

발전부문 하이브리드 모형을 사용한 기후변화 정책효과 분석[†]

오인하* · 오상봉**

요약 : 본 연구에서는 기존의 하향식 모형을 기반으로 전력부문에 한하여 상향식 모형의 요소를 적용함으로써 전원구성 및 전원계획을 고려할 수 있는 하이브리드 모형을 개발하였다. 여기서 개발된 모형은 기존의 모형과 달리 개별적인 규모에 대한 수확체감 생산함수로 각각의 발전 기술(원자력, 중유, 가스, 신재생 등)을 표현하였고 이것의 합산으로써 전력부문을 모사하고 있다. 하이브리드 모형과 기존의 하향식 모형을 동일한 시나리오 하에서 비교할 때 하이브리드 모형을 통한 감축비용 결과값이 기존의 하향식 모형과 비교해서 더 낮았다. 이는 상향식 모형이 추가될 경우 감축비용이 더 낮게 계산된다는 기존의 연구결과에 부합되는 것이다. 추가로 중복지제의 효과에 대해서도 살펴보았는데, 배출규제에 의무할당제가 추가될 경우 배출규제만 있을 때에 비해 전체적인 감축비용은 소폭 증가하고 석탄 발전 등 배출집약도가 높은 발전기술을 사용하는 전원의 비중은 비슷하거나 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 향후 전력 관련 공학적 자료가 더욱 충실히 갖추어진다면 본 연구에서 개발된 하이브리드 모형은 실제 정책의 파급 효과를 추정하기 위한 유용한 도구로 이용될 수 있을 것이다.

주제어 : 연산가능일반균형, 하이브리드 모형, 기후변화, 전원구성

JEL 분류 : C68, Q48, Q54

접수일(2013년 5월 14일), 수정일(2013년 12월 4일), 게재확정일(2013년 12월 12일)

[†] 본 논문은 에너지경제연구원의 2012년 기본연구보고서인 '전원구성계획을 고려한 에너지·기후변화 정책분석 모형개발'을 발췌 및 요약 한 것임을 밝힘.

* 건국대학교 신산업융합학과 조교수(e-mail: inhaoh@konkuk.ac.kr)

** 한국노동연구원 부연구위원, 교신저자(e-mail: sangboh@gmail.com)

Climate Change Policy Analysis Considering Bottom-up Electricity Generation System

Inha Oh and Sang-bong Oh

ABSTRACT : We develop a hybrid model which allows the change in electricity generation mix by adding the electricity-sector components of bottom-up model to the conventional CGE model. The electricity sector is represented as a sum of separate generation technologies, each of which has the form of DRTS (Decreasing Returns to Scale) production function, unlike the conventional CGE model. We compare the effects of the 30% emission reduction target using the hybrid model with those using the conventional CGE model. The cost of meeting the target is lower with the hybrid model than the conventional CGE. It is consistent with previous studies in that adding the bottom-up components to the top-down model reduces the cost of emission reduction. In an extra analysis we find that an additional regulation like RPS (Renewable Portfolio Standard) increases the cost.

Keywords : Computable general equilibrium, hybrid model, climate change, electricity generation system

Received: May 14, 2013. Revised: December 4, 2013. Accepted: December 12, 2013.

* Konkuk University, Department of Advanced Industry Fusion(e-mail: inhaoh@konkuk.ac.kr)

** Korea Labor Institute, Corresponding Author(e-mail: sangboh@gmail.com)

I. 서론

전력 관련 에너지 및 기후변화 정책은 향후 우리나라가 녹색성장을 달성하기 위한 핵심적인 정책이다. 현재 전력을 포함한 전환부문의 에너지 소비는 전체 일차 에너지수요의 25% 이상을 차지하고 있으며, 향후 경제발전과 소득수준 향상에 따른 전력화(electrification) 현상의 심화에 따라서 전력 소비가 우리나라 에너지소비에서 차지하는 비중은 점점 더 커질 것으로 예상된다. 전력화 현상에 따른 가정 및 상업 부문의 전력 수요 증가와 이미 높은 수준의 산업부문의 에너지효율을 감안하면, 향후 우리나라의 2020년 기준안(BAU; Business-As-Usual) 대비 온실가스 30% 감축의 중기감축목표 달성을 위해서는 전력생산부문에서 온실가스 배출량을 줄이는 것이 필수적이라 할 수 있다. 발전부문의 온실가스 배출을 줄이기 위해서는 효율향상 뿐만 아니라 신재생에너지의 보급 확대 및 원전 신설 등 전원믹스의 변화를 필요로 하며, 이는 새로운 전력설비에 대한 비가역적인 투자를 통해 이루어진다.

원전 계획 및 신재생에너지 정책 등 전력 관련 에너지 및 기후변화 정책이 경제 전반에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 우리나라의 전원구성 및 전원계획을 고려한 모형의 개발이 필요하다. 어떤 정책의 미래 비용 및 편익의 분석은 단순히 현재 상태의 전원 구성이 계속될 것이라는 가정 보다는 미래의 전원계획에 기반을 두고 이루어져야 하기 때문이다. 정책이나 규제의 효과 전망은 주로 기준안 대비 주요한 거시변수의 증가분 또는 감소분으로 표시되는데 기준안에 전원 구성의 변화가 포함되어 있지 않은 경우에는 분석된 값이 정책효과를 과대평가하거나 과소평가하게 될 것이다.

하향식 모형인 연산가능 일반균형모형(CGE; Computable General Equilibrium)이 다양한 에너지 및 기후변화정책의 효과를 분석하는데 주로 활용되고 있다. 그런데 지금까지 개발되어 사용되고 있는 모형은 전력부문을 발전원별로 세분화 하지 않고 총합된 하나의 부문으로 간략하게 묘사하여 전원구성의 변화를 구현할 수 없다. 이렇게 설계된 CGE 모형의 경우, 전력 부문의 온실가스 배출을 줄여야 하는 규제가 적용되면, 대체탄력성의 가정에 따라서 전력생산량을 줄이거나 사용되는 화석연료의 믹스(mix)를 저탄소 연료로 바꾸는 것만 가능하다. 이러한 경우, 화석연료 외의 발전원인 신재생에너지를 이용한 발전과 원자력발전이 명확하게 드러나지 않아서

이들의 증대를 통한 온실가스 배출 감소를 고려하여 분석하기가 어렵게 된다. 즉, 현재 우리나라에서 계획되고 있는 원자력발전 비율 상향 및 신재생에너지를 이용한 발전 증대 등을 포함하는 전원구성의 중장기 계획을 고려하기가 어렵게 된다. 또한 화석연료 믹스의 변화도 쉽게 일어날 수 있는 것이 아니다. 전력부문은 대규모 설비 투자 산업이자 장치산업으로 전원구성을 변동하기 위해서는 비가역적인 대량의 자본투자가 필요하며 송배전, 설비용량, 기저부하 및 첨두부하 등 고려해야 할 기술적 특성이 많다. 이를 충분히 고려하지 못하는 경우, 정책효과 분석은 비현실적인 결과를 낳을 수 있다. 이 때문에 하향식 모형에 발전기술을 고려할 수 있는 상향식 모형을 추가한 하이브리드 모형의 필요성이 대두된다.

하이브리드 모형은 하향식 모형과 상향식 모형의 장점을 모아 각 모형의 단점을 극복하기 위해 개발되었다. 하향식 모형인 CGE 모형은 미시경제이론과 거시경제이론을 바탕으로 구축되는 미시-거시 시스템(micro-macro system)으로 산업수준의 미시적 자료가 통합되어 거시경제를 이루게 되기 때문에 미시적 분석과 거시적 분석결과가 상충되는 문제가 거의 발생하지 않고 여러 정책이 경제 전체에 미치는 파급효과를 비교 및 분석할 수 있다는 장점이 있으나, 위에서 본 바와 같이 발전 등의 기술적 특성을 고려하기 힘들다는 단점이 있다. 반면 상향식 모형은 여러 대안의 기술적 특성 및 비용 등을 고려할 수 있다는 장점이 있지만 경제 전체에 미치는 파급효과를 보기에는 어려운 점이 있다. 따라서 하향식 모형과 상향식 모형을 결합에 어려움이 있음에도 최근 많은 연구자들이 새로운 하이브리드 모형의 개발에 노력을 기울이고 있다.

예를 들어, Böhringer(1998)과 Böhringer and Rutherford(2005, 2008)는 MCP (mixed complementarity problem) 접근방식을 통해 상·하향식 모형을 하나의 수학적 틀 안에서 기술함으로써 가정 및 자료의 일관성을 극복한 통합하였다. 이 때 발생하는 연산의 복잡성을 극복하기 위한 방법으로 Böhringer and Rutherford(2009)에 의해 분할기법(decomposition technique)이 제안되었다. Sue Wing(2008)은 사회계정행렬(SAM; Social Accounting Matrix)과 기술적 자료를 연결하여 사회계정행렬을 구축함으로써 일관성문제를 극복하였다. 독립적인 상·하향식 모형을 연결하는 방법도 사용이 되었는데, Strachan and Kannan(2008)은 MARKAL에 단순화된 거시 성장모형인 Macro를 결합하였다. McFarland et al.(2004)는 하향식 모형인 MIT

EPPA에 새로운 전력발전기술에 대한 공학적인 정보를 결합시켰다.

본 논문에서는 전원구성 및 전원계획을 고려하고 적용할 수 있는 하나의 하향식 모형을 개발하고자 한다. 하향식 모형을 주요 토대로 하고 전력 부문에 상향식 모형의 요소를 가미하는 부분적 하이브리드 모형이다.

논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 본 연구에서 사용한 모형 개발 과정을 소개하였으며, 3장은 모형개발 결과 및 이를 이용한 정책효과 분석의 예시를 보였다. 마지막장에서는 전체 연구를 요약하고 시사점 및 향후 과제 등을 정리하였다.

II. 하이브리드 모형의 개발

1. 하향식 연산가능 일반균형(CGE)모형의 설정

분석에 사용한 CGE 모형은 모사하는 경제의 범주를 우리나라에 국한하는 소국 개방경제(small open economy) 가정을 사용한 일국 모형이며 경제주체의 근시안적(myopic) 예측능력을 가정하는 정태모형이다. 모형은 포괄적인 에너지-경제 자료를 기반으로 하여 분석결과의 정확도를 높이려 하였다. 즉, 에너지시장을 물리적 단위로 표현하는 자료를 사용하였다.

투입요소는 노동 및 자본이며, 생산함수는 각 부문에서 서로 대체가능한 재화끼리의 묶음(nesting)을 통한 복합재의 형성을 가정하고 있다. 모형의 최종적 균형상태는 대표 주체로부터의 최종 수요에 기반을 두고 있다. 최종 수요는 투자와 소득 수지(income balance) 제약 하에 있으며, 각 지역 민간과 공공의 소비는 요소 소득 및 세금으로부터 지불된다. 다음의 <그림 1>에서 <그림 4>까지는 여기서 사용한 생산구조 및 최종수요 구조 등을 각각 보여주고 있다. 각 재화의 생산 및 수요함수는 그림에서 보여주는 포섭 구조, 대체탄력성, 기준연도 재화의 가격 및 생산량, 세율 및 수출입구조 등을 기반으로 하여 CES(Constant Elasticity of Substitution) 함수¹⁾ 형태로 표현 된다.

산업별 대체탄력성은 Okagawa and Ban(2008)에서 OECD 국가를 대상으로 분석하여 계산한 계수를 사용하였다.²⁾ 배출전망 및 경제성장 전망을 기준연도 경제구조

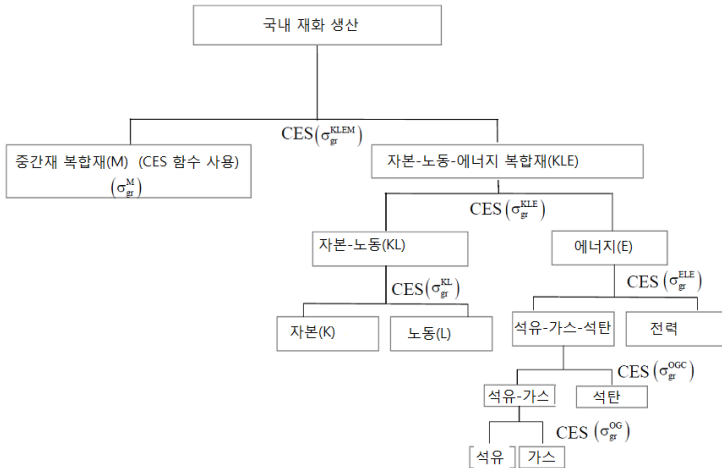
1) 레온티에프 함수와 콥-더그라스 함수 형태를 포함한다.

에 적용하기 위하여 추가적으로 외생적 변수인 에너지효율향상(Autonomous Energy Efficiency Improvement, AEEI)을 사용하여 간극을 보정하였다.

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 GAMS의 하위언어이다. 예를 들어 <그림 1>에서 <그림 4>에 이르는 포섭구조들은 하위구조가 복잡해지면 실제로는 함수형태가 매우 복잡해져서 구현에 어려움이 있으나 MPSGE를 이용하면 마치 그림을 그리듯 쉽고 직관적으로 나타낼 수 있다. 에너지복합재(E)의 생산에 있어서 전력과 화석연료복합재 사이에 대체관계가 있다. 또한 화석연료복합재는 유동화 가능한 석유-가스 복합재와 유동화가 어려운 석탄을 투입요소로 하여 생산된다. 전력은 원자력, 석유, 가스, 석탄, 신재생 등 다양한 발전원에 따른 발전기술을 통해 생산되며 <그림 3>과 같이 발전원별로 생산된 전력은 동일한 재화로 취급된다.

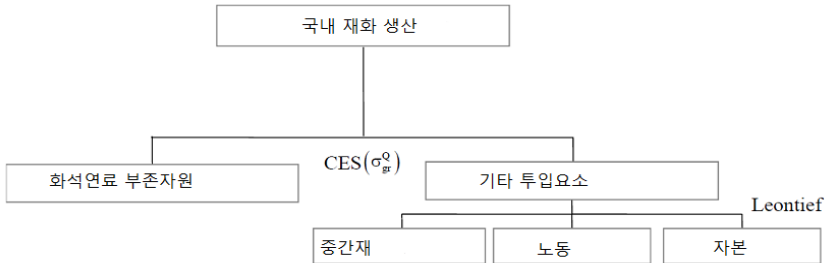
모형에서 사용한 대체탄력성 자료는 본 논문의 <부록 1>에 정리하였다.

<그림 1> 생산 포섭구조(화석연료 제외)

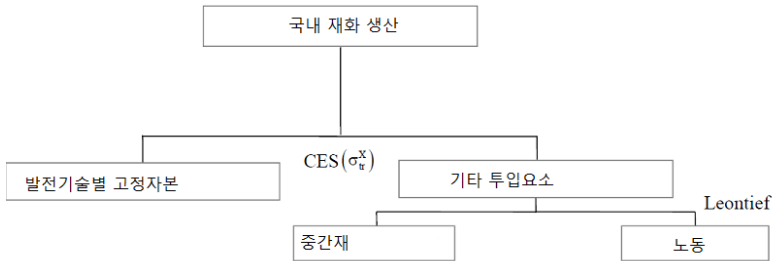


2) Okagawa and Ban의 연구에서 산업별 대체탄력성이 음수로 분석된 항목은 0의 값을 갖도록 치환하였다.

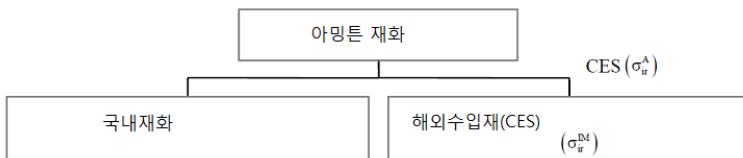
<그림 2> 화석연료 생산 포섭구조



<그림 3> 발전기술별 전력생산 포섭구조



<그림 4> 아밍튼 재화 생산 포섭구조



기존의 CGE 모형과 가장 큰 차이점을 나타내는 부분은 <그림 3>의 발전기술별로 나타나는 전력생산의 포섭구조이다. 개별 발전기술별로 특화된 고정요소가 다른 부가가치 및 중간재와 결합되어 전력을 생산하게 된다. 이 때 사용되는 CES 함수의 탄력성 σ_{tr}^x 는 외생적으로 주어진 공급의 가격탄력성 η 에 따라서 캘리브레이션된다. 즉 전력생산부문을 단일부문으로 취급한 기존의 CGE 모형과 다르게 본 모형에서는 발전기술별로 나뉘어져 균일한 재화인 전력을 생산하게 되며, 각 고정요소(발전기술별 자본)는 전원구성을 조정하게 된다.³⁾

본 연구는 2007년을 기준연도로 하고 있다.⁴⁾ 주로 사용된 자료는 2007년의 사회계정행렬(SAM; Social Accounting Matrix)을 작성하기 위한 산업연관표이다. 추가적으로 에너지밸런스 자료, 전원구성자료, 온실가스배출 정보 등이 사용되었다.

1) 업종구분

본 연구에서 모델링 시 사용한 우리나라 전체 경제의 업종분류는 정부에서 2011년 7월 발표된 부문별·업종별·연도별 감축목표에서 사용된 업종분류를 따르기 위해 최대한 노력하였다.⁵⁾ 또한 추가적으로 에너지원을 세분류하였다.

〈표 1〉 업종 분류 및 구성

번호	업종기호	업종설명	번호	업종기호	업종설명
1	AFF	농림수산업	16	ORE	철강
2	COA	석탄	17	NFM	비철금속
3	CRU	원유	18	MAC	기계
4	NGA	천연가스	19	ECT	전기 및 전자
5	GAS	도시가스	20	DIS	전자표시장치
6	MIN	광산업	21	SCT	반도체
7	FOO	음식료품	22	AUT	자동차
8	CLO	섬유가죽	23	SHB	조선
9	PPP	인쇄제지목재	24	OMA	기타제조업
10	CKC	코크스	25	ELE	발전 및 온수공급
11	NAP	납사 및 기타석유	26	SER	서비스
12	FOL	연료유	27	CON	건설
13	CRP	화학제품	28	TRN	수송
14	CER	유리 및 요업			
15	CEM	시멘트			

- 3) 자세한 생산함수식은 Böhringer et al.(2012)의 부록을 참고하기 바란다.
- 4) 2007년을 기준연도로 한 이유는 본 연구에서 분석하고자 한 부문별·업종별·연도별 감축목표의 기준연도가 2007년이기 때문이다.
- 5) 부문별·업종별·연도별 감축목표에서 사용된 업종분류는 다음과 같다. 18개 업종의 산업부문(정유, 광업, 철강, 시멘트, 석유화학, 제지/목재, 섬유/가죽, 유리/요업, 비철금속, 기계, 전기/전자, 전자표시장치, 반도체, 자동차, 조선, 기타제조, 음식료품, 건설업), 수송부문, 가정부문, 상업부문, 공공기타부문, 농림어업부문, 폐기물 부문.

부문별·업종별·연도별 감축목표의 업종분류는 표준산업분류(KSIC) 코드를 기준으로 설정되어 있다. 그러나 사회계정행렬을 만들기 위해서는 산업연관표 상의 산업분류가 필요하다. 표준산업분류 상의 업종분류를 산업연관표 상의 업종분류와 연결시키기 위하여 한국은행에서 나온 표준산업분류 업종분류와 산업연관표 기본부문 매핑 파일을 사용하였다. 이를 통해 5자릿수(digit)로 표시된 업종의 분류기준을 산업연관표의 기본분류에 연결시키는 매핑을 만들 수 있었다. 결과적으로 일부 세계 산업의 누락 및 중복의 우려가 있긴 하지만 부문별·업종별·연도별 감축목표의 업종과 한국은행 산업연관표를 연결하는 매핑을 만들었으며 이를 분석에 사용하였다. <표 1>은 본 연구의 분석에 사용한 업종 분류를 보여주고 있다.⁶⁾

에너지원은 석탄, 코크스, 원유, 가스, 연료유, 납사(naphtha), 전력 등으로 나뉘어 졌다. 기존의 CGE 모형은 여러 종류의 석유를 하나로 취급한 경우가 많으나 본 연구에서는 석유를 세분류하여 납사를 따로 관찰하였다. 우리나라에서는 석유화학 산업 등에서 납사를 연료가 아닌 제품 생산을 위한 원료로 많이 사용하고 있다. 납사를 따로 관찰하지 않는 경우 석유화학 산업에서 원료로 사용되는 석유가 연료로 계상되어 해당부문의 배출량이 과대 설정될 가능성이 있다. <표 1>에서 에너지원은 COA, CRU, NGA, GAS, CKC, NAP, FOL, ELE이다.

2) 외생적 거시변수 전망 적용

본 연구에 사용된 모형에서는 BAU(Business-As-Usual) 시나리오를 구축하기 위해서 GDP 전망, 에너지가격전망, 부문별·원별 에너지수요전망, 부문별·원별 온실가스 배출전망 등 다양한 외생적 장기전망이 필요하다.⁷⁾

본 연구에서 사용한 거시변수에 대한 전망은 대부분 에너지경제연구원(2011)의 장기전망을 차용하고 있다. <표 2>와 <표 3>은 대표적으로 사용된 외생적 거시변수 전망인 GDP 전망 및 원유가 전망 등을 보여주고 있다. 석탄을 제외한 화석연료의 가격은 원유가 전망과 연동하여 변화도록 설정하였다.

6) 산업분류와 관련된 자세한 내용은 오상봉(2012)을 참조하기 바란다.

7) 모형에서 사용한 에너지수요전망 및 온실가스 배출전망은 <부록 2>에 총합하여 표시하였다. 에너지경제연구원(2011)을 보면 자세한 내용을 알 수 있다.

〈표 2〉 연도별 GDP 레벨(2007=100)

2007	2010	2015	2020	2025	2030
100	109	134	160	187	211

〈표 3〉 원유가 전망(2007=100)

2007	2010	2015	2020	2025	2030
100	108	136	155	169	177

배출전망 및 경제성장 전망을 기준연도 경제구조에 적용하기 위하여 추가적으로 외생적 변수인 자연적 에너지효율향상(AEEI; Autonomous Energy Efficiency Improvement)을 사용하였다. 본 모형은 최장 2035년까지의 분석이 가능한 외생적 전망변수 자료를 포함하고 있다.

3) 에너지소비 및 온실가스 배출 전망 적용

추가적으로 업종별 에너지전망이 적용되었는데 이에 기반을 두어 온실가스 배출 전망이 계산되었다. CGE 모형은 금액(monetary) 기반으로 운영되기 때문에 위와 같은 물리적 자료의 적용은 에너지 재화의 금액 단위 값과 에너지단위(TOE; Tonne of Oil Equivalent) 값 및 온실가스 배출단위(TCO₂eq) 값을 연결하는 업종별로 특화된 계수(coefficient)를 계산함으로써 이루어졌다.

에너지경제연구원(2011)의 에너지수요전망에는 산업이 충분히 나뉘어 있지 않아서 본 모형에서 사용하는 세분류 업종과 매칭 할 수 없는 경우가 있는데, 이때는 부득이하게 산업연관표의 각 연료별 비용분배율(cost share)을 사용하여 각 산업별 에너지소비를 계산하여 분배하였다. 또한 에너지수요전망의 산업분류의 정의와 산업연관표의 산업분류의 정의가 다르기 때문에 발생하는 문제점들이 있다. 수송과 건물(상업, 가정 등)부문이 대표적 예인데, 이는 에너지 부분의 자료를 해당 부문에 분배하여 해결하려 노력하였다.⁸⁾

8) 예를 들어, 자가용 자동차에서 사용한 연료유는 에너지수요전망에서는 수송 부문에 속해 있지만, 산업연관표 상에서는 가정 부문에서 사용하는 것으로 되어 있다. 이 경우, 에너지수요전망의 자가용 자동차

2. 하이브리드 모형의 설정

본 연구에서 개발하는 하이브리드 모형은 주로 하향식 모형인 앞 절의 CGE 모형을 골간으로 하고 일부 부문(전력, 교통, 철강 등, 본 연구에서는 전력 부문)에 대해서만 상향식 모듈을 만들어 하향식 모형에 접속시킨 것이다. 이러한 하이브리드 모형의 연산은 Böhringer and Rutherford(2009)에서 시도하는 바와 같이 CGE와 상향식 모듈이 분할되어 연산되기도 하고 Böhringer(1998)와 Böhringer and Rutherford(2005, 2008)와 같이 상향식 모듈과 하향식 모형이 동시에 연산되어 균형점을 찾아 내기도 한다.

Böhringer(1998)와 Böhringer and Rutherford(2005, 2008, 2009) 등의 기존 연구에서는 상향식으로 나타내는 부문, 즉 전력 부문의 생산함수를 설비용량과 한계비용에 따라서 계단식 공급곡선으로 나타내고 각 발전원이 그 중의 한 단씩을 차지하게 하는 방법을 사용하였다. 그러나 이와 같이 전력 부문을 계단식 공급곡선으로 나타내고 각 발전원이 되는 기술(석탄, 가스, 중유, 원자력 등)을 그 중의 한 단으로 나타나는 경우, 플립-플롭(flip-flop) 현상이 너무 강하게 나타날 수 있다. 즉, 전력 가격이 변동하여 일정 경계를 넘어가게 되는 순간 비경제적이 된 발전원 전체가 비활성화 상태가 되어버리는 것이다. 기저부하 및 첨두부하의 개념이 있고, 전력 송배전 인프라에 인한 제약이 있는 조건을 생각하면 이러한 가정은 현실성을 잃게 된다. 또한 계단식 공급곡선은 기술별 설비용량의 상한 및 하한의 설정의 어려움이 있으며 설비용량을 포함한 기술적 자료를 정확히 입력하는 경우에도 너무 많은 기술적 제약조건의 존재로 인해 모형이 과잉규정(over-specify)되어 균형점을 찾아가는 하향식 모형의 이점을 잃게 되는 경우가 있다. 또한, 계단식 공급곡선을 통해 계산된 균형 값은 원별 전력생산량 측면에서는 현실적인 값을 잘 표현할 수 있지만 이면의 원별 잠재가격(shadow price)의 경우에는 다소 임의적이고 비현실적인 값이 계산되는 경우가 많다. 실제 기존의 연구에서도 각 발전원별 생산량(발전량)은 정해진 범위를 잘 따르게 되기 때문에 현실적인 분석결과를 보여주고 있지만 원별 잠재가격은 잘 보여주지 않고 있다. 만약 어떤 발전원의 잠재가격이 매우 높거나 매우 낮아

연료유 수요 부분 자료를 가져와서 가정 부문에 포함시켰다.

서 심지어는 음의 가격을 갖게 된다고 하는 경우 발전원별 설비용량을 조정하지 않는 이유를 설명하기 매우 어려워질 것이다.

본 연구에서 개발한 모형은 MCP(Mixed Complementarity Problem) 방식을 사용하여 하이브리드 모형을 설정했다는 점에서는 기존의 연구들(Böhringer, 1998; Böhringer and Rutherford, 2005, 2008, 2009)과 비슷하다고 할 수 있지만, 계단식 공급곡선을 사용하지 않았다는 점에서는 기존의 연구들과 차별된다.

본 연구에서는 전력 부문의 기술적 요소를 나타내는데 있어서 기존에 주로 사용한 계단식 공급곡선을 사용하지 않는 대신, 발전기술별로 전력 생산에 필요한 고정 요소가 있다는 개념을 도입하여 만들어낸 다수의 DRTS(Decreasing>Returns-To-Scale, 규모에 대한 수확체감) CES 생산함수의 조합을 사용하였다. 이러한 변화가 주는 가장 큰 이점은 전력의 상대가격 변화에 따라서 각 발전기술의 생산량 변화가 부드러운(smooth) 반응곡선의 형태를 보이게 된다는 것이다. 기존의 계단식 공급곡선을 적용하는 경우에는 각 발전기술의 대응이 외생적으로 주어진 설비용량 가정의 상한과 하한 사이에서 점핑(jumping)하는 대응, 즉 플립-플롭 현상을 보여주었으며, 이는 현실의 시장 대응을 잘 반영하는 모습은 아닐 것이다. 물론 본 연구에서 사용한 것과 같이 다수의 DRTS CES 함수를 사용하는 경우에도 각각의 발전기술에 대해 설비용량으로 인한 제한조건을 줄 수 있으며 이 경우에는 제한 범위 내에서 부드러운 반응곡선을 보여주게 된다.

여러 발전기술은 전력시장에 공급하기 위해 경쟁하며 전력 가격은 한계 공급자의 생산비용과 같아지게 된다. 한편 각각의 발전기술은 기술별 공급탄력성에 따라서 전력가격의 변화에 대응하게 된다.

1) 발전기술의 표현 및 캘리브레이션

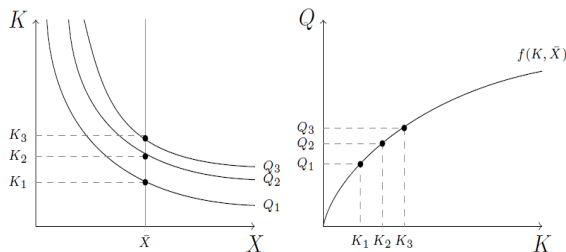
본 연구에서는 Kiuila and Rutherford(2010, 2011) 및 Böhringer et al.(2012) 등에서 사용된 규모에 대한 수확체감형태의 발전원별 생산함수를 사용하여 각 발전기술을 나타냈으며, 외생적으로 주어진 공급 탄력성에 따라서 생산함수의 모수들이 캘리브레이션 되었다. 각각의 발전기술은 전력이라는 균일한 재화를 생산하게 된다.

CES 함수의 형태가 통상적인 규모에 대한 수확불변(Constant Returns To Scale,

CRTS)의 성질을 갖지 않고 수확체감(Decreasing Returns to Scale, DRTS)의 성질을 갖게 되는 원인은 각 발전기술별로 자본 등의 투입요소에 대한 고정요소(fixed factor)를 가정하였기 때문이다.⁹⁾ 즉 하나의 투입요소가 일정한 비율 또는 범위로 정해져 있는 경우, 다른 투입요소를 증가시킨다고 하더라도 거기에 비례하는 생산량 증가를 얻을 수 없게 된다. 그리고 각각의 발전원에 대해서 고정요소를 조정함으로써 각각의 발전원에서의 공급이 전원구성 및 계획에 맞도록 조정할 수 있게 된다. DRTS 세팅 하에서는 각각의 발전원에서의 공급량이 애초의 전원계획에서의 공급량보다 많아지면 많아질수록 단위 생산량에 들어가는 비용은 점점 더 늘어나게 될 것이다. 대규모의 설비투자 산업인 발전산업의 특성을 고려하면 발전기술별로 이러한 고정요소를 설정하는 것은 타당한 가정으로 여겨진다.

Kiula and Rutherford(2011)에서는 다음과 같은 <그림 5>를 사용하여 왜 고정요소가 있는 경우 CES 생산함수가 규모에 대한 수확체감의 성질을 갖게 되는지 설명하고 있다. <그림 5>의 왼쪽에서 보는 곡선들은 등량곡선(isoquant)이고 X 는 고정요소이며 K 는 그 외의 투입요소이다. X 가 \bar{X} 로 고정되어 있는 경우에는 K 가 K_1 에서 K_2 , K_3 로 같은 양씩 더 투입이 된다고 하여도 늘어나는 생산량은 점점 줄어들게 된다. 즉 $Q_2 - Q_1 > Q_3 - Q_2$ 가 된다. 이러한 점 때문에 오른쪽의 그림에 도시된 생산함수 $f(K, \bar{X})$ 는 투입요소에 대해 규모에 대한 수확체감의 성질을 갖게 되는 것이다.

<그림 5> 고정요소가 있는 경우의 DRTS CES 생산함수



자료: Kiula and Rutherford(2011)

9) 고정요소 가정은 단기에 합당한 가정이다. 만약 장기간의 경제상황을 한꺼번에 최적화하는 동태모형을 사용하는 경우 고정요소의 가정은 합리적이지 않을 수 있다. 본 연구는 비교적 짧은 미래인 2020년을 대상으로 한 정태모형이기 때문에 고정요소 가정에서의 문제점은 크지 않으리라 생각하였다.

각각의 발전기술의 생산함수가 외생적으로 주어지는 공급 탄력성에 따라서 캘리브레이션 되는 과정은 다음과 같다.¹⁰⁾

먼저 자본투입이 고정요소가 되고 노동투입이 변동한다고 가정하자. 균형상태에서의 CES 함수는 $p = c(r, w)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이 때, w 는 임금수준이고 r 은 고정요소에 의한 자본비용 수준이다. Shephard's lemma에 따라서,

$$y \frac{\partial c(r, w)}{\partial r} = \bar{R} \tag{1}$$

이며 여기서 \bar{R} 은 고정요소의 공급량이다. CES 비용함수는 calibrated share form으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c(r, w) = (\theta r^{1-\sigma} + (1-\theta)w^{1-\sigma})^{\frac{1}{1-\sigma}} \tag{2}$$

이 경우 캘리브레이션의 문제는 적절한 σ, θ 값을 찾는 것으로 귀결된다. 단 외생적으로 주어진 공급탄력성 η 에 대해 $\frac{\partial y}{\partial (p/w)} \frac{(p/w)}{y} = \eta$ 를 만족하여야 한다. (2)를 미분하여 (1)를 계산하면 $r = p \left(\frac{\theta y}{\bar{R}} \right)^{1/\sigma}$ 를 구할 수 있고 이를 다시 균형에서 가격과 비용이 같다는 성질을 이용하여 (2)에 대입한 후, 이를 통해 구해진 함수를 편미분하면 η 값을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 η 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\sigma(1-\theta)}{\theta} \tag{3}$$

고정요소가 있을 때 공급탄력성인 η 는 각 발전원별 기술특성을 반영하여 외부에서 주어져야 한다. 그 경우 (3)과 고정요소를 제외한 투입요소의 요소분배율인 θ 를 사

10) 중간과정을 포함한 좀 더 자세한 내용은 Rutherford(2002)를 참고하기 바란다.

용하여 발전원별 대체탄력성을 구할 수 있게 된다. 여기서 계산된 σ 는 앞서 <그림 3>에서의 발전기술의 대체탄력성 σ_{tr}^X 로 사용된다.

2) 발전원별 기술자료의 가정

지금까지 살펴본 바와 같이 본 모형에서는 각 발전기술을 각각의 DRTS 생산함수를 통해 나타내며 이들을 총합하여 전력 부문을 나타내고 있다. 각 발전기술의 특징은 고정요소의 크기, 화석연료 및 노동투입 등 기타 투입요소의 크기, 공급탄력성 등을 통해서 나타낼 수 있다.

발전기술별 공급탄력성은 시계열로 가용한 자료가 충분한 경우 가격 및 발전량 자료를 사용하고 계량경제학적 방법론을 적용함으로써 추정될 수 있을 것이다. 가용한 자료가 부족한 경우에는 각 발전기술별 공급탄력성에 대해 시나리오를 적용해 여러 값들을 대입해 볼 수 있다. 공급탄력성이 크다는 것은 해당 발전기술이 전력의 상대가격의 변화에 빠르게 대응하여 생산량을 변동시킬 수 있다는 것을 뜻하며 작다는 것은 그 반대를 뜻한다. 공급탄력성이 0인 경우에는 전력가격과 상관없이 계획에 따른 현재의 생산량이 해당 발전기술이 공급할 수 있는 상한선이 된다.

여러 발전기술을 비교해 보면 수력이나 원자력과 같은 발전기술은 공급탄력성이 상당히 낮거나 0의 값을 갖게 될 것을 예측해볼 수 있다. 수력의 경우 수력자원의 유무와 댐 건설 가능성 등의 영향을 크게 받으며 원자력의 경우 발전소 건설기간이 길 뿐만 아니라 정치적으로 결정되어야 할 부분도 많기 때문에 전력의 상대가격의 변화에 따라 민감하게 생산량을 증대시키기 어려울 것이다. 반면 가스 발전의 경우 가변적으로 발전량을 조절할 수 있는 것으로 알려져 있으며 신재생에너지의 경우, 한 기당 발전량이 작은 분산전원의 형태를 띠는 경우가 많아서 공급탄력성이 상대적으로 높을 것으로 예상된다. 하이브리드 모형의 결과치는 이러한 외생적으로 주어지는 발전기술별 공급탄력성의 값에 크게 영향을 받게 된다. 따라서 좀 더 강건성 있는 연구결과를 얻기 위해서는 공급탄력성의 값에 따른 민감도 분석(sensitivity analysis)이 반드시 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 발전원별 기술자료의 정확한 획득과 입력보다는 모형의 개발과 분석들을 마련하는 데에 더 중점을 두었기 때문에 공급탄력성에 대해 간단한 가정을 하고

별도의 민감도 분석은 실시하지 않았다. 본 연구에서 사용한 발전기술별 공급탄력성 가정은 <표 4>와 같다.

<표 4> 발전기술별 공급탄력성 가정

발전기술	공급탄력성 η
석유	1
가스	1.5
석탄	1
원자력	0
신재생	2

발전기술별 비용구조의 경우도 실제 자료를 쓰지 않고 강한 가정을 사용하여 만들어진 가상의 자료를 사용하였다. 이는 가용한 자료가 부족하고 하향식 모형과 상향식 모형 간의 자료의 일관성(산업연관표 기준)을 유지하기 힘들기 때문이다. 향후 발전기술별 비용구조의 자료가 모두 구해지고 이것이 산업연관표 상의 전력 부문의 투입 요소와 총합이 비슷하게 되면 자세한 발전기술별 비용 자료를 사용할 수 있을 것으로 보인다.

현재 투입요소 중 자본은 고정요소로 취급되었다. 또한 자본의 발전기술별 배분의 초기값은 전원계획에서 사용한 발전원별 전력생산 비율에 따라서 나누었다. 화석연료는 해당되는 발전기술에서 사용되고 그에 따른 온실가스를 배출하는 것으로 취급되었으며 신재생과 원자력은 화석연료를 사용하지 않는다. 나머지 중간재 및 노동은 복합재가 되어 발전기술의 종류와 상관없이 생산량에 비례하여 탄력성에 따른 대체가능성에 따라서 사용된다고 가정하였다. 이러한 비용구조는 총합하였을 때 하향식 모형과 일관성이 있어야 하는데, 이를 위해서 변동이 있을 때마다 최소자승법을 이용해 잔차를 최소화하는 방향으로 발전기술별로 할당된 기타 투입요소 등을 조정하였다.

3) 우리나라의 전원구성 전망 시나리오

우리나라의 향후 전원구성은 EIA(2010)에서 발표한 각국별 전망치를 사용하였다.

<표 5>는 사용한 전원구성 전망을 나타내고 있다. 일부 비율이 낮은 신재생에너지의 경우에는 가상의 자료를 사용하기도 하였다. 외부의 자료를 사용한 이유는 미래 에너지수요 및 전원구성에 대한 국내 장기계획이 연도별로 계속 업데이트 되어 하나의 기준을 선택하는데 어려움이 있었기 때문이다. 본 연구는 이론적인 모형 개발에 초점을 두고 있으며 전원부문 모사에 있으며, 기술자료의 부족으로 실제로 다른 연구에서도 전원부문 모사에 있어서 가상적 자료를 종종 사용하였다. 이에 따라 전원구성도 논란의 여지가 적은 해외기관의 전망치를 적용하여 사용하게 되었다. 이러한 부분은 향후 국내 자료를 사용하여 개선될 수 있을 것이다.

<표 5> 연도별 전원구성(%)

	2007	2020
석유	4.5	3
가스	17	18.6
석탄	41	33.5
원자력	35.5	42.7
신재생	2	2.2

3. 개발된 하이브리드 모형의 특성 및 기존 모형과의 차이점

본 연구에서 개발된 하이브리드 모형과 기존의 CGE 모형과의 차이점은 다음 <표 6>에 정리되어 있다. 방법론적으로 가장 다른 점은 기존의 CGE 모형은 보통 전력 부문을 부가가치 및 에너지 복합재와 중간재가 투입되어 전력이 생산되는 단일한 생산함수로 표현한 반면, 하이브리드 모형은 개별적인 DRTS 생산함수로 각각의 발전기술(원자력, 중유, 가스, 신재생 등)을 표현하였고 이것의 합산으로써 전력부문을 모사했다는 점이다. 이러한 방법론의 차이는 발전부문의 모사 및 관련 정책의 분석에서 많은 차이점을 가져오게 된다.

먼저 기존의 CGE 모형에서는 발전기술별 투입요소를 따로 적용할 수가 없다. 그러나 하이브리드 모형의 경우에는 발전기술별 투입요소를 적용하는 것이 가능하며, 가정에 따라서 특화된 고정요소 등도 고려할 수 있다. 물론 하이브리드 모형에서의

투입요소는 합산하여 전력부문의 투입요소와 같아져야 한다는 제약조건이 있으며 이를 통해 시장청산과 영이윤의 조건을 만족시켜야 한다.

발전기술의 경우, 기존의 CGE 모형의 경우에는 원별(주로 화석연료) 대체탄력성으로 나타내는 수밖에 없었다. 그러나 하이브리드 모형의 경우에는 발전기술별 공급탄력성 및 개별적 투입요소 등 발전기술을 표현할 수 있는 수단이 좀 더 풍부해졌다.

발전기술별 설비용량의 표현도 전력부문에서는 중요한 이슈이다. 기존의 CGE 모형에서는 설비용량의 제한을 표현하기 어려웠으며 정책 분석 시 가능한 설비용량 이상으로 해당 화석연료를 사용하여 발전하는 것으로 예측되는 경우가 종종 있어서 현실과 부합되기 어려웠다. 하이브리드 모형에서는 공급탄력성과 고정요소를 사용하여 설비용량의 제한을 표현할 수 있으며, 발전기술별로 설비용량을 변화시키는데 있어서의 어려움의 정도도 쉽게 표현할 수 있다.

하이브리드 모형의 가장 중요한 장점은 전력관련 정책실험을 가능케 한다는 것이다. 서론에서도 강조하였듯이 신재생에너지 의무할당제나 원전 증설 등의 전력관련 정책은 우리나라의 녹색성장 및 중기감축목표 달성에 있어서 가장 중요한 정책수단들 중 하나이다. 기존의 CGE를 활용하는 경우 이러한 정책수단을 잘 표현하기 어려웠는데, 가장 큰 이유는 전력이 단일부문으로 표현되어 화석연료를 사용하지 않는 전원이 따로 구별되어 있지 않았기 때문이다. 하이브리드 모형에서는 전력관련 정책실험의 효과를 발전기술별로 볼 수 있다. 따라서, 신재생에너지 의무할당제, 원전 증설, 전력부문 배출권거래제 적용 등과 같은 정책에 대한 신재생에너지 및 원전을 포함한 발전기술별 생산량의 변화를 볼 수 있게 된다.

전원구성 장기계획의 적용이 가능한 것도 하이브리드 모형의 장점이다. 서론에서도 서술하였듯이, 정책이나 규제의 효과 전망은 주로 기준안 대비 주요한 거시변수의 증가분 또는 감소분으로 표시되는데, 하이브리드 모형의 경우 기준안 안에 거시변수의 변동에 부합하게 전원 구성의 변화를 포함시킬 수 있어서 좀 더 현실성 있는 정책의 파급효과를 분석할 수 있게 된다.

〈표 6〉 기존의 CGE 모형과 하이브리드 모형의 차이점

	기존의 CGE 모형	하이브리드 모형
전력부문의 생산함수 표현	단일 생산함수로 표현	발전기술에 따른 개별적 생산함수의 합산으로 표현
발전기술별 투입요소	발전기술별 투입요소 적용 불가능	발전기술별 노동, 자본, 고정요소, 화석연료, 중간재 등의 투입요소 적용 가능
발전기술의 표현	단일 생산함수의 원별 대체탄력성으로 표현	공급탄력성을 통해 발전기술 별로 가격에 대한 탄력성 표현 가능
발전기술별 설비용량 제한	발전기술별 설비용량 제한 어려움	발전기술별로 고정요소 등을 통해 적용 가능하며 상한 및 하한의 설정도 가능
전력관련 정책 실험	총 발전량 변화 및 화석연료 믹스의 변화로 반응함	기술적 제한조건을 고려한, 신재생에너지 및 원전을 포함한 발전기술별 생산량의 변화로 반응함
전원구성 계획 적용	전원구성 장기계획의 적용이 어려움	원전 증대 및 신재생에너지 촉진 등 전원구성 장기계획의 적용이 용이함

4. 시나리오 설정

정책분석 예시를 위한 시나리오는 모두 기준연도인 2007년의 경제상황을 여러 외생적 가정을 통해 확장한 2020년의 상황을 기준으로 설정되어 있다.

먼저 첫 번째 시나리오는 기준안이 되는 시나리오인 BAU 시나리오이다. 이는 외생적 전망에 맞추어 설정된 시나리오이며, GDP, 에너지가격, 부문별 에너지수요 및 온실가스 배출 전망, 전원구성 등을 적용하여 구성되었다.

다음으로 기존의 하향식 모형과 하이브리드 모형의 비교를 위하여 각각의 모형을 이용한 감축목표 달성 시 파급효과 분석치를 비교할 수 있는 시나리오들을 구성하였다.

두 번째 시나리오(ETS-CGE)는 전력부문의 상향식 모듈을 적용하지 않은 순수한 기존 CGE 모형을 사용하여 분석한 것이다. 우리나라의 중기감축목표에 맞추어 경제전체의 배출을 기준안 대비 30% 줄이는 규제에 대한 파급효과를 관찰하고자 하였으며, 경제전체가 배출권거래제 하에 있다고 가정하였다. 두 번째 시나리오에서는 순수한 하향식(CGE)모형을 이용하여 감축목표와 배출권거래제(ETS; Emission

Trading Scheme)의 파급효과를 보기 때문에 'ETS-CGE'로 표시하였다.

세 번째 시나리오는 본 연구에서 개발한 전력부문 상향식 모듈을 추가하여 구성된 하이브리드 모형을 적용한 경우이다. 따라서 이 시나리오에서는 전원구성의 변화가 가능하게 된다. 시나리오에서 적용되는 규제는 두 번째 시나리오인 ETS-CGE와 같다. 두 번째 시나리오에서는 상향식(bottom-up) 모듈을 추가한 하이브리드(Hybrid)모형을 이용하기 때문에 'ETS-HB'로 표시하였다. <표 5>의 전력구성계획에 따르면 기준연도인 2007년과 비교하여 2020년에 원자력 발전이 증가하고 석탄발전 부문이 감소하는 등의 내용이 계획에 포함된 것을 볼 수가 있는데, ETS-CGE 시나리오와 ETS-HB 시나리오를 비교함으로써 이러한 전원구성의 변화의 적용이 감축비용 분석에 어떠한 영향을 주는지를 살펴볼 수 있을 것이다.

<표 7> 시나리오 설명

시나리오	모형	내용
BAU	전망	2020년 BAU 시나리오
ETS-CGE	기존 CGE 모형	2020년 전체 배출을 BAU 대비 30% 감축; 전 업종 배출권거래제 적용 가정
ETS-HB	하이브리드 모형	
ETS-RPS-HB		

네 번째 시나리오는 신재생에너지 부문의 핵심 정책인 의무할당제의 효과를 고려하기 위해 세 번째 시나리오(ETS-HB)에 신재생에너지 부문에 의무할당제를 추가한 것이다. 이러한 분석은 하이브리드 모형에서만 가능하며 기존의 CGE에서는 어렵다. 의무할당제(RPS, Renewable Portfolio Standard) 도입에 의해 전원에서 신재생에너지가 차지하는 비율은 2020년에 8%가 된다고 가정하였다. 네 번째 시나리오는 'ETS-RPS-HB'라고 표시하는데, 이는 세 번째 시나리오에 RPS제약을 추가한 것이기 때문이다. 이 경우 전력 부문은 감축목표와 의무할당제에 의해 이중으로 규제되게 되는데 이러한 중복된 규제가 전원구성 및 산업에는 어떠한 영향을 끼치는지 살펴보았다. 시나리오에 대한 정의는 <표 7>에 다시 설명하였다. <표 8>은 연도별 신재생에너지 의무공급량 비율이다.

<표 8> 연도별 신재생에너지 의무공급량의 비율

연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022~
의무비율(%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0

배출권거래제도는 하향식 모형의 생산함수 상에서 화석연료를 투입요소로 사용할 때마다 배출계수에 비례한 만큼의 배출권을 함께 사용하도록 강제함으로써 반영시켰다. 화석연료-배출권의 복합재가 만들어지며, 이 때 생산함수를 대체탄력성이 0인 레온티에프함수를 사용하였다. 총량제한배출권은 가격과 정부에게 생산요소의 형태로 주어져 있으며 기업과 산업부분은 이를 구매(경매)하여 사용하며 배출권에 대한 수요가 일정수준을 넘어서는 경우 가격이 형성되게 된다. 한편 RPS는 신재생에너지 생산량 목표를 맞추도록 재원을 추가 투입하는 형태로 설정하였다.¹¹⁾

III. 모형개발 결과 및 정책분석 예시

본 장에서는 개발된 하이브리드 모형을 실제 정책분석에 적용되었을 때 상식에 부합하는 추정치를 보여주는지를 알아보고 이를 통하여 모형을 검증하고자 한다. 또한 하이브리드 모형의 특성을 보여주기 위하여 상향식 요소가 포함되지 않은 기존의 CGE 모형과도 그 결과치를 비교해 보았다.

1. 기존 CGE 모형과 하이브리드 모형의 분석결과 비교

다음 <표 9>은 모형 운영에 의해 분석된 시나리오별 감축 및 규제가 GDP에 미치는 영향을 보여주고 있다. 효과는 기준안 대비 GDP 변화율(%)로 표시되었다. 중기 감축목표에 의한 2020년 BAU 대비 30% 감축은 ETS-CGE 시나리오(기존 CGE 모형 적용) 하에서는 약 1% 감소, ETS-HB 시나리오(하이브리드 모형 적용) 하에서는 0.61% 감소하였다. ETS-RPS-HB 시나리오 하에서는 0.64% 감소로 나타났다. 이러

11) 이렇게 모사한 RPS는 정확하게 신재생에너지 인증서 시장을 모사한 것이라 볼 수 없다. 인증서 시장에 의한 추가적인 재화가 정의되어 있지 않기 때문이다. 하지만 정부가 신재생에너지의 가격이 아니라 양을 보조하였기 때문에 인증서 시장에 대한 세부 가정 없이 RPS를 모사한 것이라 볼 수 있다.

한 감소폭은 녹색성장위원회(2009)가 추정한 감소폭인 0.49% 보다는 큰 값이며 Lim(2011)에서 추정한 감소폭인 1.53%보다는 작은 값이다. 모형에서 사용한 다양한 가정에 따라서 GDP 감소율은 큰 차이를 보이는 것으로 나타난다.

ETS-CGE 시나리오와 ETS-HB 시나리오의 차이는 상향식 모형을 사용하여 발전 부문에서 전원구성계획을 적용한 것과 그렇지 못한 것의 차이점 때문인 것으로 보인다. 향후 원전이 증가하는 것을 고려하는 하이브리드 모형의 경우, 지금과 비슷한 발전원 비율을 유지하는 것을 가정하는 기존의 CGE모형과 비교하여 BAU 대비 GDP 추정치가 약 0.4%p 가량 덜 감소하였다. 이는 원자력 발전비율의 증가가 향후 감축비용을 감소시켜 줄 수 있음을 보여주는 상식에 부합되는 결과이다. 감축비용을 분석한 하향식 모형과 하이브리드 모형의 결과를 비교하면 하향식 모형의 경우 감축비용이 더 크게 추정되는 경향이 있다(Grubb et al., 1993; Wilson and Swisher, 1993; Koopmans and te Velde, 2001). 이러한 경향은 하향식 모형만을 사용할 경우 저비용 감축 기술과 에너지절약형 기술 도입의 잠재적 가능성을 고려할 수 없기 때문이다. 본 연구에서도 하향식 모형의 경우 저탄소 전원인 원자력 발전비율의 증가를 고려할 수 없으며 하이브리드 모형과 비교할 때 감축비용이 더 크게 추정되었다.

〈표 9〉 시나리오별 GDP에 미치는 영향 및 탄소가격

	ETS-CGE	ETS-HB	ETS-RPS-HB
GDP 변화율(%)	-1.01	-0.61	-0.64
탄소가격(USD)	101	59	56

한편 둘 다 하이브리드 모형을 사용한 ETS-HB와 ETS-RPS-HB를 비교하면 RPS를 도입하는 경우 GDP 감소율이 더 큰 것으로 나타났다. 전력부문은 이미 배출권 거래제의 규제 하에 있는데 신재생에너지 quota로 중복규제 하는 경우 경제적으로 효율적인 발전원 구성과 다른 발전원 구성이 될 수 있기 때문에 나타나는 결과로 보인다. 즉 RPS와 같은 정부규제로 신재생에너지를 경제적으로 효율적인 수준보다 더 많이 사용해야 하기 때문에 이를 통한 GDP 감소가 발생하는 것으로 보인다.

탄소가격을 살펴보면, ETS-CGE 시나리오(기존의 CGE모형 적용)에서는 톤당 탄소가격이 약 100달러에 이르렀고, ETS-HB 시나리오(하이브리드 모형 적용)의 경우

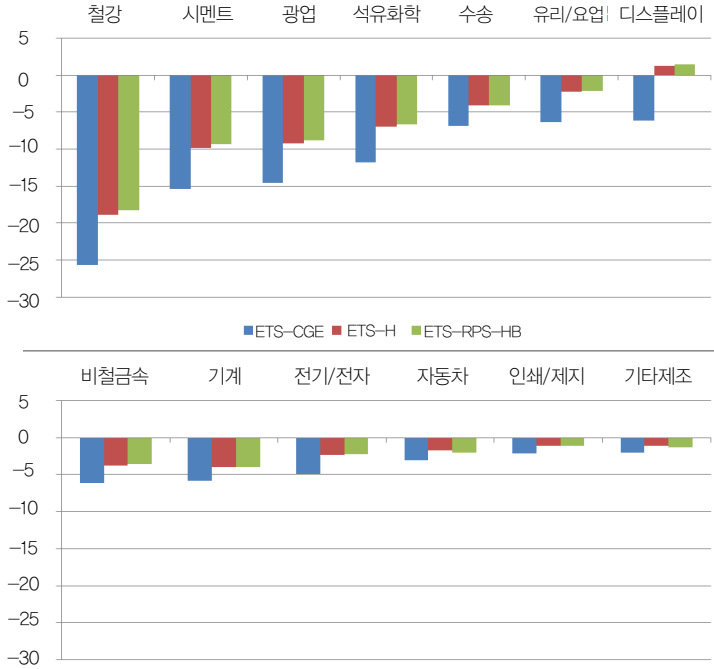
59달러로 나타났다. ETS-RPS-HB 시나리오의 경우에는 ETS-HB 시나리오의 경우보다 조금 낮은 56달러이다. 소국 개방경제를 가정한 일국모형이기 때문에 본 모형에서는 국외의 탄소배출권을 이용한 상쇄 등 다른 수단을 감안할 수 없었고 국제적 감축노력에 의한 화석연료의 수요 감소와 가격하락 등을 감안하는 것도 불가능했다. 이러한 점 때문에 탄소가격이 상당히 높은 수준으로 계산된 것으로 보인다. 따라서 탄소가격의 수준 보다는 시나리오별 탄소가격의 차이를 비교하는 것이 더 의미가 있을 수 있다.

전력부문에 대한 상향식 모듈의 적용으로 전원구성계획을 고려하는 경우(하이브리드 모형) 이를 고려하지 않는 경우(기존의 CGE 모형)에 비해 탄소가격이 상당히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 석탄발전의 감소와 원전 비율의 증가 등으로 감축에 들어가는 비용이 감소하였기 때문이다. 한편, ETS-RPS-HB 시나리오에서의 탄소가격이 ETS-HB 시나리오에서 보다 더 싼 것은 RPS의 적용으로 경제 전체적으로 감소시켜야 할 탄소량이 줄어들고 이것이 탄소가격의 하락으로 연결되기 때문인 것으로 보인다.

<그림 6>은 각각의 시나리오에 따른 배출규제가 주요 업종의 생산량 변화에 미치는 영향을 비교한 것이다. 영향을 크게 받는 업종은 철강, 시멘트, 광업, 석유화학 등으로 에너지 다소비업종들이다. 업종의 매출에 미치는 영향은 ETS-CGE 시나리오(기존의 CGE모형)를 적용할 경우 ETS-HB 시나리오(하이브리드 모형)를 적용할 경우보다 크게 추정되었다. 이는 상대적으로 낮은 탄소가격과 이에 따른 낮은 전력 가격 등의 영향인 것으로 보인다. ETS-RPS-HB 시나리오를 적용할 경우의 생산량 감소는 ETS-HB 시나리오를 적용할 경우와 비슷하다. 그럼에도 불구하고 ETS-RPS-HB 시나리오와 ETS-HB 시나리오에서 GDP 감소율의 차이가 관찰되는 것은 신재생에너지에 대한 정부보조가 큰 역할을 하는 것으로 보인다.

본 연구에서는 모형개발과 분석 프레임워크 마련에 초점을 두고 있기 때문에 간단한 정책분석 예시를 들어 분석을 시도하고 있다. 그럼에도 불구하고 기존의 CGE 모형과 하이브리드 모형 간의 배출규제에 의한 파급효과 추정치가 상당히 다른 것을 볼 수 있는데, 이는 향후 하이브리드 모형의 지속적 개발과 자료의 확충이 중요하다 하는 것을 확인시켜주고 있다.

〈그림 6〉 업종별 생산량 변화(%)



2. 전원구성의 변화

ETS-CGE 시나리오의 경우에는 전원구성이 발전기술별로 관찰되지 않기 때문에 전원구성의 변화를 관찰하는 것이 불가능하다. 본 절에서는 ETS-HB 시나리오와 ETS-RPS-HB 시나리오 등 하이브리드 모형의 비교분석에 초점을 두었다.

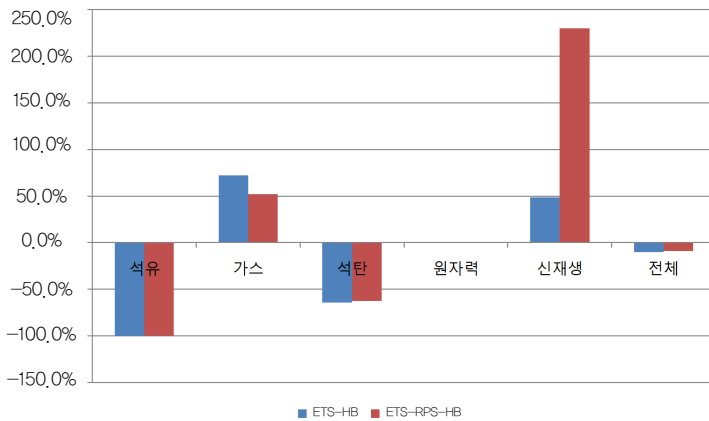
<표 10>는 시나리오별 발전원별 비율을, <그림 7>는 발전기술별로 BAU 대비 생산량 변화율을 보여주고 있다.

〈표 10〉 시나리오별 발전원별 비율

	BAU	ETS-HB	ETS-RPS-HB
석유	3.0%	0.0%	0.0%
가스	18.6%	35.6%	31.2%
석탄	33.5%	13.3%	13.8%
원자력	42.7%	47.5%	47.0%
신재생	2.2%	3.6%	8.0%

ETS-HB 시나리오나 ETS-RPS-HB 시나리오와 같이 배출규제가 있는 경우에는 석탄, 석유 등의 발전비율이 줄어들고 가스 발전의 비율이 증가한다. 중유발전은 경쟁력이 없어서 생산량이 100% 감소하여 사라지게 된다. 두 시나리오 공히 가스발전은 증가하고 석탄발전은 감소하나, ETS-RPS-HB 시나리오의 경우에 가스발전이 늘어나는 정도가 작고 석탄발전이 감소하는 정도도 작아져서 석탄과 가스만 보았을 때에는 저탄소 전원믹스로의 변화가 상대적으로 적게 관찰된다.

〈그림 7〉 발전기술별 BAU 대비 생산량 변화(%)



전원에서 원자력의 비율은 증가하고 있는데, 이는 발전량이 증가하는 것이 아니라 전체적으로 전력 사용량이 감소하지만 원자력 발전량은 변동이 없기 때문에 생기는 현상이다. 원자력 생산량의 변화가 0%인 것에서 이를 확인할 수 있다.

배출규제로 인해 ETS-HB 시나리오와 ETS-RPS-HB 시나리오 공히 신재생에너지가 장려되게 되는데, 총량을 강제하고 있는 ETS-RPS-HB 시나리오의 경우에 당연히 더 두드러지게 된다.

주목할 점은 왜 ETS-RPS-HB 시나리오의 경우와 같이 신재생에너지 의무할당제가 있는 경우 가스발전이 차지하는 비율이 ETS-HB 시나리오의 경우보다 작고 석탄발전이 차지하는 비율은 더 크냐는 것이다. 이유는 RPS로 인한 탄소가격의 하락으로 추가적인 온실가스 배출의 비용이 낮아지기 때문이다. 또 다른 측면에서 보면

RPS로 이미 온실가스 배출이 상당부분 감소할 경우 온실가스를 많이 배출하는 다른 발전기술의 생산량을 늘릴 여지가 생기게 되며, 이 때 특히 배출집약도(emission intensity)가 높은 석탄발전 같은 부문이 반사이익을 얻는 것이다. Böhringer and Rosendahl(2010)에서도 이와 같은 현상이 발생하는 것을 관찰하였는데, 이는 전력 부문이 배출권거래제와 신재생에너지 의무할당제의 이중규제 하에 있을 때 나타나는 전형적인 현상이다.¹²⁾

IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 하향식 모형을 기반으로 전력부문에 한하여 상향식 모형의 요소를 적용함으로써 전원구성 및 전원계획을 고려할 수 있는 하나의 하이브리드 모형을 개발하였다. 여기서 개발된 모형은 기존의 CGE 모형과 달리 개별적인 규모에 대한 수확체감(DRTS, Decreasing Returns to Scale) 생산함수로 각각의 발전기술(원자력, 중유, 가스, 신재생 등)을 표현하였고 이것의 합산으로써 전력부문을 모사하고 있다. 각 발전기술의 고유한 특징은 DRTS 생산함수에서의 고정요소의 크기, 화석연료 및 노동투입 등 기타 투입요소의 크기, 공급탄력성으로 나타난다. 이러한 방법론의 차이는 발전부문의 모사 및 관련 정책의 분석에서 많은 차이점을 가져오게 하고 좀 더 현실적인 분석 결과를 도출할 수 있게 한다.

예를 들어 하이브리드 모형은 기존의 CGE 모형에서는 구현하기 어려웠던 발전기술별 투입요소 및 고유한 특성, 발전원별 설비용량 제한 등을 표현할 수 있게 한다. 또한 기존의 CGE를 활용하는 경우 전력이 단일부문으로 표현되어서 화석연료를 사용하지 않는 신재생에너지 및 원전과 관련된 정책을 잘 표현할 수 없지만, 하이브리드 모형에서는 신재생에너지 및 원자력을 포함한 발전기술별로 전력관련 정책실험의 효과를 볼 수 있다. 전원구성 장기계획의 적용이 가능한 것도 하이브리드

12) 구체적인 메커니즘은 다음과 같다. RPS에 의해 신재생에너지 비율이 커지면 화석연료에 의한 발전이 줄어들게 된다(효과1). 또한 이에 따라서 온실가스 배출이 줄어들면서 배출권의 가격도 하락하게 된다(효과2). 효과1은 모든 화석연료 발전원에 동일한(symmetric) 정도의 효과를 주지만 효과2는 가장 배출집약이 큰 발전원과 산업에 인센티브를 주게 된다. 이러한 효과1과 효과2의 상호작용에 의해 석탄발전과 같은 배출집약적 부문이 반사이익을 얻게 된다.

모형의 장점이다. 정책이나 규제의 파급효과에 대한 전망은 주로 기준안과 비교해서 주요 거시변수의 증가 또는 감소로 표시되는데, 하이브리드 모형의 경우 기준안 안에 거시변수의 변화에 부합하게 전원 구성의 변화를 포함시킬 수 있다. 이에 따라 하이브리드모형으로 좀 더 현실성 있는 정책의 파급효과 분석이 가능하게 된다.

본 연구에서 개발된 모형을 중기 온실가스 감축정책의 파급효과 추정에 적용하여 기존의 CGE 모형과의 비교를 시도하였다. 그 결과 발전부문에 발전기술별 상향식 모듈을 만들어 전원구성을 고려하였을 때(하이브리드 모형) 감축비용이 기존의 CGE모형과 비교하여 더 낮게 분석되었다. 이는 상향식 모형이 추가될 경우 감축비용이 더 낮게 계산된다는 기존의 연구결과에 부합되는 것이다. 상향식 기술을 고려하게 되면 연료믹스 변화 및 생산량 감소 외의 또 다른 감축 수단이 생기게 되기 때문에 감축비용은 더 낮게 추산되게 된다. 예를 들어, 원전비율을 높이고 석탄 및 석유발전 비율을 줄이는 방향으로 전원이 구성될 경우 감축비용이 감소되는 것을 관찰할 수 있었고 이는 상식에 부합되는 결과라 할 수 있다.

추가로 전력부문이 배출권거래제와 신재생에너지 의무할당제와 같은 중복규제 하에 있는 경우의 효과에 대해서도 살펴보았다. 이러한 이슈는 발전부문이 발전기술별로 분리되어 있는 하이브리드 모형에서 분석하기 적합하다. 배출권거래제에 의한 배출규제에 의무할당제가 추가될 경우 단일 배출규제만 있을 때에 비해 전체적인 감축비용은 소폭 증가하고 석탄 발전 등 배출집약도가 높은 발전기술을 사용하는 전원의 비중은 비슷하거나 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 신재생에너지 의무할당제가 적용될 경우 탄소가격이 감소하며 이는 배출집약도가 높은 발전기술에 인센티브로 작용할 수 있기 때문이다. 전력부문이 중복규제 하에 있을 때, 화석연료 다소비산업의 매출액 감소 정도가 줄어드는 것도 관찰할 수 있는데, 이는 석탄 발전이 유지되는 결과와 비슷한 이유에 기인하며 상대적으로 낮아지는 탄소가격이 그 원인이 되는 것으로 보인다.

본 논문의 의의는 전원구성의 변화를 반영할 수 없었던 기존의 CGE모형을 개량하여 하나의 하이브리드모형을 개발한 데 있다고 볼 수 있겠다. 개발된 모형이 일부 가상적 자료 및 모수를 사용하고 있어서 실제 정책효과 분석에는 한계가 있지만, 기존의 CGE 모형으로 관찰하기 어렵던 부분들을 관찰할 수 있도록 했다는 장점이 있

다. 더구나 향후 필요한 자료만 충분히 갖추어지고 실제 발전기술에 기반을 둔 탄력성을 추정하게 된다면 본 논문에서 개발된 하이브리드 모형은 실제 정책의 파급효과를 추정하기 위한 유용한 도구로 이용될 수 있을 것이다.

[References]

1. 녹색성장위원회, 『국가 온실가스 중기(2020년) 감축목표의 설정방안』, 녹색성장위원회(2009. 11. 5), 2009.
2. 에너지경제연구원, 『2011 장기에너지전망』, 에너지경제연구원, 2011.
3. 오상봉, 『전원구성계획을 고려한 에너지·기후변화 정책분석 모형개발』, 에너지경제연구원 기본연구보고서, 2012.
4. Böhringer, C., “The Synthesis of Bottom-up and Top-down in Energy Policy Modeling,” *Energy Economics*, vol. 20(3), 1998, pp. 233-248.
5. Böhringer, C. and K. E. Rosendahl, “Green promotes the dirtiest: on the interaction between black and green quotas in energy markets,” *Journal of Regulatory Economics*, vol. 37, 2010, pp. 316-325.
6. Böhringer, C. and Rutherford, T. F., “Integrating Bottom-up into Top-down: A Mixed Complementarity Approach,” *ZEW Discussion Papers*, No. 05-28, 2005.
7. Böhringer, C., and T. F. Rutherford, “Combining Bottom-up and Top-down,” *Energy Economics*, vol. 30, 2008, pp. 574-596.
8. Böhringer, C. and T. F. Rutherford, “Integrated Assessment of Energy Policies: Decomposing Top-down and Bottom-up,” *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 33, 2009, pp. 1648-1661.
9. Böhringer, C., N. J. Rivers, T. F. Rutherford, and R. Wigle, “Green jobs and renewable electricity policies: employment impacts of Ontario's feed-in tariff,” *The B. E. Journal of Economic Analysis & Policy*, vol. 12(1), 2012. pp. 1-38.
10. EIA, *International Energy Outlook*, US Department of Energy/EIA, 2010.
11. Grubb, M., J. Edmonds, P. ten Brink, and Morrison, M., “The Cost of Limiting Fossil-fuel CO₂ Emissions: A Survey and Analysis,” *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 18, 1993, pp. 397-478.

12. Kiuila, O. and T. Rutherford, "Calibration of abatement cost function using CES technology," Working Paper, The Swiss Federal Institute of Technology, 2010.
13. Kiuila, O. and T. Rutherford, "The cost of reducing CO₂ emissions: integrating abatement technologies into economic modeling," Working Paper, University of Warsaw, 2011.
14. Koopmans, C. C. and D. W. te Velde, "Bridging the Energy Efficiency Gap: Using Bottom-up Information in a Top-down Energy Demand Model," *Energy Economics*, vol. 23, 2001, pp. 57-75.
15. Lim, J., "Impacts and implications of implementing voluntary greenhouse gas emission reduction targets in major countries and Korea," *Energy Policy*, vol. 39, 2011, pp. 5086-5095.
16. Lofgren, H., R. L. Harris, and S. Robinson, "A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS," *Microcomputer in policy research 5*, International Food Policy Research Institute, 2002.
17. McFarland, J. R., J. M. Reilly, and H. J. Herzog, "Representing Energy Technologies in Top-down Economic Models Using Bottom-up Information," *Energy Economics*, vol. 26, 2004, pp. 685-707.
18. Okagawa, A. and K. Ban, "Estimation of substitution elasticities for CGE models," Working Paper, Osaka University, 2008.
19. Rutherford, T. F., "Extension of GAMS for Complementarity Problems Arising in Applied Economic Analysis," *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 19, 1995, pp. 1299-1324.
20. Rutherford, T. F., *Lecture notes on constant elasticity functions*, University of Colorado, 2002.
21. Strachan, N. and R. Kannan, "Hybrid Modelling of Long-term Carbon Reduction Scenarios for the UK," *Energy Economics*, vol. 30, 2008, pp. 2947-2963.
22. "Climate Policy Modeling: Electric Power Technology Detail in a Social Accounting Framework," *Energy Economics*, vol. 30, 2008, pp. 547-573.
23. Wilson, D., J. Swisher, "Exploring the Gap: Top-down versus Bottom-up Analyses of the Cost of Mitigating Global Warming," *Energy Policy*, vol. 21, 1993, pp. 249-263.

부록 1. 대체탄력성 자료

〈업종별 투입요소 및 중간재 간의 대체탄력성〉

업종기호	σ_{gr}^{KL}	σ_{gr}^{KLE}	σ_{gr}^M	σ_{gr}^{KLEM}
MIN	0.14	0.55	0.31	0.73
FOO	0.38	0.40	0.00	0.33
PPP	0.38	0.21	0.00	0.19
MAC	0.30	0.29	0.46	0.13
GAS	0.14	0.55	0.31	0.73
CON	0.07	0.53	0.00	1.26
TRN	0.31	0.28	0.33	0.35
AFF	0.02	0.52	0.00	0.39
COA	0.14	0.55	0.31	0.73
CRU	0.14	0.55	0.31	0.73
NGA	0.14	0.55	0.31	0.73
CLO	0.16	0.64	0.60	0.72
CKC	0.14	0.55	0.31	0.73
NAP	0.33	0.00	0.08	0.85
FOL	0.33	0.00	0.08	0.85
CRP	0.33	0.00	0.08	0.85
CER	0.36	0.41	0.19	0.31
CEM	0.36	0.41	0.19	0.31
ORE	0.22	0.64	0.25	1.17
NFM	0.22	0.64	0.25	1.17
ECT	0.16	0.52	0.36	0.88
DIS	0.16	0.52	0.36	0.88
SCT	0.16	0.52	0.36	0.88
AUT	0.05	0.53	0.31	0.41
SHB	0.05	0.53	0.31	0.41
OMA	0.05	0.53	0.31	0.41
ELE	0.46	0.26	0.39	0.00
SER	0.26	0.32	0.00	0.49

자료: Okagawa and Ban(2008)

〈기타 주요 대체탄력성〉

$$\sigma_{gr}^{ELE} = 0.5 ; \sigma_{gr}^{OGC} = 0.5 ; \sigma_{gr}^{OG} = 0.5 ; \sigma_{ir}^A = 4 ; \sigma_{ir}^{IM} = 8$$

부록 2. 에너지수요전망 및 온실가스배출전망

〈에너지수요전망(2007=100)〉

	2007	2015	2020	2025	2030
COA	100	150	170	171	170
CKC	100	156	171	176	179
FOL	100	95	99	99	102
NAP	100	119	129	132	135
GAS	100	128	134	156	183
ELE	100	143	166	184	199

〈온실가스배출전망(2007=100)〉

	2007	2015	2020	2025	2030
COA	100	149	169	170	170
CKC	100	156	171	176	179
FOL	100	94	98	98	101
NAP	100	120	131	134	137
GAS	100	129	135	157	185
ELE	100	145	162	167	176

부록 3. 하향식 모형 구조식

다음은 본 모형에서 사용된 CGE 모형의 기본수식들이다.

1. 산업별 생산

CES 함수는 동일한 형식을 취하기 때문에 표기의 단순화를 위해 모수(Parameter)를 다음과 같이 공통적으로 표기한다.

α_i : 각 CES 함수에서 투입요소간 또는 재화간의 비중(share) 계수

ρ_i : 각 CES 함수에서 투입요소간 또는 재화간의 대체계수

$\sigma_i = \frac{1}{1-\rho_i}$: 각 CES 함수에서의 대체탄력성

i : 개별 산업을 표기

화석연료를 제외한 산업별 생산은 본원적 생산요소에 따른 생산단계와 에너지복합단계의 두 단계를 통해 모형화된다.¹³⁾

산업별 재화에 대해, i 산업에서 생산되는 재화(Y_i)는 노동·자본·에너지복합재(KLE_i)와 아밍톤 중간재(XD_i)를 사용하며 CES(constant elasticity of substitution) 생산함수로 정의된다.

$$Y_i = \left[\alpha_i KLE_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) XA_i^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (1)$$

노동·자본·에너지복합재(KLE_i)는 노동·자본복합재(KL_i)와 에너지복합재(E_i)의 CES 함수로 정의된다.

$$KLE_i = \left[\alpha_i KL_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) E_i^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (2)$$

노동·자본복합재(KL_i)는 노동(K_i)과 자본(L_i)의 CES 함수로 구성되며, 통상적인 부가가치 생산함수를 나타낸다.

$$KL_i = \left[\alpha_i K_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) L_i^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (3)$$

생산된 산업별 최종재는 불변전환탄력성(CET: Constant Elasticity of Transformation)

13) 화석연료의 생산함수는 노동, 자본, 중간재로 이루어지는 레온티에프 생산함수와 연료자원을 포괄하는 CES 생산함수로 간단한 구조로 되어 있기 때문에 별도의 수식은 생략하였다.

전환함수에 따라 수출재(XE_i)와 국내소비재(XD_i)로 전환된다.

$$\left[\alpha_i XE_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) XD_i^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} = Y_i \quad (4)$$

아밍톤 복합재화는 국내소비재화(XD_i)와 수입재화(XM_i)간의 CES 함수를 통해 복합된다. 이는 국내소비재화와 수입재화가 불완전대체 관계로 복합됨을 의미한다.

$$XA_i = \left[\alpha_i XM_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) XD_i^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (5)$$

또한, 아밍톤 복합재화는 산업의 중간재화(XA_i), 가계의 소비재화($XA_{c,i}$)로 배분된다.

$$XA_i = XA_i + XA_{c,i} \quad (6)$$

2. 에너지복합 부분

식 (2) 에 들어가는 에너지복합재(E_i)는 다음의 단계를 거쳐 CES 함수로 복합된다. 에너지복합재(E_i)는 비전력에너지복합재(NEL_i)와 전력(EL_i)의 CES 함수로 복합된다.

$$E_i = \left[\alpha_i NEL_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) EL_i^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (7)$$

비전력에너지복합재(NEL_i)는 석유·가스복합재(OG_i)와 석탄($FE_{coal,i}$)의 함수로 정의된다. 석탄은 일반석탄과 코크스로 나뉘어진다.

$$NEL_i = \left[\alpha_i OG_i^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) FE_{coal,i}^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (8)$$

석유·가스복합재(OG_i)는 석유($FE_{oil,i}$), 납사($FE_{naphtha,i}$), 가스($FE_{gas,i}$)의 CES 함수로 정의된다.

$$OG_i = \left[\alpha_i FE_{oil,i}^{\rho_i} + \beta_i FE_{naphtha,i}^{\rho_i} + \gamma_i FE_{gas,i}^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}}, \quad \alpha_i + \beta_i + \gamma_i = 1 \quad (9)$$

석탄($FE_{coal,i}$)은 일반석탄($FE_{coal1,i}$)과 코크스($FE_{ckcl,i}$)의 CES 복합재로 정의된다.

$$FE_{coal,i} = \left[\alpha_i FE_{coal1,i}^{\rho_i} + (1 - \alpha_i) FE_{cks,i}^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (10)$$

이산화탄소는 연료별 소비량에 따라 각각 상이한 배출계수를 통해 발생한다. 이산화탄소는 일반석탄, 코크스, 석유, 납사, 가스에서 발생하며 이는 레온티에프 함수로 결합된다. 작은첨자 fe 는 일반석탄, 코크스, 석유, 납사, 가스를 의미한다.

$$FE_{fe,i} = \min \left[\alpha XA_{fe,i}, (1 - \alpha) CO2_{fe,i} \right] \quad (11)$$

3. 기타 부문

소비자가 소비하는 C_i 는 소비복합재화로서 다음과 같이 에너지($E_{c,i}$)와 비에너지의 재화($XA_{c,i}$)로 복합된다.

$$C_i = \left[\alpha_i XA_{c,i}^{\rho_i} + (1 - \alpha) E_{c,i}^{\rho_i} \right]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (12)$$

본 모형에서 정부부문과 투자부문은 명시적으로 모형화하지 않았다. 산업연관표의 간접세와 수입재화에 부과된 관세는 가계부문에서 흡수하는 것으로 모형화하였다. 추후 세제분석을 위해서는 정부부문을 별도로 모형화하는 것이 필요하다.

본 모형은 소국개방경제를 상정하고 있다. 수입재화의 가격은 외생적으로 주어진다.

것으로 간주한다. 그러나 무역수지불균형은 환율변동에 의해 조정된다고 가정하였다.

$$\sum_i P_{xe,i} XE_i - \sum_i P_{xm,i} XM_i + P_{ex} B_0 = 0 \quad (13)$$

$P_{xe,i}$ 는 i 재화의 세후수출가격을 나타내며, $P_{xm,i}$ 는 i 재화의 세후수입가격을 나타낸다. P_{ex} 는 환율을 의미하며, B_0 는 기준연도의 무역수지 불균형을 의미한다. 따라서 환율이 변동하여 무역수지가 균형을 이루도록 모형화되었다.

4. 일반균형 모형의 형성(formulation)

위에서 설정한 생산함수들에 기반을 두어 경제전체의 기준연도를 모사하는 일반균형 모형을 형성하게 된다. 실제 모델링 작업은 본문에서 설명한 바 있는 MPSGE 프로그래밍 언어를 사용하여 진행하였다. MPSGE에서의 일반균형 모형의 형성 과정은 다음과 같다.

먼저 위와 같은 생산함수 들이 재화와 생산요소를 다른 재화로 전환하는 활동(activity)을 정의한다. 이러한 활동은 보통 생산함수의 dual인 비용함수로 표시되며 이 때 균형조건은 각 활동에서의 한계 비용이 투입요소 및 재화의 가격보다 크거나 같은 것이다. 이러한 조건은 영이윤 조건(zero-profit condition)이라고 불린다. 또한, 재화(생산요소, 재화 등을 포함)들은 시장청산 조건(market clearing condition)에 의해서 공급이 수요보다 크거나 같게 된다. 마지막으로 소득균형(income balance) 조건은 모형의 주체(소비자, 정부 등)들의 지출이 소득과 같아야 하는 조건이다. 이러한 조건을 수식으로 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{영이윤 조건: } & MC_p \geq P_p \\ \text{시장청산 조건: } & S_q \geq D_q \\ \text{소득균형 조건: } & \text{Exp}_r \geq \text{income}_r \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 MC 는 한계비용, P 는 가격, Exp 및 income 은 각각 지출과 소득을 뜻하며

아래첨자 p, q, r 은 각각 알려지지 않은 activity level, 재화가격, 그리고 경제주체의 지출 및 소득 수를 뜻한다. 일반균형 모형은 $p+q+r$ 개의 무리수에 대한 동수의 부등식을 푸는 것이며 이에 따라서 균형상태에서 재화의 상대가격 및 생산/수요량 등이 정해지게 된다.

모든 배출권, 노동과 자본, 중간재 및 최종재 및 소비자 부문(본 모형에서는 소비자와 정부가 합쳐져 있음)의 방정식도 위의 조건을 기반으로 하여 동시에 풀어지게 된다. 일반적인 CGE 모형에 대한 방정식은 Lofgren et al. (2002) 등에 매우 자세히 설명되어 있다.