'2000춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

지속가능한 성장에서의 원자력의 역할 분석을 위한 CGE 모형의 개발

Development of a CGE Model for Analyzing the Role of Nulcear Power in Sustainable Growth

임채영, 김승수

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

지속가능한 성장을 위한 미래 한국의 에너지시스템에서의 원자력의 역할을 분석하기 위한 모형이 개발되었다. 개발된 모형은 연산일반균형(Computational General Equilibrium)모형의 일종으로 원자력발전의 정도와 이산화탄소 배출제약의 도입에 따른 국민경제적 영향을 분석할 수 있는 에너지-경제연계모형이다. 비선형계획법을 사용하여 최적화가 이루어지는데 목적함수는 분석대상기간동안의 국가 경제효용을 최대화하는 것이다. 본 연구에서 개발된 모형은 국가 에너지수급정책 등 관련 정책의 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

The purpose of this study is to develop the model for analyzing the role of nuclear power in the sustainable energy supply future of Korea. For the purpose, an energy-economy interaction model of the computational general equilibrium (CGE) approach was developed. The model is a standard optimization model that maximizes the discounted value of Korean economic utility. The model developed in this study can be contributed to set up the national energy policy.

1. 서론

1970년 이래로 우리나라는 급속한 경제발전을 이룩해 왔으며 이에 따라 에너지의 사용도 급격하게 증가하여 왔다. 1970년대는 매년 평균 약 8%의 에너지 소비증가가 이루어 졌으며 80년대와 90년대에는 연평균 10% 이상의 증가가 이루어졌다. 또한 빈약한 에너지자원으로 인해 약 97% 이상의 에너지를 해외 수입에 의존하고 있다. 특히 석유에 대한 의존도가 높은데 1997년에는 전체에너지 중 약 59%를 석유로 충당하였다. 높은 화석에너지 의존도와 지속적인 에너지 소비증가로 인해 온실가스의 배출량도 급격하게 증가하고 있다. 1997년에는 약 1억 4천만 탄소환산톤의 온실가스를 방출하여 전세계 배출량의 약 1.8%를 점유하였다. 일인당 온실가스 배출량은 약 3.1 톤이며 국내총생산(GDP)당 온실가스 배출량은 0.49 탄소환산톤/ 백만원에 이르러 상대적으로 고에너지 산업구조를 가지고 있다.[1]

우리나라는 1993년 12월에 UNFCCC(UN Framework Convention on Climate Change)에

가입하였는데 당시에 이미 OECD 회원국임에도 불구하고 非부속서I 국가(non-Annex I country)로 분류되어 온실가스의 감축의무가 면제되었다. 그러나 최근의 국제 동향을 살펴보면 개발도상국의 자발적인 의무분담에 대한 압력이 국제적으로 거세지고 있으며 지난 1998년 11월 아르헨티나 부에노스아이레스에서 개최된 제4차 당사국총회(Conference of Parties, COP4)에서 주최국 아르헨티나가 온실가스 감축 참여를 밝힌 이후로 이러한 압력은 더욱 거세지고 있다. 앞으로 특히 우리나라 등을 비롯한 선발개도국에 대한 압력이 거세질 것으로 예상되며 우리 정부도 지난 10월에 개최된 COP5에서 이에 관한 입장을 밝힌바 있다. 기존의 정부 입장은 2020년 이후 감축참여를 고려하는 것이었으나 동 회의에서 한국대표인 환경부장관은 자발적인 참여가 전제된다면 조기 감축 목표 수립의 의지가 있음을 밝혔다. 따라서 이산화탄소 배출제한은 더 이상 선진국만의 문제가 아니다. 미래의 경제성장과 고에너지 산업구조를 감안할 때, 향후 배출제한이 부과될 경우 한국 경제는 매우 심각한 영향을 받을 수 있기 때문이다.

1978년 고리1호기가 상용운전을 개시한 이래로 원자력발전은 우리나라의 주요한 전력공급원으로 자리를 잡았으며 향후 10 여년간도 이러한 추세는 지속될 것으로 예상된다. 지난 10 여년간 전세계적인 원자력산업의 침체에도 불구하고 국내에서는 원자력발전이 활발히 추진되어 왔다. 그러나 장기적으로 이러한 추세가 유지될 수 있는지는 의문의 여지가 있다. 경쟁발전 기술의 효율향상과 안정적인 원료가격으로 인해 원자력과 유연탄 화력의 경제성은 차이가 점차 좁혀지고 있으며 또한 신규 원자력발전소 및 관련시설들의 건설은 소위 NIMBY(Not In My Backyard)현상으로 인해 부지확보에 어려움을 겪고 있다. 한편 환경운동론자들은 방사선문제를 들어 원자력발전의 폐지나 축소를 주장하여왔다. 아직 이러한 주장은 사회적으로 널리 지지를 받지는 못하고 있으나 앞으로 환경운동이 서구의 경우와 같이 정치세력화 한다면 원자력의 추진에 걸림돌이 될 수도 있다.

본 연구에서는 향후 이산화탄소 배출 규제가 이루어지고 또한 어떤 이유로 원자력발전의 도입에 제약이 가해질 경우 이것이 국내 경제에 미치는 영향을 분석하기 위한 모형을 개발하였다.

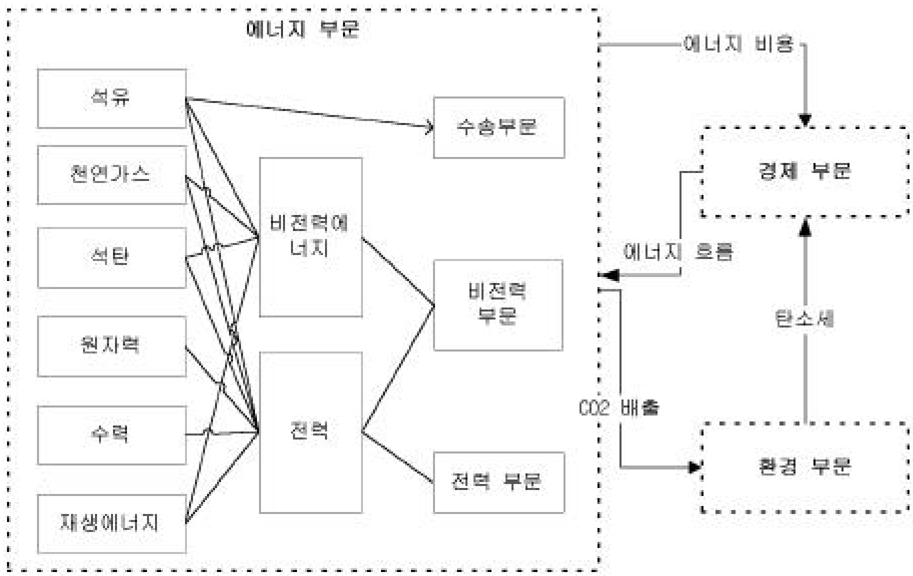
이산화탄소 배출제약에 관한 영향을 분석하는 연구를 수행하는데는 기존의 경제학에서 사용되던 다양한 기법이 적용될 수 있는데 특히 최근에는 연산일반균형(CGE)모형을 이용한 분석이 두드러지게 나타나고 있다.[2][3] 이러한 경향은 이산화탄소 배출 제약과 같은 충격이 경제에 가해질 경우 이에 따른 영향분석에 장점이 있는 CGE모형의 특성에 비롯된 것이라 할 수 있다. 또한 CGE모형은 그 calibration을 통해 계수를 결정하는 모형의 특성상 상대적으로 입력자료의 부담이 덜하고 장기간에 걸친 영향 분석이 가능하다는 장점이 있다.

기존의 연구에서는 주로 CGE모형을 사용하여 탄소배출 제약이 경제에 미치는 영향을 분석하였는데 이러한 분석은 경제 전반에 미치는 영향을 분석하는데는 장점이 있으나 탄소배출 제약의 도입시 원자력의 역할을 분석하기에는 적합하지 않은 것이었다.

한편, 1997년, Nordhaus는 CGE모형의 틀을 사용하여 스웨덴에서 원자력발전의 폐지가 국민경제에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 그는 이 연구에서 SEEP(swedish Energy and Environmental Policy Model)모형을 구성하여 국민투표에 의해 결정된 원자력 발전의 폐지가 스웨덴 경제에 미치는 영향을 분석하였다.[4] 본 연구에서는 Nordhaus가 개발한 SEEP 모형을 바탕으로 탄소배출 제약시 국내 원자력발전의 역할 분석을 위한 KEEP(Korean Energy and Environmental Policy Model)모형을 개발하였다.

2. KEEP모형의 구조

KEEP모형은 크게 에너지부문, 환경부문, 경제부문으로 나눌 수 있으며 각 부문들은 에너지흐름, 에너지비용, 이산화탄소 배출량에 관한 변수들로 연결되어 있다. 모형의 구조는 그림 2.1에 나타나 있다.



[그림 2.1] KEEP 모형의 구조

KEEP모형은 비선형계획법을 사용하여 목적함수인, 분석 대상기간 동안의 우리 경제의 총효용을 최대화하도록 수식화되어 있다. 식 (1)에서와 같이 어떤 연도의 효용은 그 해의 행복도(Felicity)에서 에너지비용(Cost)을 뺀 것으로 정의되고 대상기간의 효용을 할인율을 적용하여 합함으로써 총효용을 얻게 된다. 이때, 에너지 사용량의 증가는 행복도(Felicity)와 에너지비용을 동시에 증가시키는 작용을 하게 되므로 총효용의 변화에 양방향으로 작용하게 된다. 따라서 효용을 최대화하기 위한 최적 에너지 수요가 비선형계획법을 사용하여 구해진다.

$$Utility = \sum_t Felicity(t) - Cost(t) + utilcon \times (1+r)^{(1-t)} \tag{1}$$

행복도는 식 (2)에서와 같이 외생적으로 주어지는 총 요소생산성 향상률과 내생변수인 에너지 소비량에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} Felicity(t) &= al(t) \cdot util0 \cdot \left(\frac{elecelec(t)}{dem_{el}}\right)^{\alpha_{el}} \left(\frac{nonelec(t)}{dem_{oth}}\right)^{\alpha_{nonel}} \left(\frac{trans(t)}{dem_{trans}}\right)^{\alpha_{trans}} \\ al(t) &= a_0 \cdot e^{GA(t)} \end{aligned} \tag{2}$$

단, a_0 : 생산성 함수의 교점,

$GA(t)$: 총 요소 생산성 증가율,

$util0$: 초기값 보정을 위한 상수,

dem_x : x 에너지부문의 기준년도 값

α_x : 총 효용중 x 에너지부문의 점유율

에너지부문에서는 원자력의 역할을 분석하기 위해 전력부문을 세분화하고 기타부문은 수요와 공급부문을 단순화하여 표현하였다. 우선 수요부문을 크게 비치환성 전기(elecelec), 수송부문(trans), 기타 에너지(nonelec)의 3개 부문으로 나누었다. 기타에너지부문에서는 에너지원간의 직접적인 대체가 일어나며 비치환성 전기부문은 전력, 수송부문은 석유만으로 공급되는 것으로 단순화하였다. 공급부문은 에너지원별로 석유, 석탄, 가스, 원자력, 수력, 신재생에너지의 6개 부문으로 나누었다. 다음은 에너지 수요부문의 관계식이다.

$$nonelec(t) = \Big(CES_{oilne} \cdot oilnone(t)^{1-\frac{1}{\sigma}} + CES_{elne} \cdot elecnone(t)^{1-\frac{1}{\sigma}} + CES_{gasne} \cdot gasnone(t)^{1-\frac{1}{\sigma}} + CES_{coalne} \cdot coalnone(t)^{1-\frac{1}{\sigma}} + CES_{rnwne} \cdot rnwnone(t)^{1-\frac{1}{\sigma}} \Big)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (3)$$

단, CESxne : 비전력분야에서의 x 에너지원의 점유율

σ : 비전력분야의 대체탄력성 계수

$$elec(t) = nuc_{old}(t) + hydro_{old(t)} + coal_{old(t)} + oil_{old(t)} + gas_{old(t)} + nuc_{new}(t) + coal_{new}(t) + oil_{new}(t) + gas_{new}(t) \quad (4)$$

$$trans(t) = oiltrans(t) \quad (5)$$

에너지 비용은 발전 및 비발전, 수송부문의 비용과 환경오염물질 배출에 따르는 비용을 포함하는 전체 시스템 비용으로 정의된다. 전력공급기술의 경우 각 발전원별로 기존발전기술과 신규발전기술로 구분하여 기술개발에 따른 기술 및 비용에서의 변화를 고려할 수 있도록 하였다. 기존에 설치된 발전소의 건설비는 sunk cost로 간주하고 운전유지비만을 고려하였다.

$$\begin{aligned} Cost(t) = {} & ct_{old}^{nuc} \cdot nuc_{old}(t) + ct_{old}^{hyd} \cdot hyd_{old}(t) + ct_{old}^{col} \cdot coal_{old}(t) \\ & + ct_{old}^{oil} \cdot oil_{old}(t) + ct_{old}^{gas} \cdot gas_{old}(t) \\ & + ct_{new}^{nuc} \cdot nuc_{new}(t) + ct_{new}^{col} \cdot col_{new}(t) \\ & + ct_{new}^{gas} \cdot gas_{new}(t) + ct_{new}^{rnw} \cdot rnw_{new}^{elec}(t) \\ & + (Pr_{oil} + dist_{oil}^{tr}) \cdot oiltrans(t) \\ & + (Pr_{oil} + dist_{oil}^{ne}) \cdot oilnone(t) + dist_{el} \cdot elecnone(t) \\ & + (Pr_{gas} + dist_{gas}^{ne}) \cdot gasnone(t) + (Pr_{col} + dist_{col}^{ne}) \cdot colnone(t) \\ & + (ctne_{rnw} + dist_{rnw)} \cdot rnwnone(t) + dist_{el}^{el} \cdot elecelec(t) \\ & + \phi_{so_2} em_{so_2}(t) + \phi_{co_2}(t)\, em_{co_2}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

단, ct_x^y : x 유형, y 발전원의 평준화 발전원가

Pr_i : i 에너지원의 가격,

$dist_y^z$: y 에너지원의 z부문에서의 배분비용

Φ_j : j 배출물질의 가격(이산화탄소의 경우 탄소세)

이산화탄소의 배출량은 에너지원별 배출계수를 적용하여 계산한 후 효율에 따른 차이를

고려하였다. 특히 가스 및 석탄화력의 경우에는 신규기술의 개발에 따른 원가 절감과 효율 향상을 고려하여 이산화탄소 배출계수를 변화시켜 적용시킬 수 있도록 설계되었다. 이산화탄소 배출량을 구하는 식은 식 (7)에 제시되어 있다.

$$\begin{aligned} emco2(t) = \; & emco2_{gas} \cdot [eff_{new}^{gas} \cdot gas_{new}(t) + eff_{old}^{gas} \cdot gas_{old}(t) + gasnone(t)] \\ & + emco2_{oil} \cdot [eff_{old}^{oil} \cdot oil_{old}(t) + oilnone(t) + oiltrans(t)] \\ & + emco2_{col} \cdot [eff_{new}^{col} \cdot col_{new}(t) + eff_{old}^{col} \cdot col_{old}(t) + coalnone(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

단, $emco2_y$: y 에너지원의 이산화탄소 배출계수,

eff_x^y : x 유형, y 발전원의 발전효율

본 모형과 같은 최적화모형은 가격에 의해 미래의 에너지원별의 점유율이 결정되기 때문에 현실의 추세를 반영하지 못하는 단점이 있을 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 미래의 에너지 구조에 관한 몇 가지 제약을 도입하여 모형을 재구성하였다.

첫째, 전력의 사용량은 전체 에너지 사용량의 일정부분 이상을 점유한다. 경제가 발전하고 생활 수준이 향상됨에 따라 전력의 수요가 증가할 것이라는 가정은 타당하지만 이는 가격의 우위에 의해 증가하는 것은 아니기 때문에 본 모형과 같은 유형의 모형에서는 이를 반영하기 어렵다.

둘째, 같은 이유로 가스의 사용량도 일정부분 이상을 점유하는 것으로 가정하였다.

셋째, 기존의 전원개발 계획에 따르면 유류전소 발전소는 추가 건설을 하지 않으므로 이를 반영하여 유류전소발전소는 기존의 발전소만 운영되도록 제약을 가하였다.

넷째, 수력발전의 경우는 추가 개발이 가능한 잠재력이 많지 않음을 고려하여 상한을 도입하였다.

이러한 가정은 모형의 결과를 보다 현실적으로 만드는데 도움을 주는 반면 가격에 의한 에너지원별 치환의 여지를 줄임으로써 최적화된 결과를 도출하는 데는 방해가 된다. 따라서 이는 분석의 목적에 비추어 분석자가 절충(trade-off)을 해야 하는 부분이라 할 것이다.

프로그램은 GAMS(General Algebraic Modeling System)을 사용하여 작성되었다.[5] GAMS는 다양한 수리계획법 solver와 이를 운용하기 위한 전처리/후처리과정을 포함하는 개발환경이라 할 수 있다. 이를 이용하면 주요 변수들의 상, 하한값 설정, 제약식의 포함여부 등을 손쉽게 변화시켜가며 분석할 수 있다.

3. 향후 연구과제 및 모형 활용시 기대 효과

이산화탄소 배출량을 줄이기위해 탄소세가 도입될 경우, 화석에너지의 가격이 상승하게 되는데 이러한 가격의 상승은 두가지 경로를 통해 경제에 영향을 미치게 된다. 하나는 에너지 사용량을 감소시키는 것과 탄소배출 강도의 차이에 의한 연료원간의 대체가 그것이다. 본 모형에서는 에너지수요가 내생적으로 결정되기 때문에 연료 대체의 효과 뿐 아니라 에너지 수요의 감소에 의한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 또한 경제부문의 모형이 보강된다면 배출권거래제의 분석 등에 다양하게 이용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 모형은 다소 단순화된 형태로 경제와 에너지 부문을 모사하고 있는데 이로 인해 실제의 결과를 과장하거나 축소할수 있다. 향후에는 다음과 같은 점이 보완되어야 한다.

첫째, 경제부문의 모형이 보다 정교하게 개선될 필요가 있는데 특히 투자에 의한 자본축적과 경제성장과의 관계에 대한 모형화가 요구된다.

둘째, 수송부문에서의 에너지대체가 고려되어야 한다. 전기자동차의 도입 등 기술개발로 수송부문에서 전력과 석유가 본격적으로 경쟁하게 되면 이는 전체 에너지중 전력의 수요기반을 크게 늘리게 되며 이는 원자력발전의 수요에도 영향을 미치기 때문이다.

셋째, 발전원 이외의 원자력의 활용 효과가 분석 가능해야 한다. 이는 향후 원자력이 지역난방이나 산업공정열등의 열수요를 대체하거나 해수담수화 등에 사용될 수 있을 것으로 전망되기 때문이다.

이러한 문제점들이 개선된다면 본 모형이 가지는 장점과 기존의 계량경제모형이 가지는 장점을 결합하여 원자력의 역할 및 전망에 관한 보다 종합적인 분석이 가능하게 될 것이다.

4. 참고문헌

[1] Yearbook of Energy Statistics 1998 Ministry of Commerce, Industry and Energy

[2] 에너지-경제-환경시스템의 모형화에 관한 연구, 강승진, 에너지경제연구원, 1999

[3] global CGE모형을 이용한 탄소세 효과 분석, 조경엽, 에너지경제연구원, 1999

[4] Nordhaus W. D. 1997 The Swedish Nuclear Dilemma, - Energy and the Environment, Resource for the Future, Washington, DC

[5] GAMS: A User's Guide Release 2.25, Anthoney Brooke et al., 1992