

한국경제의 성장과정과 환경 및 지식스톡에 관한 시스템 다이내믹스 모델링  
A System Dynamics Model for Economic Growth,  
Environmental Quality, and Knowledge Development in Korea

전대욱, 김지수

한국과학기술원 테크노경영대학원(dujeon@chol.com, jskim@kgsml.kaist.ac.kr)

**Abstract**

본 연구의 목적은 한국경제의 성장과정에서 자본, 노동, 지식, 그리고 환경질의 동태적 상호관계를 도출함에 있다. 따라서 본 연구는 경제성장에 관한 전통적인 거시경제적 시스템 다이내믹스 모형에 최근 경제학에서 대두되는 새로운 아이디어, 환경 및 지식에 관한 변수들을 가미하여 본 연구의 모형을 제시하고, 아울러 경제성장의 질적 전환기에 있어서 유효한 정책수단을 제공함으로써 이론적이며 실제적인 의의를 지닌다..

**1. 모델링의 필요성과 대상**

최근 10여년의 기간 동안 거시경제학 및 경제성장론의 모델에 일어난 획기적인 변화는, 첫째, 신습페테리안에 의한 “내생적 경제성장론 (Endogenous Growth Theory)”을 중심으로 지식스톡이 경제성장에 미치는 영향에 관한 모델링[1]이며, 둘째, “환경경제학”의 제 이론가들을 중심으로 경제의 외부성 혹은 외생변수로 인식되어 온 환경부문에 대한 내생적 모델링과 지속가능성에 대한 논의[2]라고 할 수 있다. 우리나라에서도 정책적 니즈에 부응하여 이 두 조류에 대한 환경-경제의 통합 모델링의 시도[3, 4, 5, 6]는 주목할만 하다. 그러나, 환경-경제 통합 모델링에 있어서 지식변수의 도입은, 이것이 직관적으로 경제성장과

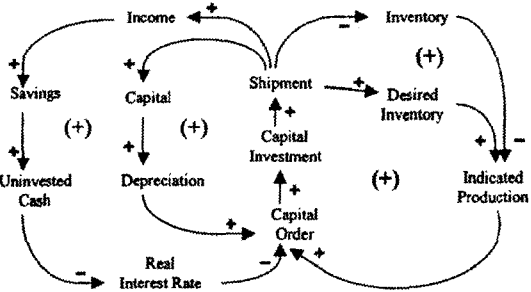
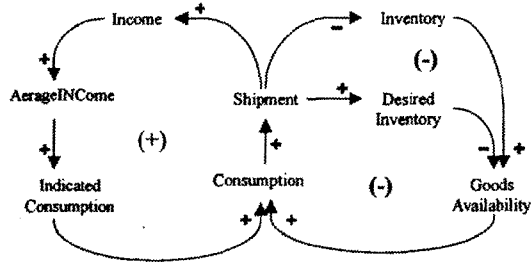
환경보전을 동시에 달성하는 “지속가능성”의 필요조건임에 자명[7]하나, 현재까지는 이러한 모델의 제시에 있어서 구체적이고 실질적인 진보는 보여주지 못하고 있다. 아울러 이러한 환경-지식변수의 통합으로부터 기대할 수 있는 장기적이고 본원적인 경제시스템의 행태를 보여줄 수 있는 일반균형 모델에 대한 연구 또한 미진하다. 본 연구는 이러한 환경과 지식변수를 기존의 일반균형 경제성장 모형에 통합하는 과정에 대한 시도이다.

**2. 시스템 다이내믹스의 일반균형 성장모형**

1960년대 이후 간헐적으로 시도되어 온 시스템 다이내믹스 경제모형은 자본, 노동스톡 등을 중심으로 전형적인 일반균형 거시경제 성장과정을 모델링[8, 9, 10, 11, 12]하였으나, 실증 경제학에서 흔히 사용되는 CGE(Computational General Equilibrium) 모델[4]과는 약간의 차이점을 보인다.

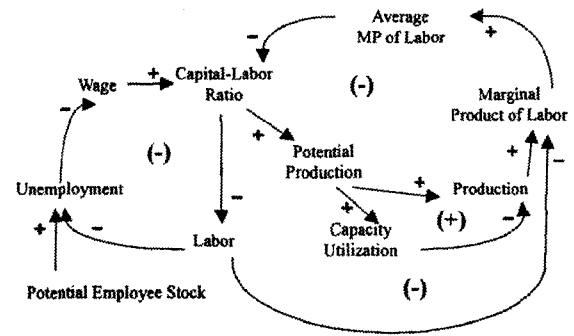
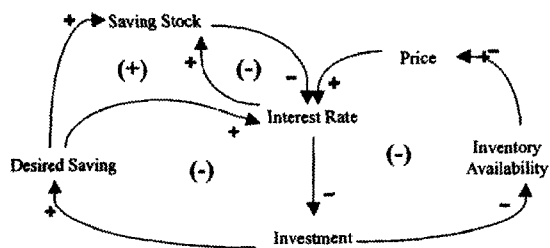
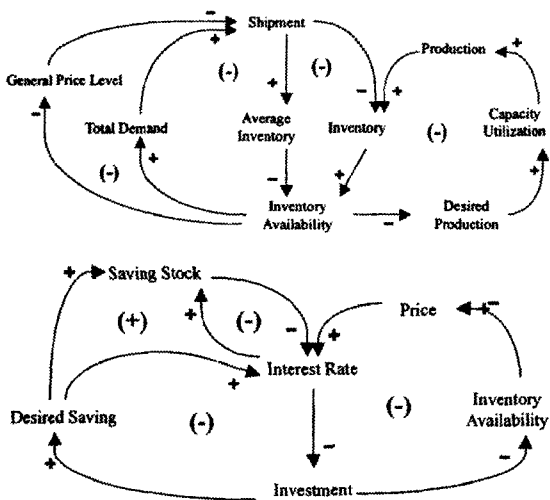
후자의 경우, 완전균형을 목적으로 가격벡터를 산출하나, 전자의 경우 가격벡터를 무형의 스톡으로 처리하고 수급의 차가 이 스톡을 조정한다는 점에서 일반균형 모형이지만 불완전균형을 전제로 한 연립미방시스템 모형이라고 말할 수 있다. 또한 전자는, 다양한 산업군과 비교적 단기에서의 각 산업군간의 영향분석에 유용한 실증적인 방법인데 비해, 후자는 장기적인 성장과정에서의 동태적 인과관계의 피드

백이 전체 시스템에 미치는 행태에 관한 것으로, 정성적이나 장기적인 관점에서 시스템의 구조적 특성이 장기행태에 미치는 영향에 대한 이해를 돕고, 정책 실험에도 유용하다.



<그림 1> 전형적인 경제성장 시스템모형의 성장엔진(동적 인과관계 모형)

본 연구에서는 두 모형에 대한 가치 판단을 미루고, 본 연구가 이론적이며 실증적인 초기 단계임을 감안하여 시스템적 특징과 장기적인 행태분석에 부합하는 후자를 채택하기로 한다.



<그림 2> 전형적 경제성장 시스템 모형의 시장청산 메커니즘 (실물, 자본, 노동)

본 연구의 모형의 기본이 되는 전형적 거시경제 성장모형은 Saeed[8, 9, 11]에 의한 것으로, <그림 1>과 같이 노동-자본의 두 실물스톡의 동태적 성장과정에 초점을 맞추고, <그림 2>와 같이 물가, 임금, 이자율의 각 가격스톡과 재고, 저축 등의 시장청산 메커니즘을 통해 교과서적인 경제성장 모형을 제시하고 있다.

### 3. 경제와 지식스톡 성장의 일반균형

내생 성장론의 아이디어를 일반균형 성장모형에 도입하는 데에 있어서 가장 중요한 점은, 기술이 새로운 생산요소로서 생산함수와 요소시장에 대한 추가됨은 물론, 각 시장과의 피드백인 일반균형을 모델링해야 한다는 점이다.

본 모델은 경제성장에서의 기술진보의 내생화를 위해, 자본-노동, 즉  $K-L$  결합에 의한 총생산을 자본재와 소비재로 분리하고, 각 자본재 섹터  $i \in [0,1]$  에서 관련기술  $A(i)$  와 투입자본  $K(i)$  의 결합으로 자본재  $k(i) = K(i)/A(i)$  가 생산된다고 가정한다. 따라서 거시수준에서 총합된 소비재  $Q$  에 관한 생산함수 혹은 총공급은,

$$Q = L_1^{1-\alpha} \int A(i) \cdot k(i)^\alpha di = K^\alpha (AL_1)^{1-\alpha}$$

와 같다. 여기서,  $L_1$  은 단순노동인력으로서

연구개발인력  $L_2$  와 구분된다. 또한 기술수준  $A$  는, 이노베이션이 포와송 사건임을 가정했을 때 Poisson Arrival Rate  $\eta$  와 Innovation Diffusion Rate  $\sigma$  에 의해 다음과 같은 변화율을 갖는다.

$$\frac{d}{dt} A = \sigma \eta L_2 A$$

또한, 이 새로운 자본재섹터의 연구개발 투입  $N$  을 포함한 총수요  $Y$  의 방정식은,

$$Y = C + I + N + G + (EX - IM)$$

와 같다. 한편 일반균형을 위한 시장청산 과정에서 기존의 자본-노동 결합률( $KLR$ : Kapital-Labor Ratio)은 기술진보가 내재된 모형에서 변형된 자본재-노동 결합률( $kLR$ )과 연구개발-노동 비율( $LRR$ : Labor-Research Ratio)로 구분되어 시장청산 메커니즘에 적용된다.

$$\frac{d}{dt} kLR = \tau_1 \left[ f \left( \frac{W}{GPL \cdot MP_{L_1}} \right) - kLR \right] \quad (f' > 0)$$

$$\frac{d}{dt} LRR = \tau_2 \left[ f \left( \frac{W}{MP_{L_2}} \right) - LRR \right] \quad (f' > 0)$$

$$MP_{L_1} = \frac{(1-\alpha)Q}{L_1}, \quad MP_{L_2} = \eta \frac{\alpha(1-\alpha)Q}{R + \eta L_2} - N$$

이는, <그림 1>의 하단부의 자본투자를 통해 기술투자자와 진보가 이루어지고, <그림 2>의 노동시장에서  $Wage \rightarrow LRR \rightarrow MP \text{ of } L_2 \rightarrow Wage$  라는 새로운 피드백이 추가되어, 노동 및 기술인력 시장의 균형과 기술진보를 내생화시킨 완전균형을 가능하게 한다.

#### 4. 환경-지식경제 통합모형

환경부문의 모델링은 1) 경제활동에 따르는 환경오염물질의 생성과 환경영향, 제거, 사전차단, 2) 1)의 경제시스템으로의 피드백, 3) 정부의 환경규제 및 정책 등을 고려한다.

우선, 경제활동에 따르는 환경오염물질의 생성  $P$  는 경제활동과 오염물질의 사후 혹은 사전처리  $B$  에 관한 함수로 표시할 수 있다. 즉,

$$P = B \cdot Y^\beta \quad (\text{단, } B = (A_e \cdot K_e^\gamma \cdot L_e^\theta)^{-1})$$

여기서  $L_e, K_e, A_e$  는 각각 공해저감 섹터에 관련된 인력, 자본, 기술수준을 의미하며, 자본투자에 관한 변화방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} K_e = \tau_3 \cdot i_e - \tau_4 \cdot K_e \quad (A_e = \delta_1 \cdot A)$$

여기서, 사전/후처리 기술  $A_e$  는 전체 기술수준에 비례한다는 가정을 취하며, 환경투자  $i_e$  혹은  $I_e$  는 규제와 오염물 발생량의 함수로 가정한다. 한편, 오염물질의 생성/저감에 따른 환경질  $E$  의 변화와 그 피드백인 총생산  $Q$  및 총수요  $Y$  함수는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} E = -\tau_5 P + \delta_2 E$$

$$Q = K^\alpha (AL_1)^{1-\alpha} \cdot f(E) \quad (f' > 0)$$

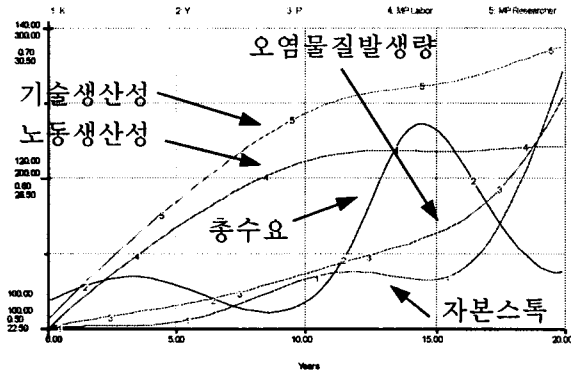
$$Y = C + I + I_e + N + G + (EX - IM)$$

여기서  $L_e, K_e$  는 경제시스템의  $L, K$  로 총합되어, 공해발생 및 저감에 대해 경제시스템과의 상호작용 혹은 피드백의 모델링이 가능하다.

한편, 정부의 환경규제 혹은 정책변수는 시스템 외생변수로 취급하여 정책필스가 시스템의 동적 행태에 미치는 영향을 테스트하는 것을 목적으로 한다. 환경보전을 위한 정부 정책은 배출허용 기준(Emission Standard)과 같은 직접 규제, 공해세(Emission Tax)와 같은 간접규제, 그리고 배출권거래제(Tradable Emission Permits)와 같은 다양한 수단들이 존재[6]하며, 본 모형에서는 배출허용기준  $ES$  를 부과했을 경우와 공해세나 배출권거래와 같은 간접적 수단  $Tax_e$  에 대한 테스트를 고려한다. 전자의 경우, 시스템에서 외생변수로 취급된 배출 허용기준에 따라 환경투자가 결정되며, 후자는 경제시스템에서 세후소득에 의해 총소비가 결정되므

로, 환경투자의 피드백은 경제성장의 총투자에 대한 제약조건이 되는 것으로 이해할 수 있다.

### 5. 시스템 행태에 관한 고찰과 결론



<그림 3> 시스템 행태의 Numerical Example

이상과 같이 개발된 모형을 한국경제에 적용하는 과정에서 한국경제의 특징을 나타내는 일련의 파라미터에 의한 베이스런 실험결과는 <그림 3>과 같다. 기본 시스템 행태는 경기변동과 성장을 나타내고 있으며, 기술수준과 기술생산성의 증가는 노동생산성을 상회하면서 기술집약적으로 진행함을 의미한다. 오염물질의 경우 정책이 없는 경우 빠른 속도로 증가하므로 정책적 노력이 요구되며, 정책실험은 추후 연구과제로 남기고자 한다.

### 참고문헌

[1] Aghion, P & P. Howitt (1998), *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press  
 [2] Hartwick, John M.(1998), "National wealth, constant consumption and sustainable development," in *The international yearbook of environmental and resource economics 1997/1998: a survey of current issues*, Edward Elgar Publishing Limited, pp.55-81.  
 [3] 정희성, 강만옥, 임현정, "지속가능성 평가

를 위한 지역생태-경제 모형개발 연구 I", KEI 2002 RE-01, 한국환경정책평가연구원, 2002. 12.

[4] 조승헌, Rob Dellink, 장현정, 강광규, 강상인, 김용건, "경제-환경 연관분석을 위한 Dynamic CGE 모델 개발", KEI 2001 RE-11, 한국환경정책평가연구원, 2001. 12  
 [5] 강상인, 김태완, 한화진, 강광규, 최대승, "환경부문을 고려한 국제무역과 내생적 지속성장 모형 연구", KEI 2000 RE-04, 한국환경정책평가연구원, 2000. 12  
 [6] 정영근, "거시환경경제 모형의 개발에 관한 연구 1, 2", KEI 1998 RE-02, 1999 정책 WO-03, 한국환경정책평가연구원, 1998, 1999.  
 [7] 최진석, 장기복, 문현주, 김광임, "디지털 경제의 발전에 따른 환경정책 과제와 대응방안", KEI 2002 RE-02, 한국환경정책평가연구원, 2002. 12.  
 [8] Saeed, K., "Sustainable trade relations in a global economy," *System Dynamics Review*, Vol. 14, pp. 107-128.  
 [9] Arif, M. and K. Saeed, "Sustaining economic growth with a nonrenewable natural resource: the case of oil-dependent Indonesia," *System Dynamics Review*, Vol. 5, pp.17-34.  
 [10] Parayno, P. and K. Saeed, "The dynamics of Indebtness in developing countries: the case of the Philippines," *Socio-Economic Planning Science*, Vol. 27, No. 4, pp239-255.  
 [11] Randers, J., "From Limits to Growth to Sustainable Development or SD (Sustainable Development) in a SD (System Dynamics) Perspective," *System Dynamics Review*, Vol. 16, No. 3, pp213-224  
 [12] Fiddaman, T., "Exploring Policy Options with a Behavioral Climate-economy Model," *System Dynamics Review*, Vol. 18, No. 2. pp243-267