up and Top-down Approaches to Climate Policy Modeling: Electric Power Technologies and the Cost of Limiting US CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy*, 34(18), 3847-3869.
- Wing, I. S. (2008). The Synthesis of Bottom-Up and Top-Down Approaches to Climate Policy Modeling: Electrical Power Technologies Detail in a Social Accounting Framework. *Energy Economics*, 30(2), 547-573.