

탄소세 부과에 따른 국내 에너지-경제-환경(3E) 변화 분석 및 예측을 위한 시스템다이내믹스 모델 개발*

System Dynamics Model for Analyzing and Forecasting the National Energy-Economy-Environment(3E) Changes under Levying of Carbon Tax

송재호** · 정석재*** · 김경섭**** · 박진원*****

Song Jae Ho** · Jeong Suk Jae*** · Kim Kyung Sup**** · Park Jin Won*****

Abstract

In this paper, an energy-economy-environment dynamic simulation model was developed to using system dynamics methodology. It describes current energy-economy-environment systems and forecasts changes caused by levying of carbon tax. The model is composed of three modules: an energy module, an economic module and an environmental module. Variables are interrelated in each module, and three modules are linked by several linkage variables. Setting up the linkage variables is an important factor for the composition of the model. The simulation result shows a change of the national GDP, usage of energy, and CO₂ emissions under levying and reinvestment of carbon tax considering various scenarios for the charging cost.

Keywords: 탄소세, 기후변화, 시스템 다이내믹스, 에너지-경제-환경 모델
Carbon tax, Climate change, System dynamics,
Energy-Economy-Environment(3E) model

* 본 연구는 환경부 주관 『기후변화협약에 따른 사회·경제적 영향평가』 과제에 의해 지원되었음.

** 연세대학교 정보산업공학과 석사과정(marl7@yonsei.ac.kr)

*** 연세대학교 정보산업공학과 박사과정(jae7811@yonsei.ac.kr)

**** 연세대학교 정보산업공학과 교수(kyungkim@yonsei.ac.kr)

***** 연세대학교 화학공학과 교수(jwpark@yonsei.ac.kr)

I. 서론

외환부족으로 야기된 우리 경제의 위기는 전반적인 국가 경제의 구조조정을 필요로 하고 있다. 환경문제가 점차 전 지구적인 문제로 대두되면서 구조조정의 방향은 과거의 성장 제일주의식 개발논리만으로 국민정서나 세계추세에 상충되지 않는 것이 현 상황이다. 따라서 환경보전과 경제발전을 동시에 추구하는 정책 방향의 정립이 요구되고 있다. 대내적으로는 경제구조조정의 필요성이 대두되고 있으며, 대외적으로는 에너지의 무분별한 소비로 인해 야기되는 지구 온난화를 막기 위한 기후변화협약 이행 등에 따른 자원, 에너지 절약을 위한 산업구조로의 전환이 제기되고 있다.

화석연료 과다소비에 의한 온실가스 배출량의 증가는 심각한 환경오염을 초래하고 있으며, 환경오염의 심화는 경제활동의 위축의 요인이 되므로, 환경정책의 방향도 산업 활동과 환경보전을 상호 조율할 수 있는 방향으로 나가야 하는 것은 자명한 사실이다. 즉 정책수립과 시행 시 경제적 수단과 환경 보전 측면을 동시에 고려하고, 기존의 환경과 경제의 상관관계 및 이에 따른 환경정책의 효과를 보여줄 수 있는 지표나 통계를 활용하여 환경정책을 수립하는 것이 필요하다. 이에 발맞추어 환경문제에 대한 논의가 범정부적 차원으로 확대되고 있다.

이러한 요구에 발맞추어 경제와 환경을 별개로 취급하던 그 동안의 접근방법에서 탈피하고 경제와 환경을 하나의 통합체로 취급하는 분석방법이 요구되고 있으며, 환경 정책의 영향을 사안에 따라 부분적으로 접근하는 방식에서 벗어나 국가전체에 미치는 영향을 종합적으로 고려하는 접근방식으로 환경문제를 다루는 기본시각도 바뀌어 가고 있다.

이는 환경정책을 국가 전체의 거시경제변수 및 에너지 관련변수와 연결 지어 분석할 수 있는 에너지-경제-환경 통합 모형과 이에 대한 운용체계 프로그램의 구축이 시급함을 의미한다.

이에 본 연구는 국가경제 전반을 부문별로 분류하여 어느 한 부문의 정책 및 상황변화가 다른 부문에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 수 있는 동태적 에너지-경제-환경 모형을 도출하여 각 경제주체의 온실가스 감축을 위한 활동이 산업 구조 및 활동 그리고 국가 거시 경제 변수에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 이에 근거한 환경 정책 대안을 제시할 수 있는 시스템 다이내믹스 기반의 시뮬레이션 모형을 구축하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서는 에너지-경제-환경의 상호작용을 분석한 기존 연구들을 살펴보고 3절에서는 본 연구의 주요 인과지도를 작성한다. 4절에서는 인과지도를 기반으로 에너지, 경제, 환경 각각의 세부모듈을 구축하고 5절에서는 모델에 대한 다양한 시나리오 작성 및 실험에 대한 결과를 도출한다. 그리고 6절과 7절에서 결론 및 모델

의 개선사항에 대하여 알아보도록 한다.

II. 기존 연구

지난 수십 년 간 에너지, 경제 및 환경부문간의 상호연관성을 모델화하기 위한 다양한 시뮬레이션 방법론이 개발, 이용되어 오고 있다. 이러한 모델 개발은 에너지공급 및 환경보호를 도모할 수 있는 정책수단 개발이라는 정책적 필요에 의해서 이루어져 왔다. 주요 방법론으로는 투입-산출(I-O) 모델, 계량경제 모델(Econometric Model), 선형계획(Linear Programming) 모델 및 이들을 약점을 보완한 혼합(hybrid) 모델과 연산가능일반균형(Computable General Equilibrium: CGE) 모델 등이 있다.

Hannon(1973)은 I-O모델을 통해 에너지 단위를 금액 기준으로 환산하여 경제적 상호 연관성을 분석하였다. 그는 에너지의 화폐적 가치는 보조금, 부정확한 가격결정 방법 및 정책, 인플레이션에 의해 발생하는 소비자의 혼란 때문에 항상 사회에 대한 실제 가치를 나타내지 않을 수도 있다고 주장하였다.

Leontief(1970)는 주요 오염물질 배출 및 배출감축 활동에 초점을 맞춘 미국 및 세계 경제 모델을 개발하였다. 이 모델들은 산업 활동에 따라 발생하는 오염물질 배출을 규제하기 위한 정부 정책을 평가하는 것뿐만 아니라 오염 저감기술의 가격효과를 추정하는데 사용되었다.

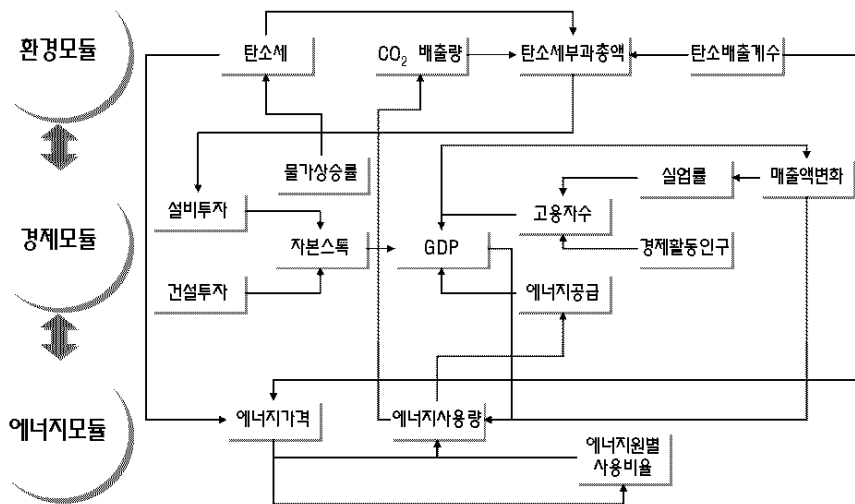
Isard(1972)는 경제 및 환경이 결합된 I-O 모델을 개발하여 이를 환경시스템에 적용하였다. 하지만, 경제시스템에 비하여 환경시스템에 대한 상세한 데이터를 수집하는 데에 따르는 어려움 때문에 I-O 접근방식을 통하여 경제부문과 환경부문 간의 상호연관성을 모델화하는 데 한계점을 보였다.

Manne and Wene(1992)은 선형계획 모델(MARKAL)과 비선형 거시경제 모델(MACRO)을 결합한 MARKAL-MACRO 모델을 개발하였다. 이 모델의 주요 목적은 선형인 MARKAL 모델과 단순화된 거시경제 모델을 연계함으로써 보다 장기적인 기간에 대해 분석할 수 있는 모델을 제공하여 수요, 가격 및 자원 대체 간의 상호 연관성을 고려하기 위한 것이다. MARKAL 모델은 국제에너지기구(IEA)의 에너지기술시스템 분석 프로그램(Energy Technology Systems Analysis Program)에 의해서 1976년에 처음 개발된 이후 널리 사용되고 있으며, IEA-MARKAL, MARKAL-MACRO 모델과 같은 여러 파생 모델들이 개발되어왔다. 국내의 연구로는 강윤영(1999)이 다 산업부문 동태적 일반균형 모형을 이용하여 2010년까지 이산화탄소 배출수준을 1990년 수준, 1995년 수준 그리고 2000년 수준으로 안정화시킬

때의 적정 탄소세율 수준을 계산하였으며, 강승진(1999)의 연구에서는 CGE 모형 개발을 통한 이산화탄소 배출감축목표 부과시의 파급효과를 분석하였다. 임재규(2001)는 온실가스 감축을 위한 국내 정책 포트폴리오 도입의 경제적 파급효과를 분석하기 위하여 개발한 연산일반균형 모형을 이용하여 탄소세 도입의 효과를 분석하였다. 한편 본 연구와 가장 부합되는 연구이기도 한 부경진(2002)은 에너지·환경·경제 통합부문을 연립방정식 형태로 연계한 장기 계량경제 모형을 개발하여 탄소세 도입정책이 경제, 에너지 및 환경지표에 미치는 효과분석을 수행하였다.

Ⅲ. 주요 인과지도

본 연구에서는 에너지-경제-환경 모듈 내의 변수들의 관계식을 토대로 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 모형을 개발하여 에너지·환경·경제시스템간의 상호작용을 파악하고, 정책 수단을 평가하고자 한다.



[그림 1] 시뮬레이션 모형의 주요 인과지도

<그림 1>은 본 연구에서 개발된 시뮬레이션 모형의 주요 인과지도로 모형의 주요 변수들 간의 서로 어떻게 영향을 주고받는지 보여주고 있다.

전체 모형은 크게 에너지모듈, 경제모듈, 환경모듈로 구성된다. 각 모듈은 부문 별 세부모

들로 구분되고, 각 모듈은 시스템 내에서 상호 영향을 주고받으면서 피드백 구조를 형성하게 된다.

에너지모듈에서는 에너지가격과 GDP에 의해 에너지소비량과 에너지원 별 사용량의 변화를 추정한다. 탄소세가 부과되면 에너지원 별 탄소배출계수¹⁾에 의해 에너지가격이 변동하고 그에 따라 에너지원 별 사용량이 변하게 된다. 또한 에너지 소비량은 산업부문의 생산량과 수송수단의 등록대수 그리고 가정, 상업 및 공공부문의 에너지 소비량에 의하여 산출된다.

경제모듈에서는 GDP를 주요 변수들, 즉 내생변수인 자본스톡 및 고용자수, 그리고 외생변수인 에너지사용량을 통하여 산출하고, 구해진 GDP와 에너지가격에 의해 산업부문의 생산량과 수송수단 등록대수 등이 변동하게 된다. 또한 부과된 탄소세가 다시 설비투자로 활용됨으로써 탄소세에 의해 GDP가 간접적으로 영향을 받게 된다.

환경모듈은 에너지모듈에서 구해진 각 부문별 에너지사용량에 의해 발생하는 이산화탄소 배출량을 산출하며 그 배출량에 따른 탄소세 부과액을 도출해 낸다.

IV. 부문별 세부 모듈

본 연구에서 개발된 모델은 우선적으로 국민계정의 생산 측면을 모델화하고, 기본적인 상호의존성을 고려하기 위하여 기본 경제이론을 사용한다. 두 개의 주요 경제부문, 산업 및 상업, 가정, 공공부문과 추가적으로 수송 및 전환부문을 포함한 총 4개의 부문을 본 연구의 분석 범위에 포함한다.

- 부문1: 산업(제조업, 건설업)
- 부문2: 가정·상업·공공(도소매업, 서비스업, 통신업)
- 부문3: 수송부문 (공로, 철도, 항공 및 수로)
- 부문4: 전환부문 (발전)

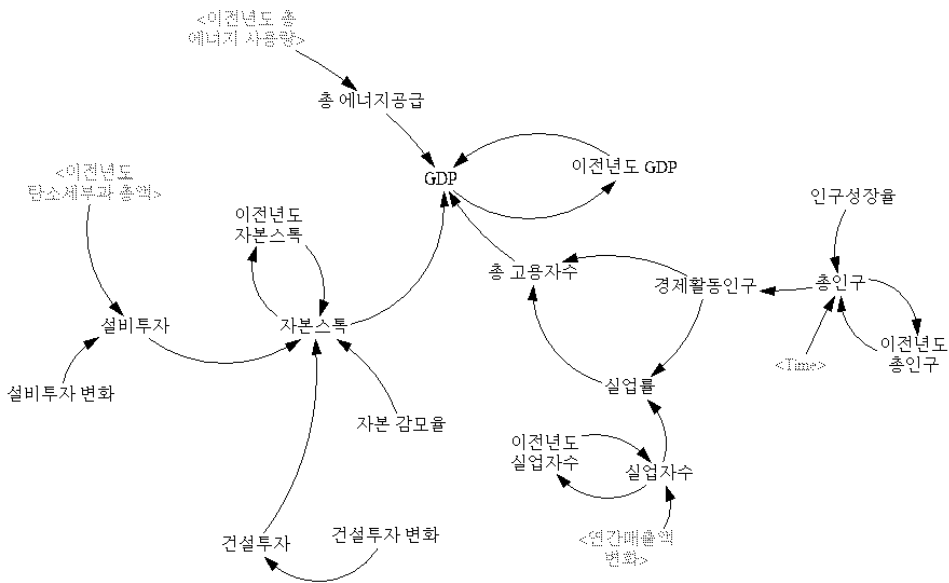
1) 탄소배출계수(Carbon Emission Factor: CEF)는 에너지원 별 단위(toe 또는 GJ) 당 발생하는 탄소의 양을 의미한다. 각 나라 및 산업별로 배출계수의 차이가 있지만, 본 연구에서는 IPCC에서 정한 탄소배출계수를 사용한다.

1. 경제 모듈

<그림 2>는 경제 모듈을 나타낸다. 경제활동과 에너지소비의 관계를 설정하기 위하여 시간을 고려한 불변대체탄력성(Constant Elasticity of Substitution: CES) 생산함수를 이용하였다.²⁾ GDP의 경우 자본, 노동, 에너지 세 가지 생산요소로 설명할 수 있으며, CES 생산함수는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$Y(GDP) = AK_t^\alpha L_t^\beta E_t^\gamma$$

위 식에서 K_t 는 자본스톡, L_t 는 총 고용자수, E_t 는 총 에너지공급, A 는 상수항을 나타낸다.



[그림 2] 경제 모듈

본 연구의 주요 관심사는 에너지와 경제부문 간의 상호연관성을 식별하는 것이기 때문에 CES 함수는 경제활동과 에너지소비 간의 관계를 규정하는 핵심적인 연결고리이다. 이러한 함수를 통하여 에너지공급 또는 에너지가격 상승이 GDP에 미치는 영향을 추정할 수 있다.

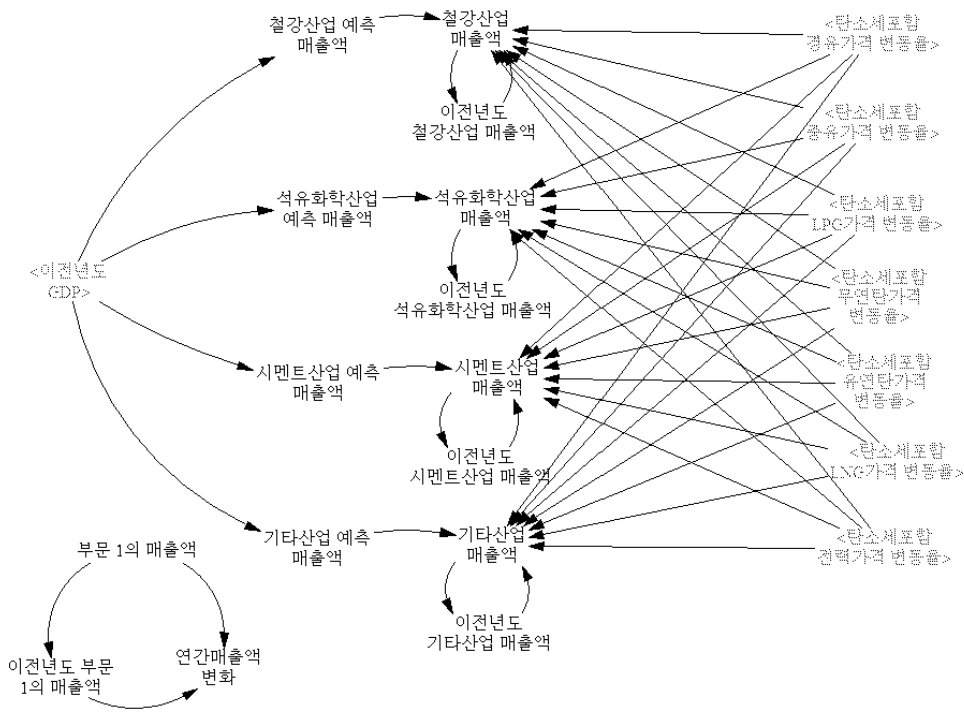
2) 에너지를 하나의 주요한 투입요소로 간주하고 콥-더글러스(Cobb-Douglas) 생산함수의 변형으로서 아래와 같은 생산함수를 이용할 수 있다.

$$Y = bK^\alpha L^\beta E^\gamma$$

여기서 K 는 자본, L 은 노동 그리고 E 는 에너지공급을 의미한다. 이러한 수정된 콥-더글러스 함수는 종종 CES 함수로 불리며, 연료 대체 분석에 있어서 초월함수(translog) 형태로써 광범위하게 사용되어 왔다 (William A. Donnely, The Econometrics of Energy Demand, A Survey of Applications. Praeger, 1987: 177-182).

또한 <그림 2>와 같이 GDP에 영향을 주는 자본스톡은 건설투자와 설비투자로 결정이 되는데 설비투자에 탄소세 부과액이 부가되도록 모델에 반영하였다. 고용자수를 결정하는 변수 중 하나인 실업률은 부문 1과 부문 2의 매출액 변화에 따라 변동되도록 하였다.

<그림 3>은 산업부문의 경제모듈을 나타낸다. 산업부문에서 사용되는 에너지원은 경유, 중유, LPG, LNG, 무연탄, 유연탄, 전력을 고려하였으며, 각 산업별 매출액은 탄소세가 포함된 각 에너지원 가격의 변동율과 GDP에 의해 결정되도록 하였다. 본 연구에서 고려한 산업 부문은 철강산업, 석유화학산업, 시멘트산업과 기타산업 등이다. 이는 철강, 석유화학, 시멘트산업에서 차지하는 에너지 소비 및 이산화탄소 배출량이 국내 산업 전체의 80% 정도를 차지하고 있기 때문이다.³⁾



[그림 3] 산업부문 경제모듈

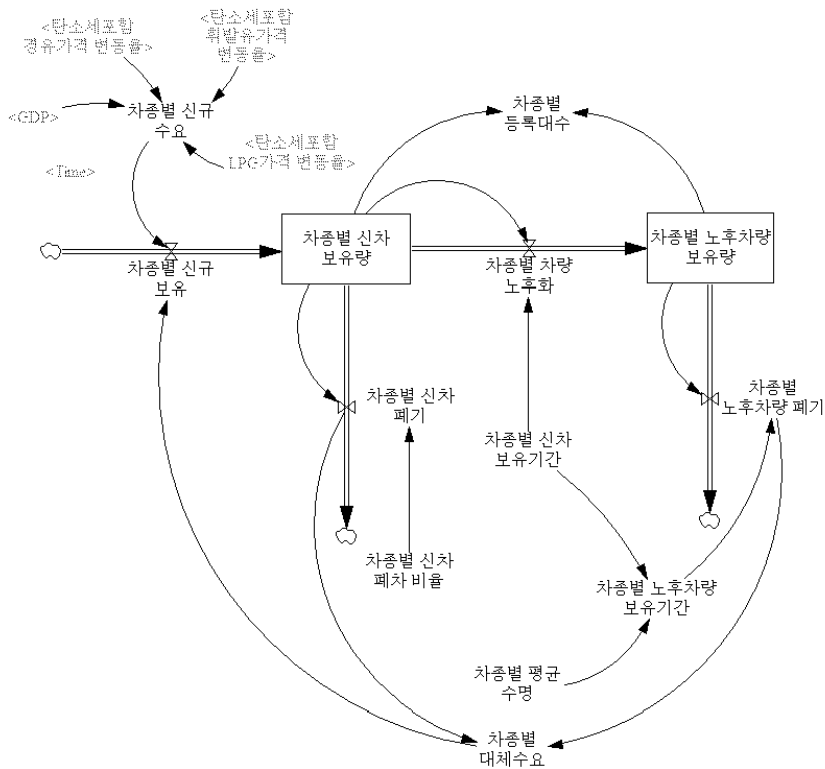
각 산업의 매출액은 전기(前期) GDP에 의해 예측되어지며, 그 예측 매출액과 전기(前期)의

3) 2000년 기준 이산화탄소 배출량은 철강산업 40.2%, 석유화학산업 22.9%, 시멘트산업 12.6%이고 에너지 소비량은 철강 22.8%, 석유화학 48.1%, 시멘트 7.4%를 차지한다. (에너지경제연구원, 2000)

매출액, 그리고 에너지원의 가격변동률에 의해 각 산업의 매출액이 결정된다.

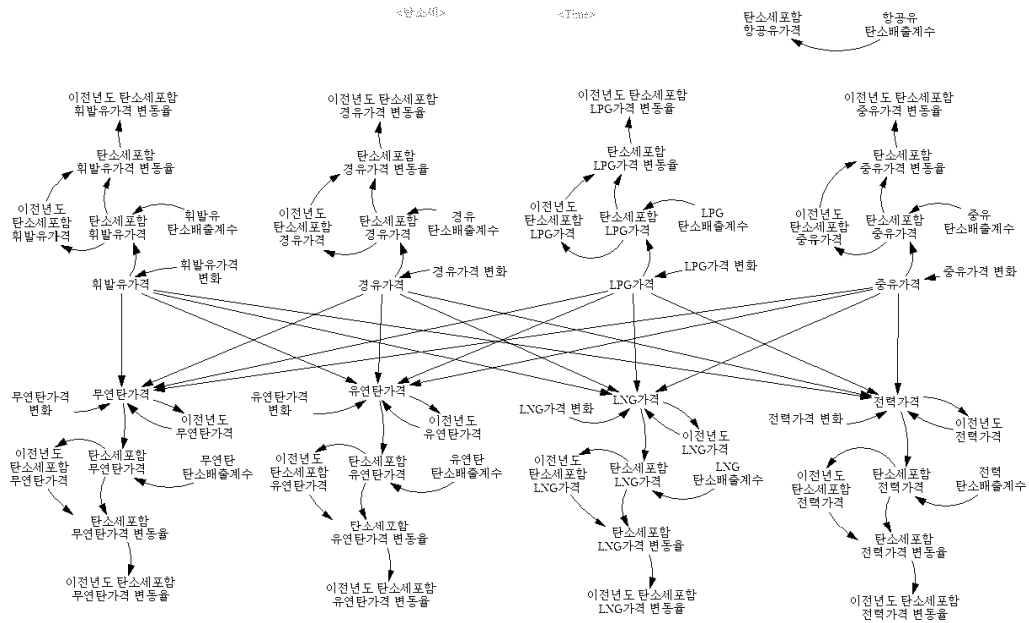
<그림 4>는 수송부문 중 도로(자동차)교통 수단에 대한 경제모듈이다. 자동차에 의한 에너지소비와 이산화탄소의 배출량이 전체 수송부문의 80% 이상을 차지하므로 자동차 부문에 대한 모듈은 에너지원 별 자동차로 세분화하여 경제, 에너지 모듈을 구성하였으며 나머지 수송수단에 대해서는 일반적인 추세에 따라 등록대수가 변하도록 하였다.

모형을 살펴보면 자동차 등록대수는 신차와 노후차량의 합으로 구해지며, 각 차량의 폐기 비율에 의해 폐차 대수가 정해진다. 폐기된 자동차의 소유주들은 다시 신규 자동차를 구입하도록 모형을 구축하였다. 또한 신차는 일정기간이 지나면서 노후차량으로 변하며, 자동차 신규수요는 에너지원 가격변동률과 GDP의 영향을 받아 에너지원 별 자동차의 신규수요가 변동되도록 한다.



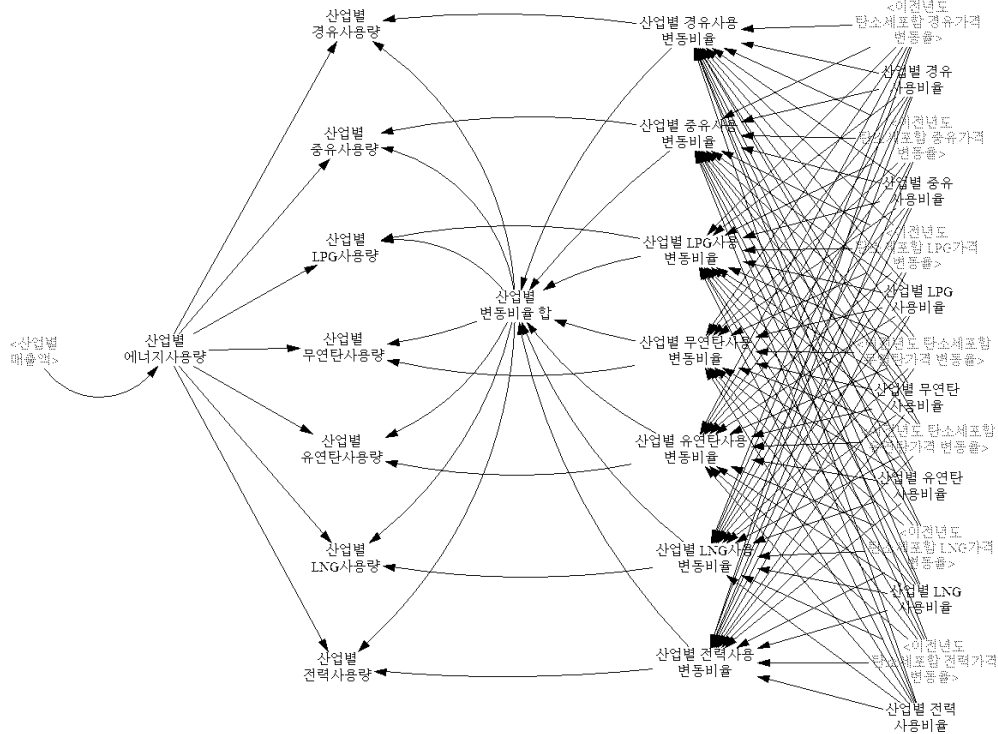
[그림 4] 수송부문 경제모듈

2. 에너지 부문



[그림 5] 에너지가격 모듈

에너지가격에 대한 모듈은 <그림 5>와 같이 표현된다. 석유류(항공유 제외) 에너지원의 가격은 탄소세와 이전년도 에너지가격에 영향을 받아 변동된다. 실제 현실에서는 에너지원의 가격에 탄소세가 직접 부과되기 보다는 이산화탄소 배출량에 따라 부과될 것이다. 하지만 본 연구에서는 탄소세로 인한 에너지 수요의 위축을 모델에 고려하기 위하여 이산화탄소 배출량에 따른 탄소세와 동시에 에너지가격에도 탄소세가 영향을 준다고 가정한다. 그리고 비석유류 에너지원들은 에너지 가격 상승에 따른 에너지원 사이의 대체효과를 반영하도록 한다. 따라서 비석유류 에너지원 가격은 이전년도 에너지가격과 탄소세 및 석유류 에너지원의 대체효과를 고려한다. 한편, 석유류와 타 에너지원과의 대체효과만 고려할 뿐, 다른 에너지원들끼리는 대체효과가 없다고 가정한다.

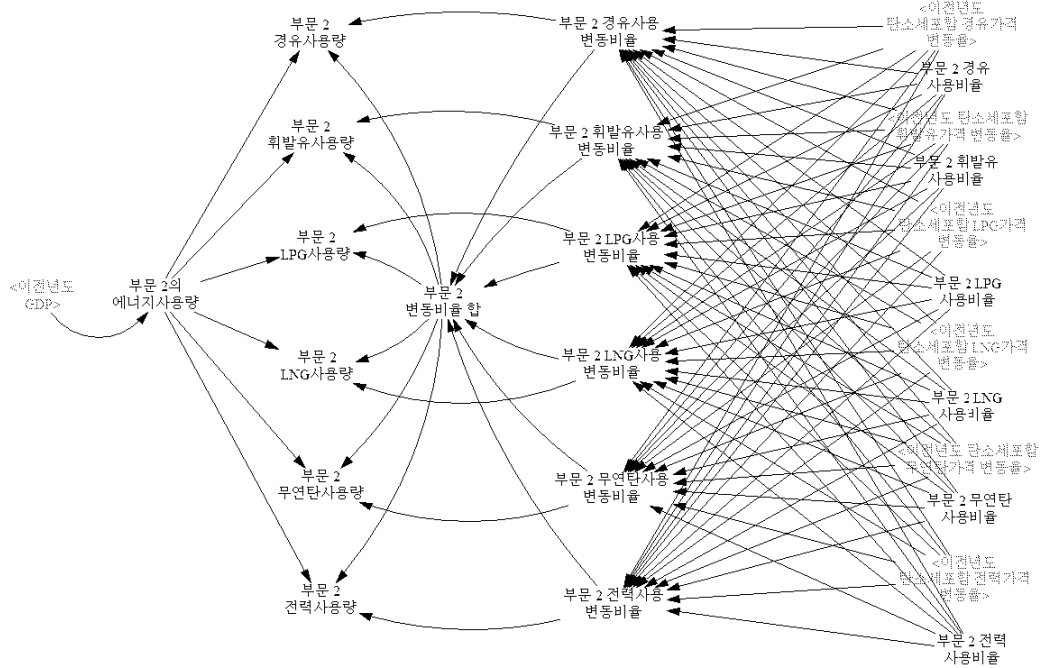


[그림 6] 산업부문 에너지모듈

산업부문 에너지모듈은 <그림 6>과 같다.

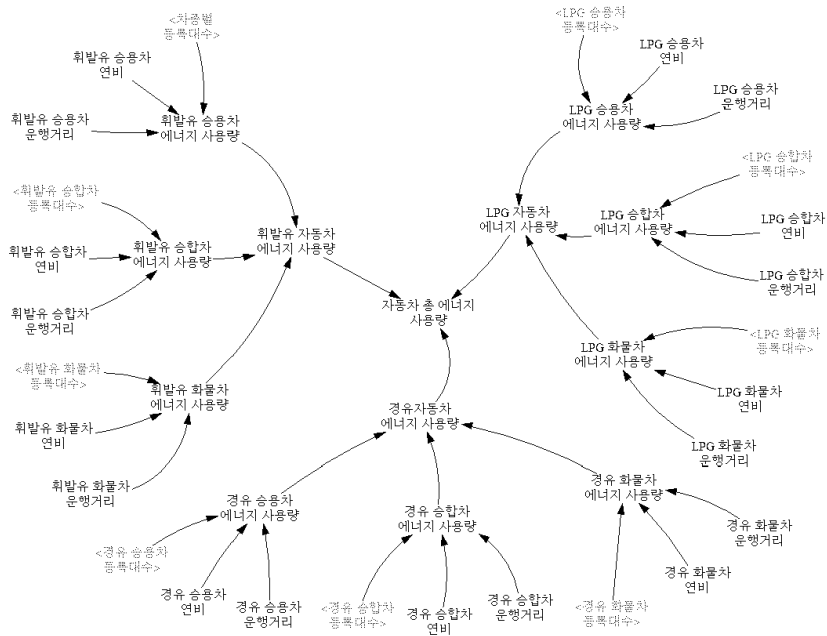
경제모듈에서 구해진 산업별 매출액에 따라 각 산업의 에너지사용량이 구해진다. 에너지사용량은 각 에너지원 사용비율에 따라 에너지원별 사용량으로 나누어진다. 각 에너지원의 사용비율은 초기 사용비율에 탄소세가 포함된 에너지가격의 변동률에 영향을 받아 에너지가격의 증감률에 따라 변동되도록 설계되었다.

<그림 7>은 가정·공공·상업부문의 에너지모듈이다. 산업부문 에너지모듈과 마찬가지로 GDP에 영향을 받은 에너지사용량이 부문 2에서 사용되는 에너지원인 경유, 휘발유, LPG, LNG, 천연가스, 전력의 사용비율에 따라 에너지원별 사용량으로 나누어진다. 마찬가지로 에너지원별 사용비율은 초기 사용비율에 에너지가격의 변동률에 따라 변동된다.



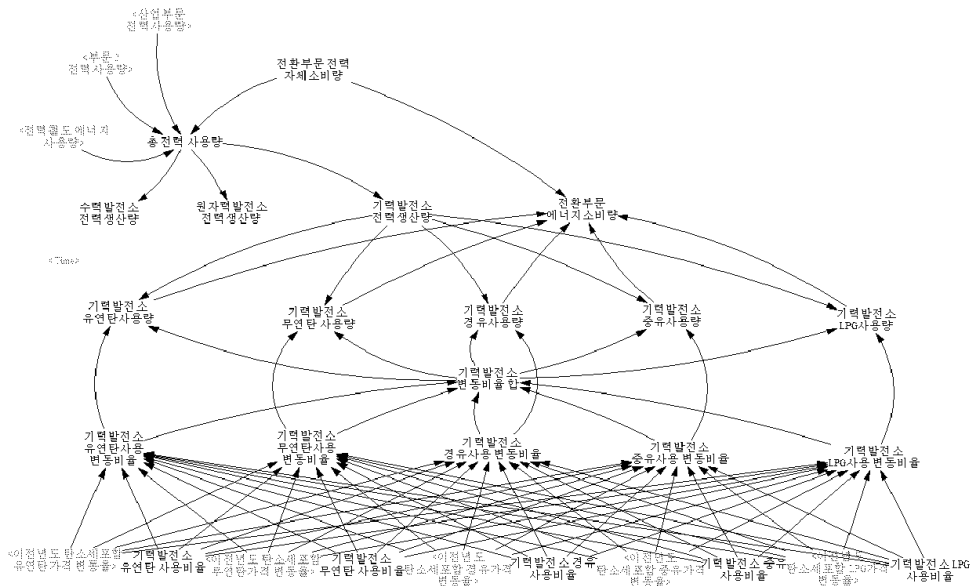
[그림 7] 가정 · 공공 · 상업부문 에너지모듈

수송부문의 에너지모듈은 <그림 8>과 같이 표현된다. 차량의 연료별 에너지 사용량은 차량의 연비와 등록대수 그리고 운행거리에 의해 구해지는데, 예를 들어, 연간 휘발유 승용차의 사용량은 『휘발유 승용차 등록 대수 × (휘발유 승용차 운행거리 / 휘발유 승용차의 연비)』로 계산된다.



[그림 8] 수송부문 에너지모듈

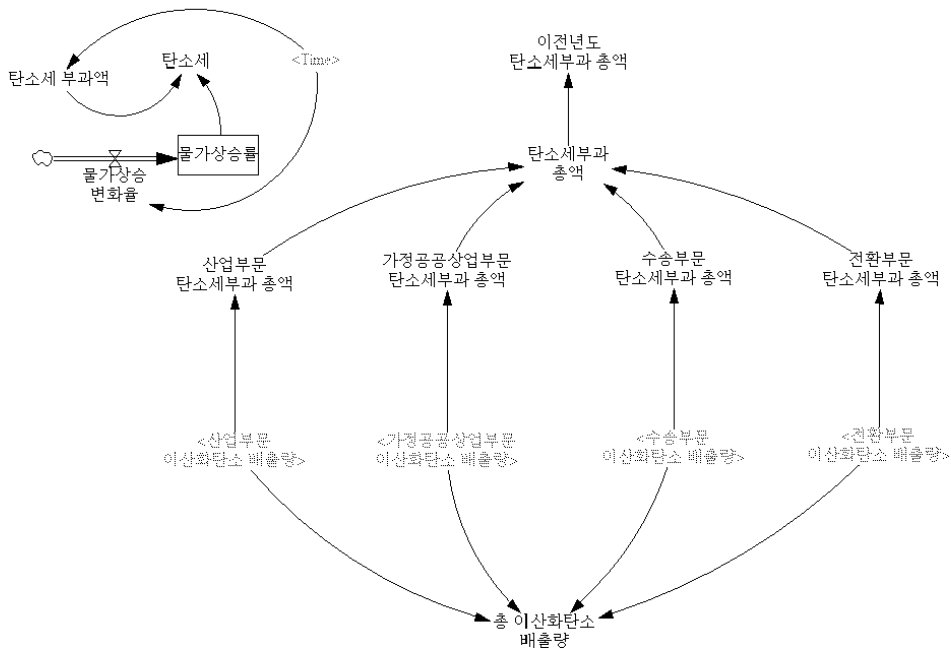
전환부문의 에너지모듈은 <그림 9>와 같다.



[그림 9] 전환부문 에너지모듈

발전소의 분류는 수력발전소, 원자력발전소, 기력발전소로 구성하였으며, 기력발전소에서 사용되는 에너지원이 전환부문 에너지원 사용량의 70-80%를 사용하기 때문에 수력 및 원자력 발전소에서의 에너지원 소비는 별도로 고려하지 않았다. 총 전력사용량은 부문 1과 2의 전력소비량 그리고 수송부문의 전력철도 에너지사용량에 기력발전소의 자체소비량을 합한 값으로 계산된다. 부문 1과 부문 2의 에너지모듈과 마찬가지로 추세에 따른 에너지원별 사용비율의 변동과 에너지가격의 변동률에 영향을 받은 각 에너지원의 사용비율에 의해 기력발전소에서 사용되는 각 에너지원 사용량이 구해지게 된다.

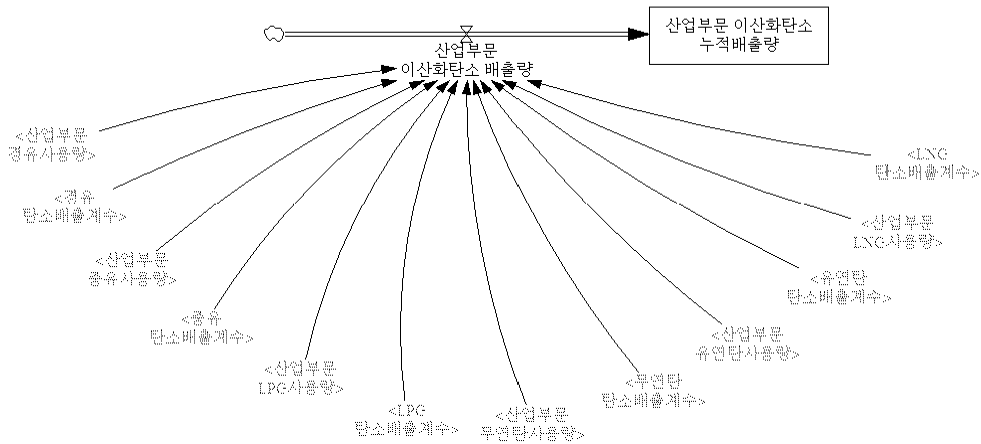
3. 환경 부문



[그림 10] 환경모듈

<그림 10>은 환경모듈을 도식화한 것이다.

각 부문의 이산화탄소 배출량에 의해 부문별 탄소세 부과액이 산출된다. 각 부문의 탄소세 부과액을 합하여 탄소세 부과 총액이 결정되고, 각 부문의 이산화탄소 배출량을 합하여 이산화탄소 총 배출량이 산정된다. 또한 탄소세는 물가상승률에 따라 변동되도록 설정한다.



[그림 11] 산업부문 환경모듈

<그림 11>은 산업부문 환경모듈을 설명하고 있으며, 이는 산업부문에서의 이산화탄소 배출량을 산출하는 데 이용된다. 배출량은 산업부문에서 사용되는 각 에너지원의 소비량과 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 기후변화에 관한 정부 간 패널)에서 정한 탄소 배출계수에 의해 결정된다.

나머지 부문의 환경모듈도 산업부문의 환경모듈과 마찬가지로 각 부문에서 사용되는 에너지원 사용량과 탄소배출계수에 의하여 이산화탄소 배출량이 구해지게 된다.

V. 실험 결과 및 분석

1. 실험을 위한 시나리오

본 연구의 시나리오는 크게 세 가지 시나리오로 구성하였다.

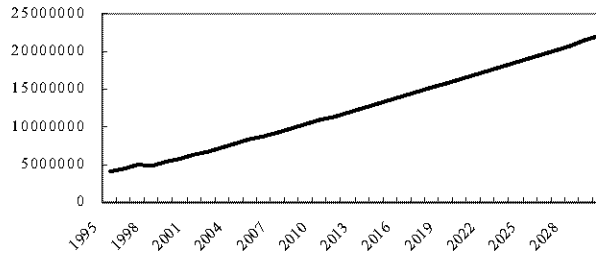
첫 번째 시나리오는 BAU(Business As Usual) 시나리오이다. BAU 시나리오에서는 탄소세 등 기후변화협약에 대비한 어떠한 정책도 모델에 반영이 되지 않고 현재 추세가 시뮬레이션 종료기간까지 지속된다는 가정을 바탕으로 둔 시나리오이다. 시뮬레이션 시작년도인 1995년부터 종료기간인 2030년까지 시간의 경과에 따라 주요 변수들이 과거의 추세에 맞추어 증감된다.

두 번째 시나리오는 정책 시나리오로서 탄소세 부과 시나리오를 설정하였다. 탄소세 부과

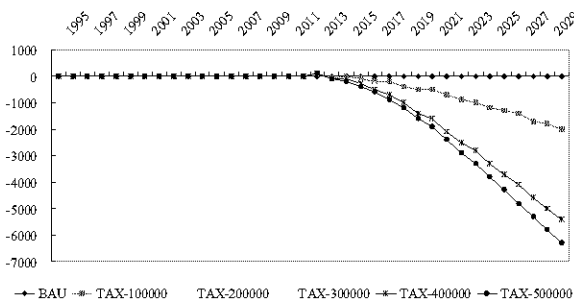
시나리오는 2012년부터 10만원에서 50만원까지 다양한 수준으로 탄소세를 이산화탄소 배출량에 부과한다는 시나리오이다. 탄소세는 지구의 온난화 방지를 위해 이산화탄소를 배출하는 석유, 석탄 등 각종 화석에너지 사용량에 따라 부과하는 세금으로 다른 직접규제에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있기 때문에 본 연구의 정책 시나리오로 설정하였다. 탄소세는 주어진 배출기준을 지키도록 경제적 동기를 부여하며 유지·관리에 드는 비용이 직접규제에 비해 저렴하다는 점과 거두어들인 세수를 여러 가지 목적을 위해 사용될 수 있다는 장점이 있다.

세 번째 시나리오는 탄소세 재투자 시나리오이다. 앞서 말한 것과 같이 탄소세 부과로 인해 거두어들인 세수를 이산화탄소 저감기술이나 에너지효율 향상기술 등에 재투자하도록 하는 시나리오이다.

2. GDP 변화 추이



[그림 12] BAU 시나리오 GDP 변화 추이

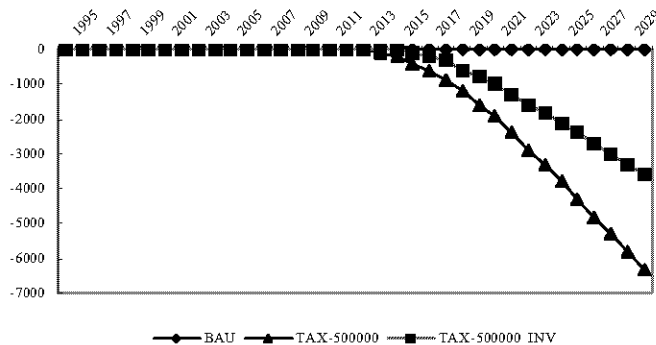


[그림 13] BAU 시나리오 대비 GDP 변화량

BAU 시나리오에서 GDP는 <그림 12>와 같이 변동한다. 현재의 추세가 시뮬레이션 종료기간인 2030년까지 지속될 것으로 나타난다. GDP액은 1995년에 398조원에서 2030년

2198조원으로 증가하는 것으로 예상된다.

BAU 시나리오 대비 탄소세 부과 시나리오의 GDP 변화량은 <그림 13>과 나타난다. 그림에서 볼 때 탄소세 부과는 GDP에 부정적인 영향을 미치게 된다. 이러한 부정적인 영향의 파악과 분석은 CO2를 줄이는 데 어느 정도의 비용이 드는지와 적절한 탄소세 부과액을 결정하는 데에 필요한 정보를 얻기 위해 필요하다. GDP는 탄소세 부과로 인해 에너지 가격이 상승하면서 에너지소비가 감소하기 때문에 탄소세 부과액이 커짐에 따라 감소되는 현상을 보인다고 설명할 수 있다. 2030년을 기준으로 BAU 시나리오에 비해 탄소세가 10만원일 경우 최소 2,000억원에서 50만원일 경우 최대 6,300억원이 감소할 것으로 보인다.



[그림 14] 탄소세 재투자 시 GDP 회복

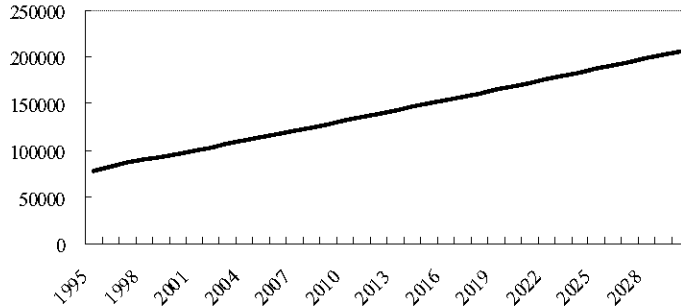
<그림 14>는 거두어들이는 탄소세가 재투자되었을 경우 BAU 시나리오와 탄소세가 50만원 부과된 시나리오의 GDP와 어느 정도 차이를 보이는 지에 대한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 재투자가 없는 경우 6,300억원의 감소를 보이지만 세수를 재투자하는 경우 그보다 적은 3,600억원의 감소로 회복하는 모습을 보인다. 이는 탄소세가 이산화탄소 저감기술이나 에너지효율 향상기술에 투자됨으로써 GDP에 대한 부정적인 영향을 줄인다고 설명이 가능하다.

3. CO2 배출량 추이

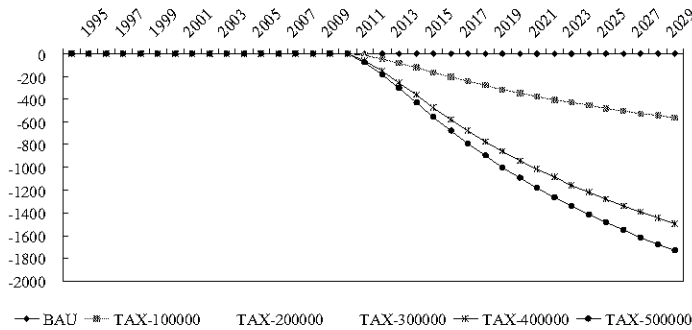
<그림 15>에서 볼 수 있듯이 BAU 시나리오에서 이산화탄소 배출량은 증가하는 추세를 보인다. 이산화탄소 배출량은 1995년 78,573TC에서 2030년 206,321TC으로 증가한다.

BAU 시나리오와 비교할 때 CO2 배출량은 <그림 16>과 같이 탄소세 부과액에 따라 감소할 것으로 보인다. 탄소세 부과액이 10만원일 경우 2030년에 564TC, 50만원 부과 시

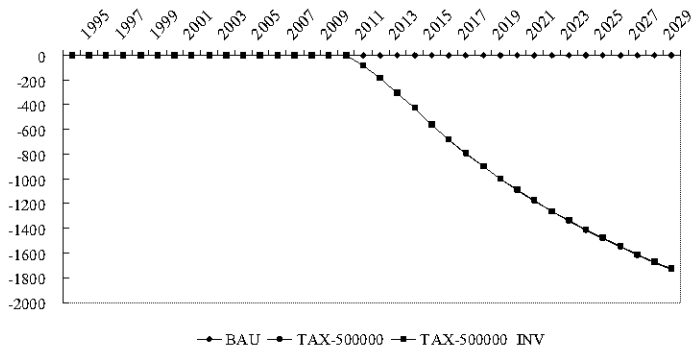
1,733TC의 감소효과가 있을 것으로 나타난다. 이는 탄소세가 부과되면서 에너지가격이 상승하고 그에 따라 GDP, 에너지사용량의 감소가 이루어지기 때문이다.



[그림 15] BAU 시나리오 이산화탄소 배출량 변화 추이



[그림 16] BAU 시나리오 대비 이산화탄소 배출 변화량



[그림 17] 탄소세 재투자 시 이산화탄소 배출량

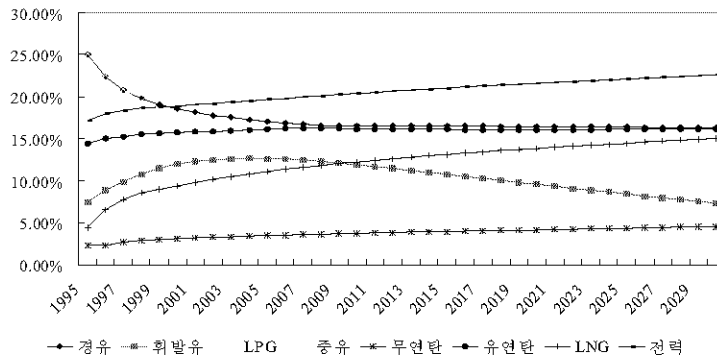
BAU 시나리오와 탄소세가 50만원 부과되었을 경우의 탄소세 부과 시나리오, 탄소세 재투자 시나리오를 비교하여 보면 <그림 17>과 같이 나타난다. 탄소세가 재투자 되었을 경

우 앞서 살펴본 GDP의 경우 회복세를 보이고 GDP에 따라 변동하는 각 부문의 경제변수 역시 회복되어 재투자를 하지 않는 경우보다 더 큰 값으로 나타난다. 하지만 이산화탄소 배출량은 재투자 하였을 경우 그렇지 않은 경우 보다 50만원 부과 시나리오에서 8TC만 더 배출된다. 이는 재투자의 효과로 설명할 수 있다.

4. 에너지원별 사용비율 변화 추이

탄소세를 부과하였을 경우 각 에너지원의 탄소배출계수에 의해 에너지가격 상승률이 다르므로 에너지원의 사용비율이 변동하게 된다.

<그림 18>은 탄소세가 50만원 부과되었을 경우의 결과이다. 탄소세 부과가 시작되기 직전 기간인 2011년의 비율과 비교하였을 때 2030년의 각 에너지원의 사용비율의 변화는 <표 1>과 같이 나타난다.



[그림 18] 에너지원별 사용비율 변화

[표 1] 에너지원별 사용비율의 변화

경유	휘발유	LPG	중유
-0.22%	-4.08	0.42%	-1.15%
무연탄	유연탄	LNG	전력
0.71%	-0.01%	2.38%	1.94%

에너지원별로 가격상승율과 탄소배출계수가 다르기 때문에 사용비율이 변동하는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구는 국내의 환경문제의 해결방안으로 개발된 여러 정책 수단 중 탄소세를 대상으로 그 실효성을 평가하고, 탄소세가 국가 거시경제에 미치는 영향을 측정하여 탄소세의 도입에 따른 파급효과를 분석한다. 이러한 관점에서 본 연구는 동태적 분석을 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 통해 에너지와 경제, 환경 시스템의 상호연관성을 파악하고 이러한 모형에 기초하여 기후변화의 원인인 온실가스(Green House Gas: GHG), 그 중에서도 85%가 넘는 부분을 차지하는 이산화탄소에 초점을 맞춰 CO₂ 저감을 위한 방안인 탄소세 도입정책이 경제, 에너지 및 환경지표에 미치는 효과분석을 수행한다.

시뮬레이션 수행결과 GDP는 BAU 대비 탄소세 부과액이 10만원일 경우 최소 2,000억 원에서 50만원일 경우 최대 6,300억 원이 감소하였으며, 거두어들인 탄소세를 재투자할 경우 이보다 회복되는 추세를 보인다. 이산화탄소 배출량의 경우 탄소세를 부과함으로써 564TC에서 1,733TC만큼 적어지는 추세를 보인다. 또한 재투자 시 GDP 등 다른 경제변수의 상승에도 불구하고 이산화탄소 배출량은 증가되지 않는 효과를 보인다. 에너지원별 사용비율은 탄소세로 인한 에너지가격의 상승률과 탄소배출계수에 의해 각 에너지원마다 증감하는 현상을 보인다.

본 연구는 기존의 실증모형(empirical models)이 투입-산출 모형(Input-Output: I-O)이나 선형계획(Linear Programming: LP)에 기초하여 개발되어 왔음에 반해, 정책 평가 수단으로써 변수들 간의 상호 연관성에 기반을 둔 동태적 시뮬레이션 모형을 구축하였다. 또한 그동안 거시경제 이론을 바탕으로 한 계량 경제 모델의 형태로 여러 가지 저감수단과 정책들이 미시적인 여러 가지 분석 도구로 경제 분석이 이루어져 왔지만 본 연구는 장기적인 관점에서 다양한 정책 분석을 위해서는 동태적 분석을 실시하고 이를 위해서 에너지-경제-환경을 단편적으로 분석하는 것이 아니라, 통합적으로 접근하였다는 데에 의의가 있다.

VII. 모델 분석능력 및 개선사항

1. 모델의 분석능력

동태적이며 통합적인 분석을 위해 본 연구에서는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 국가 전체의 에너지 수급 현황을 파악할 수 있는 에너지 밸런스가 구축하였다. 에너지 밸런스는 국가의 에너지 흐름을 한 눈에 볼 수 있는 통계 DB 구축을 의미하며, 사용

중인 모든 에너지원에 대해 에너지원간 투입 및 산출 관계를 정확하게 반영할 수 있어야 한다.

둘째, 에너지-환경-경제 간의 상호연관성을 파악하고, 이들의 관계를 설명하는 연결 변수를 통해 수학적 관계식을 정량적으로 표현하였다. 이는 변수들 간의 관계식에서 특정 변수가 어떤 함수에서는 설명변수로 기능하면서 동시에 다른 함수에서는 종속변수가 되는 형태를 취함으로써 변수들이 유기적으로 영향을 주고받음을 의미한다.

셋째, 장기적인 과급효과 분석을 위해 시차변수의 도입을 통한 동태적인 모형을 개발하였다. 변수들의 현재 값뿐만 아니라 과거 값이 설명변수로 이용하여 모형이 한 시점에 머무는 정태성을 벗고 시간의 흐름에 따른 변화를 반영할 수 있는 동태적 모형이 되도록 하였다.

넷째, 하나의 시스템을 여러 작은 부문으로 분리하는 방법론과는 달리 전체론적 관점(a holistic view)에서 시스템을 바라볼 수 있는 방법론으로 접근하였다. 이러한 방법론의 핵심은 한 시스템내의 모든 요소들이 상호간에 어떻게 작용을 하는가를 이해하는 것이다. 다시 말하자면 시스템의 기본 구조를 이해하고, 따라서 시스템이 만들어내는 행태를 이해해야 한다. 한 시스템 내의 변수들은 피드백(feedback) 고리를 통하여 상호작용을 해야 하며, 한 변수의 변화는 시간에 따라 다른 변수에 영향을 주고 다른 변수는 다시 최초의 변화가 일어난 변수에 영향을 미치는 구조가 되어야 한다. 본 연구에서는 이를 고려하여 변수를 선정하고 변수들 간의 관계를 정립하였다.

2. 개선사항

이산화탄소를 줄이기 위한 정책으로 본 연구에서는 탄소세만을 고려하였다. 하지만 청정 개발체제(Clean Development Mechanism: CDM), 배출권 거래제(Emission Trading: ET) 등 추가적인 여러 정책에 대한 시나리오가 필요할 것이며, 또한 모델의 오차를 줄이고 제시된 모델의 안정성 및 예측력을 평가하기 위해 모델의 예측력을 검증하는 것이 필요하다.

[참고문헌]

- 강승진(1998), 『에너지-경제-환경 시스템의 모형화에 관한 연구』, 에너지경제연구원
- 강윤영(1998), 『탄소세가 국민경제에 미치는 영향: 동태적 일반균형 모형』, 에너지경제연구원
- 건설교통부(2003), 『건설교통통계연감』, 건설교통부
- 곽상만(2002), 「시스템다이나믹스 기법을 활용한 차급별 월간 자동차 수요 예측 모델 개발」, 『한국 시스템다이나믹스 연구』 제3권 1호:79-104.
- 김도훈, 문태훈, 김동환(1999), 『시스템다이나믹스』, 대영문화사
- 노동청(2003), 『노동통계연감』, 노동청
- 대한석유협회(2003), 『석유연보』, 대한석유협회
- 부경진(2002), 『에너지-환경-경제 통합 계량경제 시뮬레이션 모형에 의한 온실가스 저감수단의 평가』, 에너지경제연구원
- 부경진(2003), 『분기별 계량경제 시뮬레이션 모형 개발을 통한 에너지-환경-경제지표의 전망 및 관련 정책의 평가』, 에너지경제연구원
- 석탄산업합리화사업단(2003), 『석탄통계연보』, 산업자원부
- 에너지경제연구원(2003), 『에너지통계연보』, 에너지경제연구원
- 유동현(2004), 『산업공정부문 온실가스 배출전망』, 에너지경제연구원
- 임재규(2001), 『국내 GHG 감축을 위한 정책 포트폴리오에 관한 연구』, 에너지경제연구원
- 정영근(1998), 『거시 환경경제모형 개발에 관한 연구』, 한국환경정책평가연구원
- 조상민(2006), 『에너지-경제-환경 통합 계량경제 시뮬레이션 모형을 이용한 수소에너지 도입의 파급효과 분석 연구』, 서울대학교
- 통계청(2003), 『한국통계연감』, 통계청
- 한국은행(2003), 『경제통계연보』, 한국은행
- 한화진, 오소영(1999), 『지구온난화가스 저감대책동향분석 및 국내 대응방안 연구-수송부문 중심』, 한국환경정책평가연구원
- 황상필(2005), 『한국은행 분기 거시계량경제모형의 재구축』, 한국은행
- Hannon, B.(1973), *An Energy Standard of Value*. Annals of the American Academy of Political and Social Science.
- Isard, W.(1972), *Ecologic Economic Analysis for Regional Development*. The Free Press. New York.
- John D. Sterman.(2004), *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex*

World , McGraw-Hill.

Leontief, Wasily.(1970), *Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach*. Review of Economics and Statistics. L II:262-272

<http://www.ksdc.re.kr/databank/>