

# 경제성장에 대한 본원적 구조와 지속가능 내생적 성장이론에 대한 시스템 다이내믹스 모델링

## System Dynamics Modeling for the Generic Structure of Economic Growth and the Sustainable Endogenous Growth Theory

전대욱\* · 김지수\*\*

Jeon, Dae-Uk\* · Kim, Ji-Soo\*\*

### Abstract

This paper revisited the key advances on System Dynamics modeling about traditional macro-economic models and economic growth structures, and then tries to elaborate a new model based on the endogenous growth theory that incorporates new growth factors, relevant to knowledge/technology as well as the Environment, into traditional growth models. Accordingly, the new model augments the acceleration and multiplier loops and the balancing ones representing market clearing mechanism with a simple numerical example. The authors thus provides macroeconomic System Dynamics analysts with a milestone to model macro-economic structures reflecting on traditional and cutting-edge theories on sustainable economic growth and general equilibrium modeling.

**Keywords** : 거시경제 시스템 다이내믹스 (System Dynamics in Macroeconomics), 내생적 성장이론 (Endogenous Growth theory), 지속가능발전 (sustainable development), 일반균형 모형 (general equilibrium modeling), 기술/지식스톡 (knowledge/technology), 경제성장의 본원적 구조 (generic structures of economic growth)

\* (주)퓨처인포넷 교육사업부문 C.K.O. (제1저자, dujeon@zenedu.com)

\*\* 한국과학기술원 금융전문대학원 교수 (공동저자, jskim@business.kaist.ac.kr)

## I. 서론

경제의 성장을 설명하기 위해서 전통적인 경제학에서는 자본과 노동이라는 두 가지 가치창출 요인을 제시하여 왔다. 그러나 20세기 후반에 들어서면서부터 자본 팽창의 질적인 측면을 논하기 시작하였고, 그 결과로 자본과 노동 외의 외생변수로 취급되던 요인들이 경제성장에 있어서 핵심적인 과제로 부각되었다. 현재까지 활발하게 논의되고 있는 것들은, 첫째 기술적 진보라는 성장에의 동인(Aghion et al., 1998)과, 둘째 지속가능발전의 패러다임이 대두되면서 등장한 환경적인 요인(Pezzy, 1992; Daly, 1991), 셋째 사회문화적인 가치창출 요인(Bourdieu, 1985; Fukuyama, 1995) 등으로 대별될 수 있다.

이러한 움직임과 함께 20세기 후반부터 거시경제학과 경제성장론에 있어서의 주된 화두는 기술적 진보를 성장모델로 내생화시키는 문제였고, 그 결과로 1980년대 후반부터 신습페테리안에 의한 “내생적 경제성장론(Endogenous Growth Theory)”을 중심으로 지식(기술)스톡이 경제성장에 미치는 영향에 관한 모델링(Romer, 1986, 1990; Segerstrom et al., 1990; Aghion et al., 1992)이 시도되면서 거시경제학의 새로운 교과서가 탄생하였다. 아울러 “환경경제학”의 세 이론가들을 중심으로 경제의 외부성 혹은 외생변수로 인식되어 온 환경부문에 대한 내생적 모델링(Stokey, 1995; Michel et al., 1996; Musu, 1994)과 지속가능성에 대한 논의가 활발하게 이루어졌다. 한편 사회학과 문화경제학 등의 분야에서는 지역사회의 성장과 지속가능성에 있어서 경제적인 요인에 영향을 미치는 문화적인 가치창출 요인과 사회의 안정성, 친밀성 등에 대한 연구(Schafer, 1994; Hirsch, 1986)가 제기되기 시작하였다.

System Dynamic 분야에서도 지식스톡, 환경의 질과 삶의 질, 문화 및 사회자본 등의 변수들이 포함되는 모델링(정희성외, 2006; Patterson et al., 2004; Boumans et al., 2002)이 다분히 시도되고 있는데, 대부분의 모델링이 이에 관련된 일부 변수를 기존 모형에 확장시키는 정도의 시도라고 볼 수 있다. Boumans et al.(2002)은 234개의 level variable이 포함된 글로벌 모델인 GUMBO를 제안하면서 세 가지 환경매체와 생태계, 사회 및 경제자본 등이 모두 포괄된 모델링을 보인 바 있는데 최초로 Social Network에 대한 시스템 다이내믹스 모델링으로서의 의미를 지닌다. 한편 Patterson et al.(2004)의 모델에서는 이러한 social capital에 대한 모델링을 구체적으로 ‘network’과 ‘norm’으로 분리하여 시도하면서 보다 이론적인 정교함을 추구하였으며, social capital에 대해 국내에서의 최초의 시도라고 할 수 있는 정희성외(2006)의 연구에서는 문화자본의 의미로서 지역사회의 상대적인 명성이나 urban model에서의 거주매력도와 피드백 되는 구조를 통해 경제 혹은 환경적인 요인들과 결합된다.

그러나 이러한 모델링이 거시적인 시각으로서 환경, 사회, 경제 등을 결합하는 시도들을 보이고 있음에도 불구하고, 대체로 작은 지역공동체를 대상으로 하거나 너무 추상적인 글

로별 수준에서의 분석이므로, 오히려 국가단위의 거시경제적인 메커니즘을 충분히 소화하고 있다고 보기는 어렵다. 특히 정책분석이나 개별산업 수준의 분석을 행함에 있어서 개별 시장 단위의 모델링은 쉽게 접근할 수 있지만, 그것이 전체 거시경제와 어떻게 상호작용하는지를 충분히 고찰하기 위해서는 일반균형에 입각한 거시경제의 이론적 성과를 엄밀하게 반영할 수 있도록 모델링이 필요하다. 그러나 실제로는 학제 간 연구의 어려움 등으로 전통적인 거시적 자본-노동과 소득-생산의 메커니즘이 반영된 모델을 찾아보기는 쉽지 않다.

따라서 본 논문은 거시경제시스템을 주 대상으로, 기존의 거시경제적 모델에서 제안된 일련의 성과를 리뷰하고 아울러 최근의 경제이론—지속가능 내생적 성장이론—에 기반한 모델링을 제안한다. 최근의 연구동향은 앞서 밝힌 바와 같이 환경과 사회문화자본 등에 대한 모델링도 포함되어 있으나, 본 논문에서는 기술변수를 중심으로 한 내생적 성장이론의 모델링에 초점을 맞추고 이와 같은 모델링의 시도를 본 논문의 주요 연구 성과로 제시하고자 한다. 이와 같은 초점은 시스템 다이내믹스 분야에서 그 중요도에 비해 연구가 활발하게 이루어지지 않는 거시경제 모델에 대한 소개 및 리뷰와 함께, 전통적인 그리고 최근 거시경제의 이론을 시스템 다이내믹스의 범위에서 이해할 수 있는 모델을 제안함으로써 실제적인 연구자들의 모델링에 도움을 주고 아울러 이론적인 발전에도 그 시발점의 하나가 될 수 있다는 의의를 지닌다.

## II. 거시경제적 시스템 모델 1 : 투자의 가속도 원리와 소비의 승수효과

System Dynamics 분야에서 경제성장 혹은 거시경제적 모델의 시발점은 물론 Forrester (1961)의 Industrial Dynamics라고 할 수 있으나, 경제성장에 대한 본원적인 구조를 제안한 것은 Low(1980)가 시도한 고전적인 Samuelson-Hicks 모델의 시스템 다이내믹스 모델링이라고 할 수 있다. 즉, 고전적인 Samuelson-Hicks 모델은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} Y_t &= C_t + I_t + G_t \\ C_t &= \alpha Y_{t-1} \\ I_t &= \beta(Y_{t-1} - Y_{t-2}) = \beta Y_{t-1} - \beta Y_{t-2} \end{aligned}$$

여기서 소득 Y는 소비수요 C, 투자수요 I와 정부지출 G와 일치하며, 당기(t)의 소비 C는 전기(t-1)의 소득 Y의 소비성향  $\alpha$  만큼의 일부분이다. 당기(t)의 투자 I는 전기(t-1)와

전전기(t-2)의 총수요 Y의 차이에 비례하는데, 여기서  $\beta$  는 자본-산출계수(혹은 자본화 계수, KOR : Capital-Output Ratio)이며, 총수요 Y가 시간에 따라서 증가한다면 그 만큼을 생산하기 위해 필요한 자본량을 계산하기 위해 자본과 생산 Y의 비율에 대한 상수이다.

이 모델은, 1) Y는 소득, 총수요, 생산이라는 세 가지 플로우가 일치한다는 가정(국민소득 삼면등가의 원칙) 하에 전부 한 변수 Y로 표현되었고, 2) 투자량 I는 명시적으로 모델링 되었으나 자본량은 암묵적이며, 3) 차분방정식 모형이므로 투자가 이루어지는 것이 전전기 (t-2)부터 당기(t)까지의 2기에 걸친 가정에 기초한다. Low의 모델은 고전경제학의 명제인 국민소득 삼면등가의 원칙을 건드리지 않고 투자에 대한 프로세스를 구체적으로 모델링하면서 exponential smoothing으로 차분방정식 모델을 미분방정식 모델로 변환시킨다.

우선 자본스톡 K를 도입하면, 당기(t)와 전기(t-1)의 자본스톡 K의 차이를 전기(t-1)의 투자량 I로 바꿀 수 있고, 투자량 I의 결정은 현재수준의 산출물을 생산하기 위한 자본량 K와 산출물 Y에 대한 미래의 필요총량만큼을 생산하기 위한 이상적인 자본량 DK(Desired Capital)의 차이에 의해서 결정된다. 즉 기존의 모델에서  $\beta (Y_t - Y_{t-1})$ 로 표현된 것(추가되어야 할 생산량만큼을 생산하기 위해 추가되어야 할 자본량)이, 여기서는  $DK - K$ (추후 필요한 생산물 총량을 생산하기 위해 필요한 자본량과 실제 자본량의 차)로 표현된다. 즉,

$$I_t = DK_t - K_t \quad \text{where} \quad DK_t = \beta Y_{t-1} \quad , \quad K_t = K_{t-1} + I_{t-1}$$

아울러 소비성향  $\alpha$  를 PC (Propensity to Consume), 자본-산출계수  $\beta$  는 KOR (Capital Output Ratio)로 이름을 바꾸고, 소비량을 계산하기 위한  $Y_{t-1}$ 을 Friedman의 항상 소득의 개념과 같이 사람들이 인지하는 소득수준(추상적인 stock, exponential smoothing)으로서 AINC (Average Income)를 도입하여 미분방정식으로 모델링한 결과는 다음과 같다:

$$Y = C + I + G$$

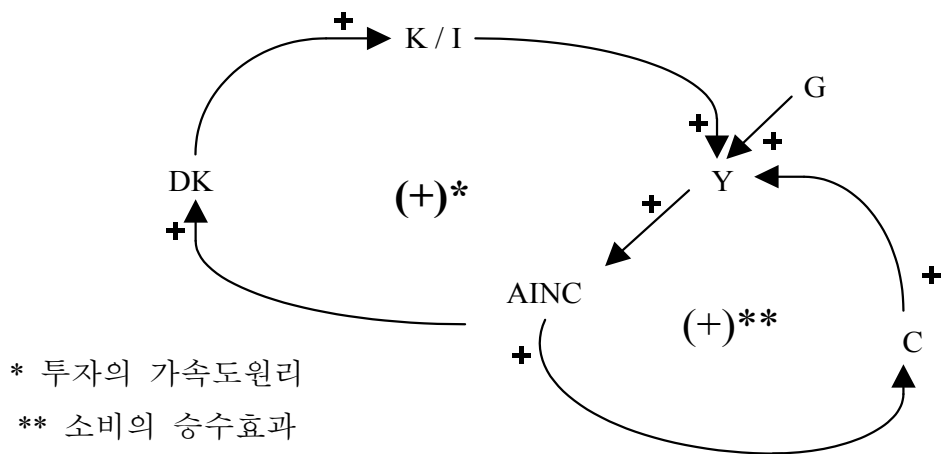
$$C = PC \times AINC \quad \text{where} \quad \frac{d}{dt} AINC = \frac{(Y - AINC)}{TSI}$$

$$I = \frac{(DK - K)}{TAQC} \quad \text{where} \quad DK = KOR \times AINC \quad , \quad \frac{d}{dt} K = I$$

이때 TSI(Time to Smooth Income) 및 TAQC(Time to Acquire Capital)은 exponential smoothing을 위한 시간지연에 관련된 파라미터이다.

이상과 같은 Low 모델은 이론적으로는 매우 간단한 모델이나 시스템 다이내믹스의 연구

자들에게는 다음과 같은 시사점을 준다는 점에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 첫째, Stock 이나 Level 변수들의 변화에 관련된(예컨대 투자와 같은) 내생적 의사결정 과정을 모델링하기 위해 도입되는 Desired Stock/Level을 활용하는 테크닉이 도입되었고, 둘째, 차분방정식 모델에 대해 exponential smoothing을 도입하여 미분방정식으로 치환하는 테크닉이 도입되었으며, 셋째, 이를 통해 [그림 1]과 같은 경제성장의 본원적 구조를 제시하였다는 것 등이다.



- \* 투자의 가속도원리
- \*\* 소비의 승수효과

[그림 1] 본원적 경제성장 모형

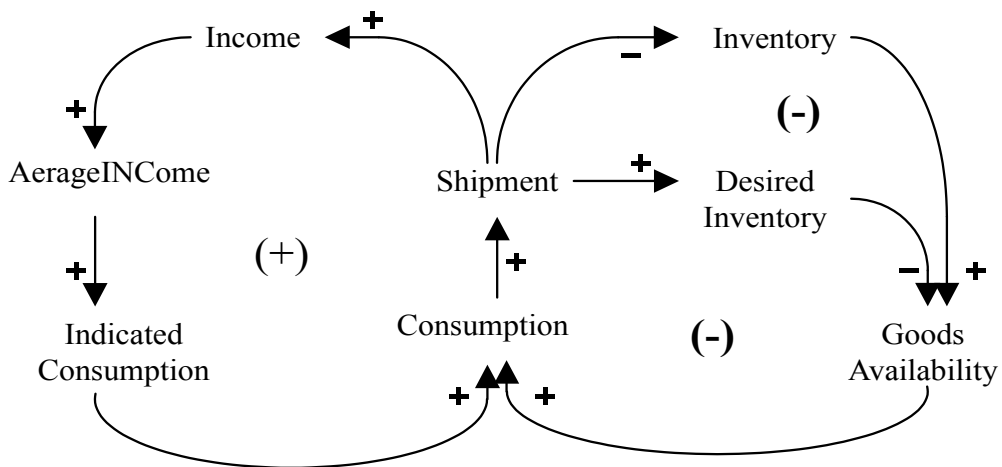
[그림 1]은 소득이 동태적으로 지수적 성장(exponentially growing)하는 구조를 두 개의 reinforcing loops로 표현한 것이다. 고전적 경제이론의 ‘투자의 가속도 원리’와 ‘소비의 승수 효과’로 명명된 두 reinforcing loops는 이후의 경제성장에 대한 시스템 다이내믹스 모델링의 기초가 된다.

### Ⅲ. 거시경제적 시스템 모델 2 : Market Clearing Mechanism 1 - Pricing & Inventory

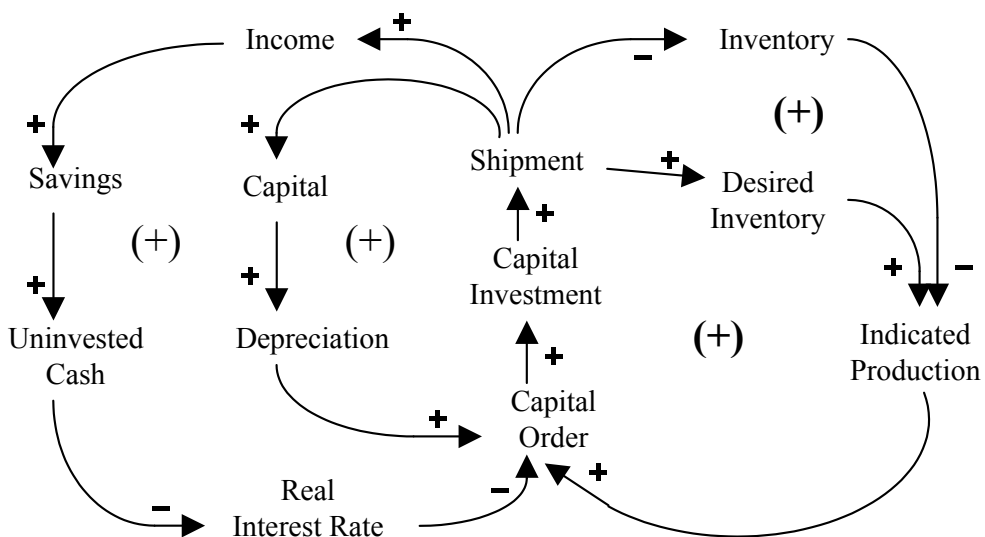
[그림 2]부터 [그림 4]는 Arif & Saeed(1989)의 연구에서 제시된 확장된 성장구조이다. 이러한 확장은 근본적으로 가격에 의한 시장청산 기능을 포함한 본격적인 거시경제적 모델링이 시도된 단계로 볼 수 있다. 성장구조만 제시된 기존의 모형과 달리, 가격에 의한 시장청산 기능을 모델링하기 위해 inventory control과 GPL(General Pricing Level)을 도입하였고, 비로소 성장구조에 대한 시장의 조절기능을 하는 balancing loops들이 결합되면서 가격에 의

한 경기변동 등의 보다 다양한 거시경제적 이슈를 다룰 수 있는 모델이 제시되었다.

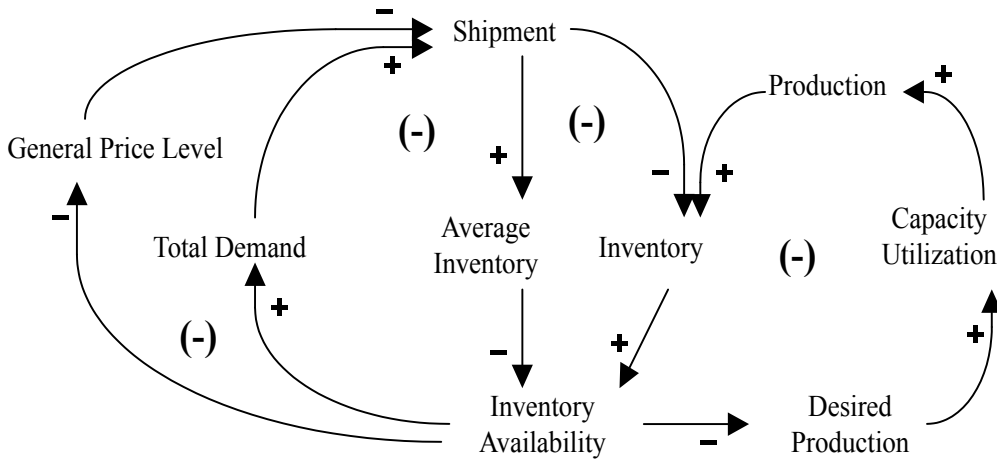
[그림 2]와 [그림 3]에서 소비(출하량, Shipment)의 증가에 따라 재고수준(Inventory)의 감소로 필요생산량(Indicated Production)이 늘고 소비가능량(Goods Availability)이 줄어들므로써 생산증량을 위한 투자량(Capital Order)이 늘려 궁극적으로 생산량을 늘리고, 소비량(Consumption)을 줄임으로써 적정 재고수준(Desired or Average Inventory)로 회귀하려는 시장 청산기능을 표현하고 있다. 마찬가지로 [그림 4]에서 재고수준의 변동은 총수요(Total Demand)와 물가수준(General Price Level)로 피드백 됨으로써 재고수준을 회귀시킨다.



[그림 2] 확장된 소비의 승수효과 메커니즘



[그림 3] 확장된 투자의 가속도원리 메커니즘



[그림 4] 가격에 의한 시장청산 기능

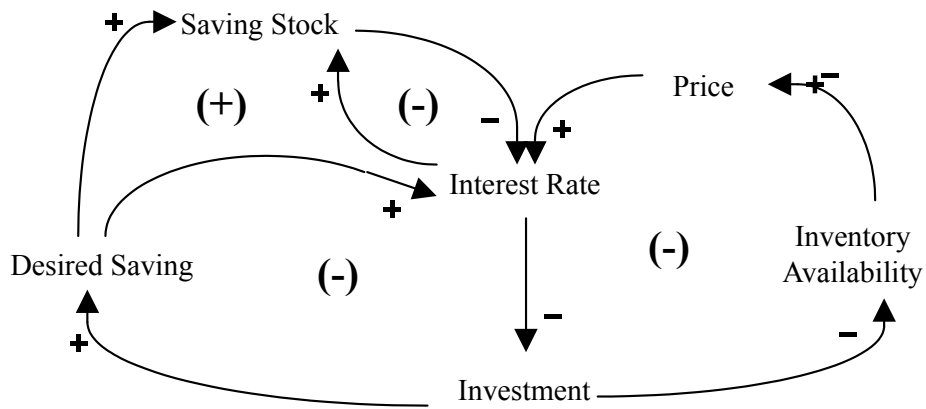
[그림 3]에서는 자본량의 물리적 소멸 혹은 감가상각(Depreciation)에 대한 확장이 관찰되며, 또한 저축스톡(Saving Stock 및 Uninvested Cash Pool)의 도입을 통해 자본시장에 대한 확장이 시도된다. [그림 4]에서는 또한 생산함수를 명시적으로 도입하고 이를 통해 생산(Production)에 의한 공급과 총수요(Total Demand, 투자수요, 소비수요, 정부지출 등의 총합)에 의해 재고수준이 변동되는 것을 묘사함으로써, 생산에 필요한 노동과 자본시장 등의 요소시장에 대한 확장이 시도되고 있다. 생산함수, 실물시장, 자본시장, 노동시장 등의 명시적인 도입에 대해서는 다음 장에서 자세히 논한다.

#### IV. 거시경제적 시스템 모델 3 : 생산물 시장과 요소시장들의 일반균형 메커니즘

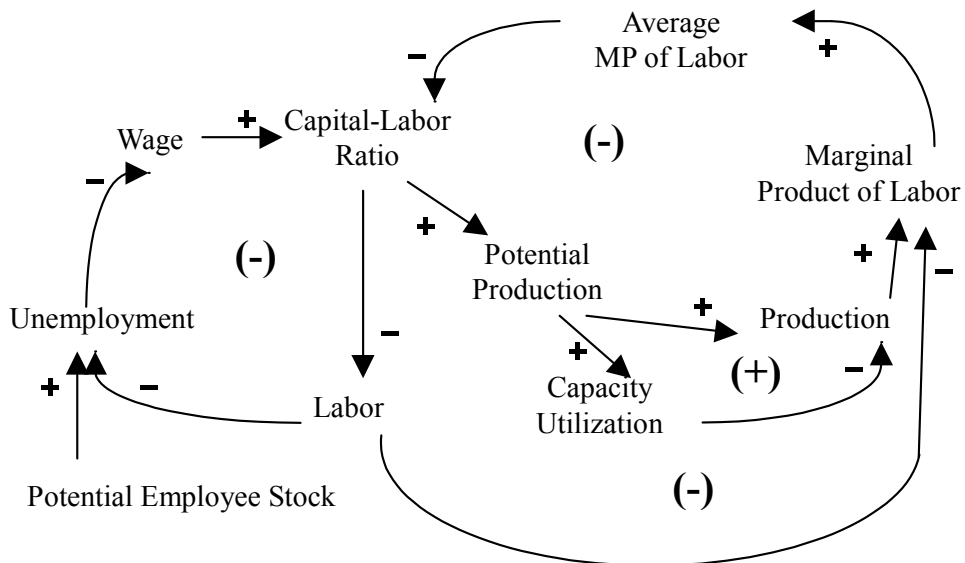
경제학에서의 일반균형(General Equilibrium)은 여러 개의 시장이 동시에 청산되는 것을 의미하는데, 기본적으로 System Dynamics 경제모델은 이러한 일반균형을 전제로 하나 이를 표현하기 위해서는 별도의 모델링이 필요하다. 왜냐하면 System Dynamics 경제모델은 여타의 경제학 모델과 달리 불균형 모델이기 때문이다.

예컨대 CGE(Computational General Equilibrium) 모델은 당기에서의 Flow와 차기의 Stock의 변화를 계산하는 과정에서, 각 시장의 불균형들이 당기에 해소된다는 가정 하에 이러한 해소를 위한 가격벡터의 산출을 시도하므로, 당기에 무조건 일반균형이 존재한다(Vennemo,

1997; 조승헌 외, 2001). 그러나 System Dynamics 경제모델에서는 가격 역시 추상적인 Stock 혹은 인지적인 Level variable로 모델링하므로 당기의 수요-공급의 차이들이 당기에 즉각 가격변화를 일으키면서 시장이 청산되는 것이 아니라, 시차를 두고 균형가격으로 수렴하도록 조절된다. 따라서 매 기에 있어서 완전균형이 이루어지는 것이 아니라 불균형에서 시차를 두고 균형으로 수렴한다.

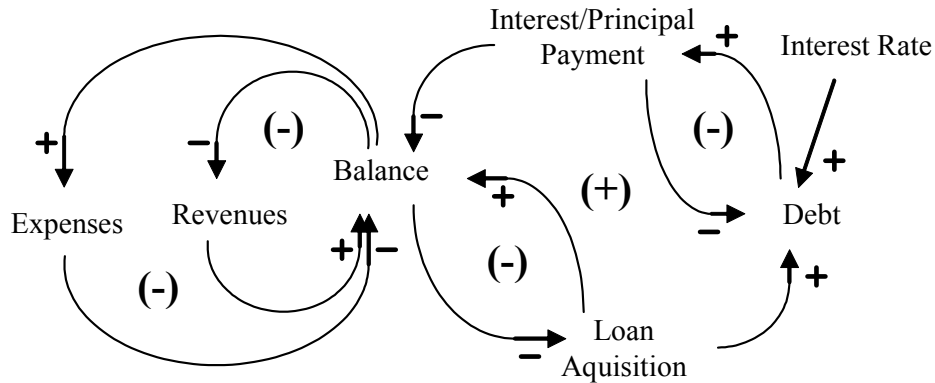


[그림 5] 자본시장의 청산 구조



[그림 6] 노동시장의 청산 구조와 장기적인 자본-노동 결합비율 조정





[그림 7] 개방경제에서의 국제수지 및 외채시장의 청산구조

일반균형에서는 개별 시장에서의 균형과 동시에 전체 시장에서의 균형이 달성되어야 효율적임은 이미 고전적인 경제학에서 제시한 바 있다. 즉, 생산물 시장, 노동시장, 자본시장에서의 각각의 균형이 동시에 달성된다는 것은, 부존자원과 주어진 기술 하에서 ‘노동과 자본의 결합이 이 경제시스템에서 효율적일 때’ 달성된다. 자본과 노동이라는 두 가지 생산요인만이 내재하는 전통적인 경제모형에서 자본시장이 균형일 때, 노동시장이 초과공급이 발생한다면 임금이 하락하면서 평균생산성이 하락하고 장기적으로 노동에 대한 상대가치가 자본보다 하락하면서 노동을 보다 많이 소비하는 방향으로 생산의 조합이 변경되어야 한다.

이러한 과정을 모델링하기 위하여 Arif와 Saeed는 KLR(Capital-Labor Ratio)라는 무형의 수준변수를 도입하여 장기적으로 노동생산성(Marginal Productivity of Labor)과 노동시장의 가격(임금, Wage)을 비교함으로써 KLR을 조정하는 과정을 모델링하고 있다. [그림 5]에서는 자본시장의 청산구조가 자본시장의 가격인 이자율 수준(Interest Rate)의 변화를 통해 표현되고 있고, [그림 6]에서는 노동시장의 Inventory라고 할 수 있는 실업률(Unemployment)에 의해 가격이 조정되는 구조와 함께 임금과 노동생산성의 비교를 통해 장기적으로 자본과 노동의 결합비율(KLR)을 조절하는 루프들이 제시되어 있다. 이상과 같은 일반균형 모델은 모든 Stock의 Flow가 0이 될 때의 연립방정식을 풀어서 시스템의 동적 안정상태(Steady-State)의 분석을 수행할 수 있으며 이로부터 고전적 경제이론과의 정합성과 구조적 타당성을 음미할 수 있다. 이러한 모델의 동적 안정상태에서 생산과 수요, 생산요소의 공급으로부터 창출되는 소득이 일치하는 국민소득 3면 등가의 원칙이 확인된다.

한편 Parayno & Saeed(1993)는 필리핀의 외채부담과 경제성장에 관한 논문에서 개방경제(Open Market) 모델을 제안한 바 있는데, [그림 7]은 개방경제에서의 국제수지(Balance)와 외채스톡에 대한 시장청산 구조가 제시되어 있다. 요컨대 K. Saeed와 그의 제자들에 의해

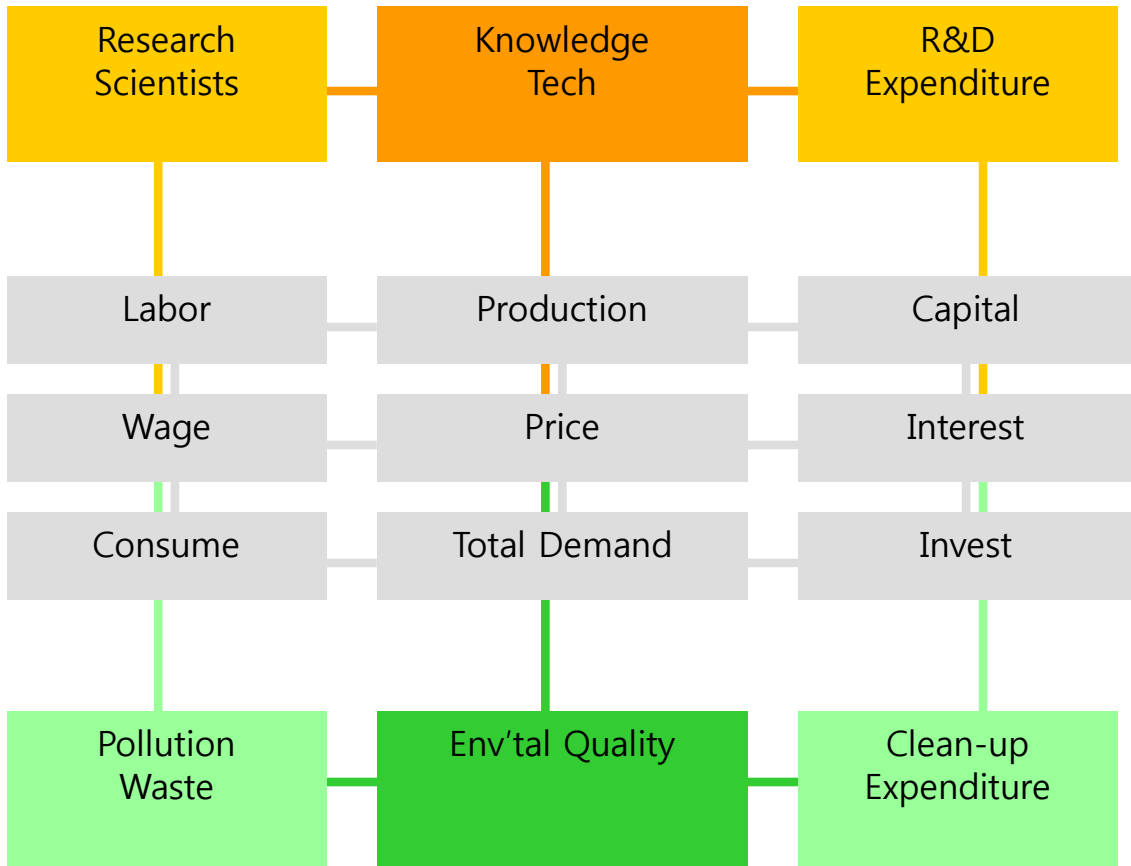
시도된 일련의 거시경제 모델들은 기존의 Low의 고전적 Samuelson-Hicks 성장모델에 시장 청산 기능을 감안하여 보다 풍부한 거시경제 분석을 할 수 있도록 일반균형 모델로 승화시켰다는 데에 의의를 지닌다.

## V. 본 논문의 모델링 1 : 지속가능성과 기술진보에 대한 일반 균형 모델링

내생적 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.

[그림 8]은 Aghion & Howitt(1998)의 주요 논점들로부터 정리된 각 시장과 주요 변수들의 상호작용이 제시되어 있다. 내생적 성장이론은 궁극적으로 지식/기술의 진보를 위해 R&D에 대한 투자수요가 발생하며, 이는 자본재의 형태로 생산에 투입되며 궁극적으로 노동의 질로 생산함수에서 표현된다. 마찬가지로 환경 관련 변수들의 모델링에 있어서도 환경의 질이 생산에 미치는 효과, 각종 소비가 오염물질을 배출함으로써 환경에 대한 피드백, 환경관련 지출이 투자지출에 대한 피드백 등을 고려해야 한다.

따라서 [그림 8]에서 연구개발자(Research Scientists or R&D Worker)는 단순노동자(Labor or Workers)로 분화된 노동시장과 연결되며, 소비는 오염물질의 배출과 연결되고, R&D 투자지출(R&D Expenditure)과 환경관련 지출(Environmental or Clean-up Expenditure)은 투자수요와 연결된다. 마찬가지로 환경의 질과 지식/기술수준이 생산에 피드백 되는 시스템 구조를 볼 수 있다.



[그림 8] 지속가능 내생적 성장에 대한 일반균형 모델링의 System Boundary

## VI. 본 논문의 모델링 2 : 기술진보에 대한 일반균형 모델링

보다 구체적으로 논의를 위해 내생적 성장이론의 수리모델링은 다음과 같다. 즉 본 모델은 경제성장에서의 기술진보의 내생화를 위해, 자본-노동, 즉 K-L결합에 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(Caballero and Jaffe, 1993; Aghion et al. 1998: 85-121). 따라서 거시수준에서 총합된 소비재 Q에 관한 생산함수 혹은 총공급은,

$$Q = L_1^{1-\alpha} \int_0^1 A(i) \cdot k(i)^\alpha di = K^\alpha (AL_1)^{1-\alpha}$$

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(Reinganum, 1989; Aghion et al. 1998: 53-57).

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

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.

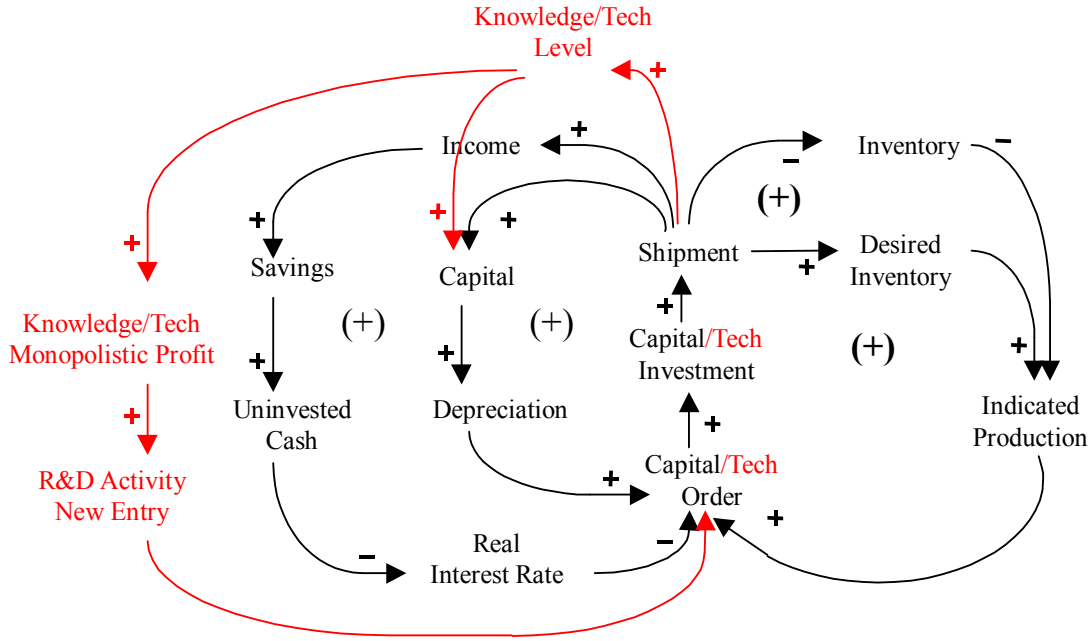
$$\frac{d}{dt} kLR = \tau_1 \left[ f \left( \frac{W}{MP_{L_1}} \right) - kLR \right] \quad (f' > 0) \quad \text{where} \quad KLR = A \cdot kLR$$

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

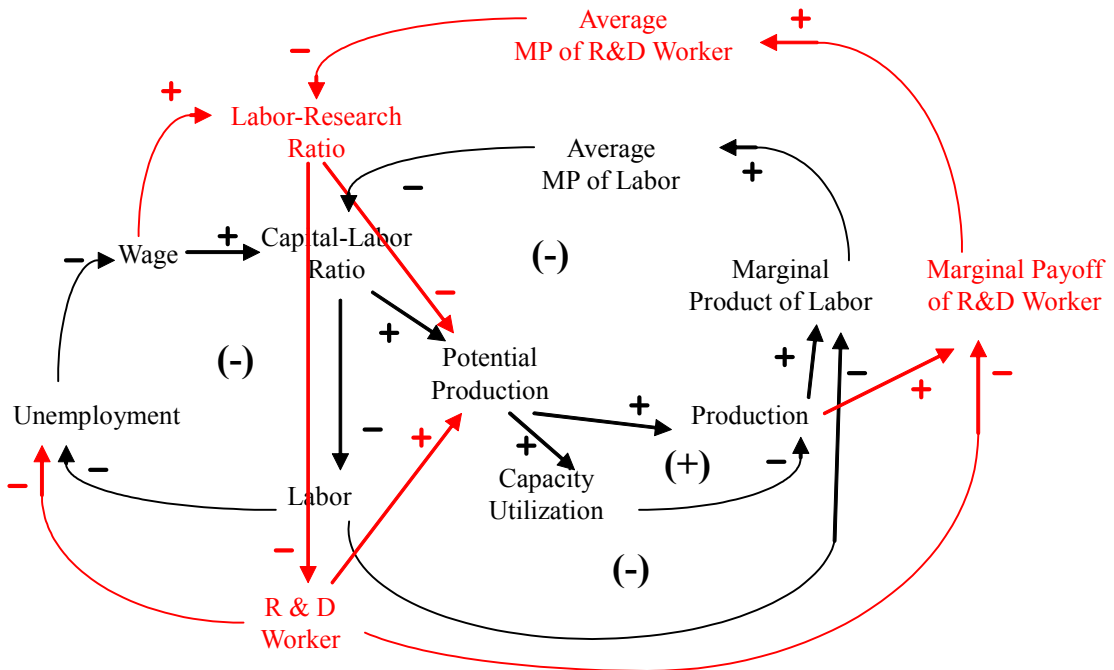
$$MP_{L_1} = \frac{(1-\alpha)Q}{L_1}, \quad MP_{L_2} = \eta \frac{\alpha(1-\alpha)Q}{R + \eta L_2} - \frac{N}{L_2}$$

이상과 같은 모델링은, [그림 3]을 확장한 [그림 9] 및 [그림 6]을 확장한 [그림 10]과 같은 causal loop diagram으로 표현할 수 있다. [그림 9]에서 확장된 부분은 기술/지식 수준 외에 R&D의 성공으로 거두는 독점적 수익(Monopolistic Profit)을 통해 R&D 활동에 투입되는 신규투자(New Entry)를 통해 자본 및 기술에 대한 투자가 이루어지는 피드백들이다. 또한 [그림 10]의 노동시장에서는 연구개발-노동 비율(LRR: Labor-Research Ratio)이 추가되어 지적 노동과 단순노동의 장기적인 변화를 상정한다. 이 그림에서는 Wage @ LRR @ MP of

$L_2$  @ Wage라는 새로운 피드백이 추가되어, 노동 및 기술인력 시장의 균형과 기술진보를 내생화시킨 완전균형을 가능하게 한다.



[그림 9] 기술진보를 내생화한 투자의 가속도원리 메커니즘의 확장구조



[그림 10] 기술진보를 내생화한 노동시장 청산 및 장기적 KLR/LLR 조정구조

## VII. 본 논문의 모델링 3 : 지속가능 내생적성장에 대한 일반 균형 모형

본 장에서는 6장에서 제시한 내생적 성장이론에 대한 모델링에 대해 환경부문을 고려한 모델링을 제시한다. 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,

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

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

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

또한, 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.

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

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

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

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

한편, 정부의 환경규제 혹은 정책변수는 시스템 외생변수로 취급하여 정책펄스가 시스템의 동적 행태에 미치는 영향을 테스트할 수 있을 것이다. 환경보전을 위한 정부 정책은 배

출허용 기준(Emission Standard)과 같은 직접규제, 공해세(Emission Tax)와 같은 간접규제, 그리고 배출권거래제(Tradable Emission Permits)와 같은 다양한 수단들이 존재(Goodstein, 1995; 강상인 외, 2000)하나 이들은 모두 간단한 형태의 외생변수로 모델링이 가능하므로 모델링을 목적으로 하는 본 논문에서는 생략하기로 한다.

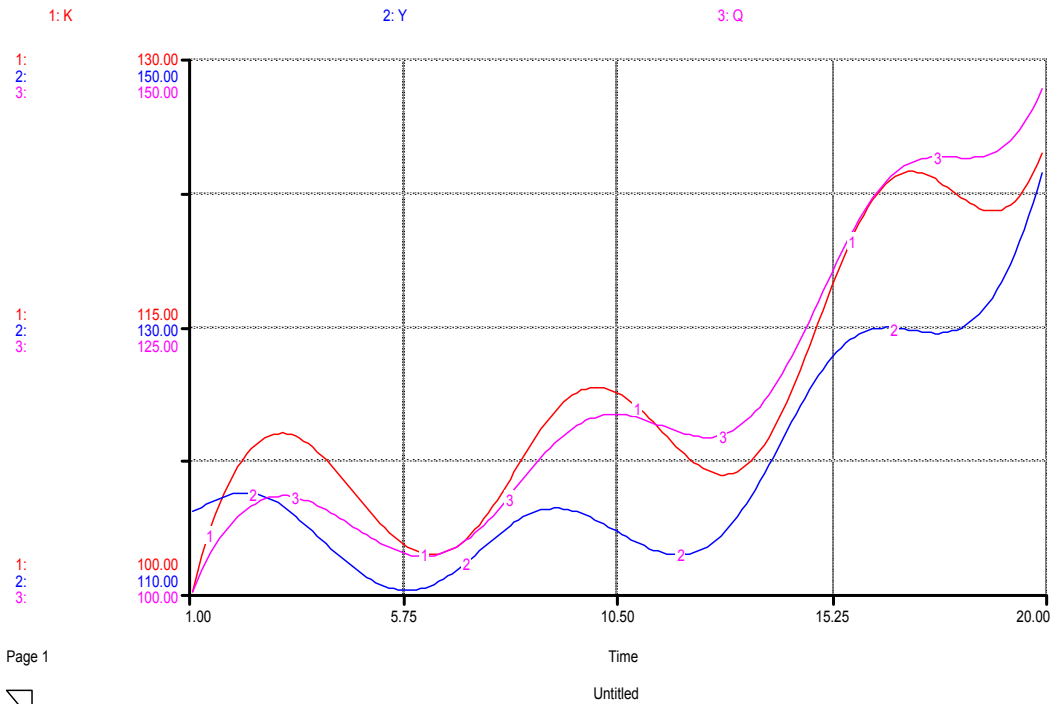
## VIII. Numerical Example : 시스템 행태에 관한 예시와 결론

본 논문의 6장에 제시된 모델을 기준으로 각 입력 값에 대한 임의설정을 통해 간단한 형태의 실험을 진행하였다. 6장의 모델은 기존의 거시경제 모델에 내생적 성장요인인 지식/기술진보를 모델링한 것으로 7장에서 제시된 환경변수를 고려한 행태분석은 추후 연구과제로 남기기로 한다. 이와 같은 시뮬레이션 모델의 수리모형은 부록에 제시되어 있으며, 본 numerical example은 환경부문과 개방경제에 관한 부록 5, 6을 제외한 결과이다.

[그림 11]과 [그림 12]는 6장의 모델에서 각 parameter 및 stock/level variable에 대한 상식적인 수준에서의 설정 값에 기초한 베이스런 시뮬레이션의 결과이다. [그림 11]에서는 자본스톡 (K), 총수요 (Y), 생산량 (Q)의 동적 행태가 제시되어 있고, [그림 12]에서는 지식/기술스톡 (A), 자본-노동 결합비율(KLR), 단순-지식노동 결합비율(LRR)의 동적 행태가 제시되어 있다.

[그림 11]에서 생산량의 변화는 자본스톡의 변화와 같은 행태를 보이고 있지만, 자본축적의 속도보다 생산량의 변화속도가 더 빠르는데 이는 기술진보에 따른 생산량 증가의 효과를 나타내고 있다. 자본/생산과 총수요 모두 경기변동(oscillation mode)을 하면서 장기적으로 기술진보에 의한 지수적 성장(exponential growth mode)의 행태를 보이고 있으며, 총수요의 변동이 자본이나 생산량의 변동보다 조금의 시차를 두고 선행하고 있다.

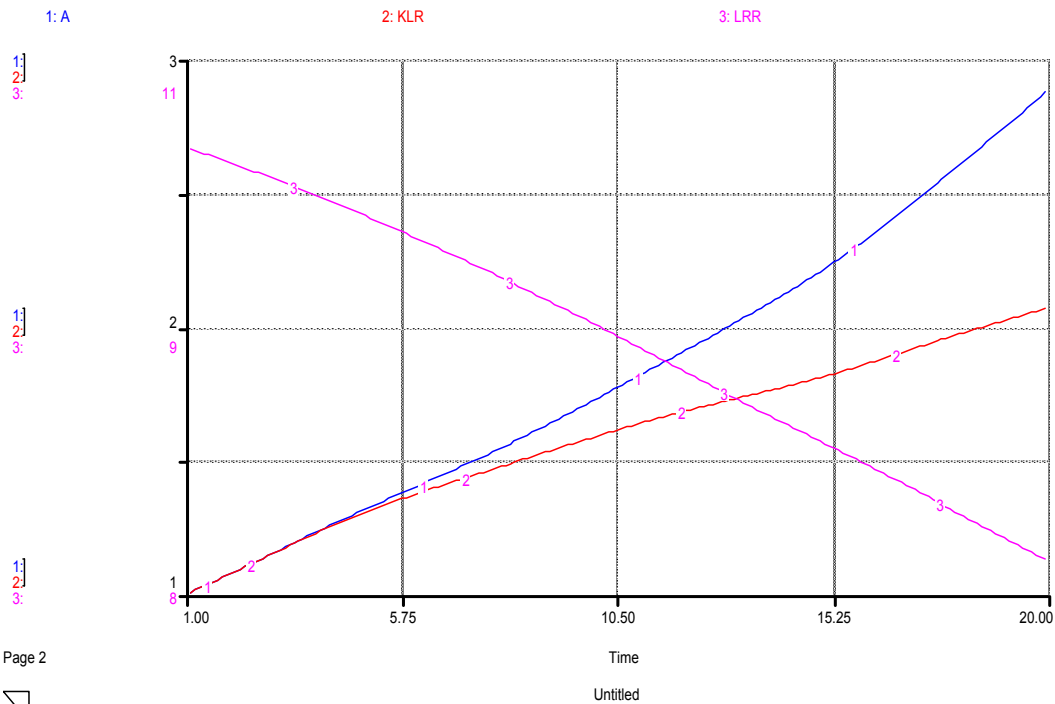
[그림 12]의 자본-노동 결합비율(KLR: Capital-to-Labor Ratio)은 우하향하는 행태를 보이고 있는데, 이는 장기적으로 기술진보가 이루어지면서 노동보다 자본의 투입비율이 증가하는 사실을 반영하며, 마찬가지로 단순-지식노동 결합비율(LRR: Labor-to-Researcher Ratio)의 우하향 행태는 투입노동이 단순노동에서 지식노동으로 전환되는 과정을 묘사하고 있다.



Page 1



[그림 11] 시스템 행태의 Numerical Example I : 자본 (K), 총수요 (Y), 생산 (Q)



Page 2



[그림 12] 시스템 행태의 Numerical Example II : 지식스톡(A), 자본-노동 결합비율(KLR), 단순노동-지식노동 결합비율(LRR)



이상과 같은 간단한 형태의 실험에서 본 논문을 통해 제기된 모델이 일반적인 거시경제적 현상과 내생적 성장이론의 결과들과 일치하고 있으므로 모델의 이론적 엄밀성을 확인할 수 있었으나, 보다 폭넓은 실험과 실제 사례에의 적용을 통해 제시된 모델에 대한 타당성을 검증하려는 노력이 추후 연구과제로 요구된다. 본 논문은 System Dynamics 분야에서 보다 엄밀한 이론적 배경을 갖는 거시경제 혹은 경제성장 모델을 리뷰하고 이를 새로운 이론에 맞게 변형하여 제시하는 데에 그 공헌도가 있다고 할 수 있으며, 보다 정교한 모델의 도출과 타당성의 제고, 아울러 실제사례로의 적용 등은 후속연구의 과제로 남긴다.

## 【참고문헌】

- Aghion, P., P. Howitt, 1992. "A Model of Growth through Creative Destruction", *Econometrica* 60: 323-351.
- Aghion, P., P. Howitt, 1998. *Endogenous Growth Theory*, MIT Press, Cambridge.
- Arif, M., K. Saeed, 1989. "Sustaining economic growth with a nonrenewable natural resource: the case of oil-dependent Indonesia", *System Dynamics Review* 5: 17-34.
- Beltratti, A., 1997. "Growth with natural and environmental resources", in C. Carraro and D. Siniscalco Ed., *New Directions in the Economic Theory of the Environment*, 7-42. Cambridge University Press.
- Boumans, R., R. Constanza, J. Farley, M. Wilson, R. Portela, J. Rotmans, F. Villa, M. Grasso, 2002. "Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model", *Ecological Economics* 41: 529-560.
- Bourdieu, P. 1985. In: Richardson, J. (Ed.), "The Forms of Capital. Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education", Greenwood Press, Connecticut.
- Bovenberg, A., S. Smulders, 1995. "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-section endogenous growth model", *Journal of Public Economics* 57: 1-24.
- Caballero, R. J., A. B. Jaffe, 1993. "How High Are the Giant's Shoulders: An Empirical Assessment of Knowledge Spillovers and Creative Destruction in a Model of Economic Growth", *NBER Macroeconomic Annual*, 15-74. Cambridge, MA: MIT Press.
- Daly, H. 1991. *Steady State Economy*. Beacon Press, Boston.
- Forrester, J. 1961. *Industrial Dynamics*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Fukuyama, F. 1995. *Trust: The Social Virtues and the Creation of Prosperity*. Penguin Books, London.
- Goodstein, E. S. 1995. *Economics and The Environment*. Prentice Hall, NJ.
- Hirsch, P. 1986. "From Ambushes to Golden Parachutes: Corporate Takeovers as an Instance of Cultural Framing and Institutional Integration", *American Journal of Sociology* 91(4): 800-837.
- Low, G. W. 1980. "The Multiplier-Accelerator Model of Business Cycles Interpreted from a System Dynamics Perspective", *Elements of the System Dynamics Method*, MIT Press, Cambridge.

- Michel, P., G. Rotillon, 1996. "Disutility of Pollution and Endogenous Growth", GREQAM, University of Aix Marseille, and MO DEM, University of Paris X.
- Musu, I. 1994. "On Sustainable Endogenous Growth", Fondazione ENI Enrico Mattei Working Paper No. 11.94.
- Parayno, P. and K. Saeed, 1992. "The dynamics of Indebtness in developing countries: the case of the Philippines", *Socio-Economic Planning Science* 27(4): 239-255.
- Patterson T., T. Gulden, K. Cousins, E. Kraev, 2004. "Integrating environmental, social and economic systems: a dynamic model of tourism in Dominica", *Ecological Modeling* 175: 121-136.
- Pezzey, J. 1992. "Sustainable development concept-An economic analysis", World Bank Environmental Paper, No.2. World Bank, Washington D.C.
- Romer, P. M. 1986. "Increasing Returns and Long Run Growth", *Journal of Political Economy* 94(5): 1002-1037.
- Romer, P. M. 1990. "Endogenous Technological Change", *Journal of Political Economy* 98(5) Part 2: 71-102.
- Reinganum, J. F. 1989. "The Timing of Innovation: Research, Development, and Diffusion", In R. Schmalensee and R. D. Willig, eds., *Handbook of Industrial Organization* vol. 1. New York: North-Holland.
- Schafer, D. P. 1994. "Cultures and Economies: Irresistible Forces Encounter Immovable Objects", *Futures-Journal of Forecasting, Planning and Policy* 26 (8), 830-845
- Segerstrom, P. S., T. Anant, E. Dinopoulos, 1990. "A Schumpeterian Model of Product Life Cycle", *American Economic Review* 80: 1077-1092.
- Stokey, N. L. 1995. "R&D and Economic Growth", *The Review of Economic Studies* 62: 469-489.
- Vennemo, H. 1997. "A dynamic applied general equilibrium model with environmental feedbacks", *Economic Modeling* 14: 99-154.
- Xepapadeas, A. 1994. "Long-run growth, environmental pollution, and increasing returns", *Nota di Lavoro* 67.94, Fondazione ENI Enrico Mattei (Milan, Italia)
- 곽태원. 1995. 환경정책 시뮬레이션을 위한 CGE모형, KETRI RE-02, 한국환경기술개발원.
- 강상인, 김태완, 한화진, 강광규, 최대승. 2000. "환경부문을 고려한 국제무역과 내생적 지속성장 모형 연구", KEI 2000 RE-04, 한국환경정책평가연구원, 2000. 12
- 정희성, 전대욱, 2006. "지역의 생태지향적 발전전략 평가를 위한 체계동태모형의 정립과 적용 - 담양군 대나무신산업 육성전략의 파급효과 분석", *한국시스템다이내믹스연구*7(1):

24 「한국 시스템다이내믹스 연구」 제10권 제1호 2009.4

147-172.

조승헌, Rob Dellink, 장현정, 강광규, 강상인, 김용건, “경제-환경 연관분석을 위한 Dynamic CGE모델 개발”, KEI 2001 RE-11, 한국환경정책평가연구원, 2001. 12

## 【부 록 : Endogenous Macroeconomic System Dynamics Model】

In order to change the old AK model into the Endogenous growth and market clearing one, it is assumed that producers of final goods in a competitive market employ manufacturing workers and a continuum of capital intermediate goods produced by monopolists who developed new technologies. This assumption follows one of the endogenous models presented in Chapter 2, 3, and 5 in Aghion et al. (1998).

### 1. Gross production, technology, and total demand

■ Total production:  $Q = L_1^{1-\alpha} \int_0^1 A(i) \cdot k(i)^\alpha di = K^\alpha (AL_1)^{1-\alpha}$

$$Q = K^\alpha (AL_1)^{1-\alpha} = Ak^\alpha L_1^{1-\alpha} = A \cdot k \cdot kLR^{\alpha-1} = K \cdot kLR^{\alpha-1}$$

□ Final output is produced using labor  $L_1$  and a continuum of intermediate goods  $k(i)$  where each  $A(i)$  indicates the productivity of intermediate good  $i \in [0,1]$

□ Each intermediate good is produced according to the constant-returns production fcn  $k(i) = K(i)/A(i)$  where  $K(i)$  is the amount of capital used to produce good  $i \in [0,1]$ : In a symmetric equilibrium,  $k(i) = k \equiv K/A$  for all  $i \in [0,1]$  where the parameter  $A$

indicates the average quality  $A \equiv \int_0^1 A(i) di$

□ Capital labor ratio:  $kLR$  stands for  $k/L_1 = K/AL_1$

■ Knowledge stock  $A$ :  $\frac{d}{dt} A = \sigma \eta L_2 A$

□ Let  $A^{\max}$  denote the maximum of all existing  $A(i)$ 's: Each time an innovation occurs in a sector  $i$ , it creates a new generation of

intermediate good  $i$  with a quality parameter equal to the current value of “leading edge technology”  $A^{\max}$ .

- $\frac{d}{dt} A^{\max} = \sigma \eta L_2 A^{\max}$  : Suppose that the economy-wide frequency of innovation is proportional to the amount of R&D,  $\eta L_2$  where  $\eta$  is a positive parameter of the research technology indicating Poisson arrival rate of innovations to a single research worker and  $L_2$  is the number of the workers.
- Suppose that each innovation is equally likely to occur in any sector (regardless of the preexisting quality of the intermediate good in that sector). Thus the leading edge parameter (in the long run) will be exactly proportional to the average parameter,  $A^{\max} = (1 + \sigma)A$

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

- Total demand:

$$Y = C + I + N + G + (EX - IM), \quad y = c + i + g + n + (ex - im)$$

- $EX, IM, G, Tax$  : exogenously given
- Input to research  $N$  :  $L_2 \equiv n/A^{\max} \equiv N/GPL \cdot A^{\max}$

## 2. Investment and capital market clearing

- Uninvested saving stock:  $\frac{d}{dt} S = R \cdot S + (Y_{DI} + Tax - Y)$

- Interest rate:  $\frac{d}{dt} R = \tau_4 \left[ f_2 \left( \frac{S}{DS} \right) - R \right]$  where  $f_2' < 0$ .

- Investment:  $i = (DK - K)$  where  $\frac{d}{dt} K = \tau_5 i - \tau_6 K$  &

$$DK = \frac{\alpha(in - Din)}{R + \tau_6}$$

- High demand in the final good sector causes to employ more intermediate goods and produce more than before in order to clear the demand. This desired amount of intermediate goods in production to clear the demand  $Dk$  is determined by

$$MP_{Dk} = MC_{Dk} :$$

- $MP_{Dk} = \frac{\alpha \cdot \bar{Q}}{Dk}$  where  $\bar{Q}$  is the desired production quantity to clear the demand

- $MC_{Dk}$  (in producing the final good) = prices of the continuum of intermediate goods produced by monopolists: following their rule  $MR_{Dk(i)} = MC_{Dk(i)}$  and the assumption that each monopolist rents its capital with the market interest rate  $R$ , then monopolists' total cost of producing  $Dk$  is  $R \cdot A \cdot Dk$  plus depreciation of capital  $\tau_6 K (= \tau_6 Ak)$ . Thus monopolists'  $MC_{Dk} = R \cdot A + \tau_6 A$ , which is also equal to the price of intermediate goods.

- Thus  $\frac{\alpha \cdot \bar{Q}}{Dk} = RA + \tau_6 A$ , i.e.  $DK \equiv Dk \cdot A = \frac{\alpha \cdot \bar{Q}}{R + \tau_6}$

### 3. Household income, consumption, and goods market clearing

- General Price Level:  $\frac{d}{dt} GPL = \tau_1 [f_1(Din - in) - GPL]$  where  $f_1' < 0$
- Inventory:  $\frac{d}{dt} in = (Q - \frac{Y}{GPL})$

- Desired inventory:  $Din = i\bar{n}$  where  $\frac{d}{dt}i\bar{n} = \tau_2 \left[ \frac{Y}{GPL} - i\bar{n} \right]$
- Consumption:  $C = \theta \cdot \bar{Y}$  where  $\frac{d}{dt}\bar{Y} = \tau_3 (Y_{DI} - \bar{Y})$
- Disposable income:  $Y_{DI} = R \cdot (K + S) + W \cdot L_1 + \alpha(1 - \alpha)Q - Tax$
- $\alpha(1 - \alpha)Q$ : monopolistic profit flow in the intermediate good sector
  - Monopolists' total revenue: The price of  $k$  is  $MC_k$  in the competitive final good market, thus the revenue of the suppliers of  $k$  is  $MC_k \cdot k = \alpha AL_1^{1-\alpha} k^\alpha = \alpha Q$
  - $MR_{Dk(i)} = MC_{Dk(i)}$  for each monopolist yields that the marginal cost in producing  $k$   $A(R + \tau_6)$  is equal to the marginal revenue  $\frac{\partial}{\partial t}(MC_k k) = \alpha^2 AL_1^{1-\alpha} k^{\alpha-1} = \frac{\alpha^2 Q}{k}$ , thus the total cost in producing  $k$  is  $\alpha^2 Q$  and the profit is  $\alpha Q - \alpha^2 Q = \alpha(1 - \alpha)Q$ .

#### 4. Input to research, labor, and labor market clearing

- Capital-Labor Ratio:  $\frac{d}{dt}kLR = \tau_7 \left[ f_3 \left( \frac{W}{\overline{MP}_{L_1}} \right) - kLR \right]$  where  $f_3' > 0$
- $L_1 = k / kLR = K / (A \cdot kLR)$ ,  $KLR = A \cdot kLR$
- Average Marginal Productivity of labor:  $\frac{d}{dt}\overline{MP}_{L_1} = \tau_8 [\overline{MP}_{L_1} - \overline{MP}_{L_1}]$
- Marginal productivity of labor in the final good sector:
 
$$\overline{MP}_{L_1} = \frac{(1 - \alpha)Q}{L_1}$$



■ Wage:  $\frac{d}{dt}W = \tau_9 \left[ f_4 \left( \frac{u}{\bar{u}} \right) - W \right]$  where  $f_4' < 0$ .

□ unemployment rate:  $u = 1 - \frac{L_1}{\bar{L} - L_2}$  where  $\frac{d}{dt}\bar{L} = \rho \cdot \bar{L}$

□ Average unemployment rate:  $\frac{d}{dt}\bar{u} = \tau_{10} [u - \bar{u}]$

■ Labor-Research Ratio:

$\frac{d}{dt}LRR = \tau_{11} \left[ f_4 \left( \frac{W}{\overline{MP}_{L_2}} \right) - LRR \right]$  where  $f_4' > 0$ .

□  $L_2 = \frac{L_1}{LRR} = \frac{K}{(A \cdot kLR \cdot LRR)}$

■ Average Marginal Payoff of research worker:

$\frac{d}{dt}\overline{MP}_{L_2} = \tau_{12} [MP_{L_2} - \overline{MP}_{L_2}]$

□ Marginal payoff of research worker:  $MP_{L_2} = \eta \frac{\alpha(1-\alpha)Q}{R + \eta L_2} - \frac{N}{L_2}$

□ Let  $V$  denote the discounted expected earning from the next innovation. And the current input to research toward the innovation is  $N/L_2$ . The number of research workers is determined by the comparison of the wage and the expected payoff of a unit time in research ( $\eta V - N$ ).

□ The value  $V$  is determined by the following asset condition:  
 $R \cdot V = \pi - \lambda L_2 V$  where  $\pi$  is the profit flow attainable by the intermediate good monopolist in the future.  $R \cdot V$  is the expected income generated by a license on the next innovation during a unit time interval, and  $\lambda L_2 V$  means the expected capital loss that will occur when the next innovator is replaced by a new

innovator and therefore loses  $V$ .

$$\square \quad V = \frac{\pi}{R + \eta L_2} \quad \text{and} \quad \pi = \alpha(1 - \alpha)Q. \quad (\text{Refer to the last part of 2.3.})$$

## 5. Balance, External Debt, and Government Expenditure

■ Export, import, government expenditure, and tax is given:

$$\square \quad \text{Trade and government balance: } \frac{d}{dt} B_T = EX - IM,$$

$$\frac{d}{dt} B_G = Tax - G$$

□ External debt can be considered if exchange rate  $e$  and international interest rate  $R_e$  can be given:

$$\frac{d}{dt} Debt = R_e \cdot Debt - Service \quad \text{where } Service = f_5(EX - IM), \quad f_5 > 0$$

## 6. Environmental Modeling

■ Environmental quality and pollution generation/abatement

□ Clean-up capital & clean-up knowledge Stock:  $K_e$  and  $A_e$ , respectively (Xepapadeas, 1994; 곽태원, 1995).

$$\square \quad \frac{d}{dt} K_e = \tau_{13} \cdot i_e - \tau_{14} \cdot K_e$$

□  $A_e = \delta_1 \cdot A$  reflecting the idea of Bovenberg & Smulders (1995)

□ Env quality stock:  $\frac{d}{dt} E = -\tau_{14}P + \delta_2 E$  following Beltratti (1997) and Pezzy (1992)

- Pollution/waste:  $P = B \cdot Y^\beta$  referring to Aghion & Howitt (1998)
- Pollution abatement activities:  $B = f_7(A_e, K_e, L_e) = (A_e \cdot K_e^\gamma \cdot L_e^\varphi)^{-1}$ 
  - Clean-up labor  $L_e$ : This is incorporated in order to explain the effect of job creation (and therefore income effect) by environmental investment (곽태원, 1995).
  - $\gamma + \varphi = 1$  or  $\gamma + \varphi \neq 1$ : an empirical test needed
  - Thus,  $P = A_e^{-1} \cdot K_e^{-\gamma} \cdot L_e^{-\varphi} \cdot Y^\beta$

## 7. Environmental Feedback to Economy

- Productivity:  $Q = K \cdot kLR^{\alpha-1} \cdot f_8(E)$  where  $f_8' > 0$
- Utility:  $U = f_9(c, E)$
- Environmental capital investment  $I_e$ :
  - Assume that  $K_e = \frac{k_e}{\delta_1 A}$  and  $k_e$  is also a subset of the continuum of intermediate goods that does not cause productivity in the final good sector.
    - The production fcn remains same as before, but the monopolistic profit of env capital goods and the household income of the clean-up labor  $L_e$  increase.
  - The decision to increase  $I_e$  therefore follows not an economic reason, but regulation such as emission standard  $ES$ . Thus,  $i_e = f_{10}(P | ES, A_e)$  where  $f_{10}' > 0$ 
    - Moreover, in this aggregate model, because the fact that monitoring activities by regulatory authority and penalty schedule of the violation of penalty are negligible, only assume that all producers should and willingly follow the standard.

- Income and total demand adjustment by introducing  $I_e$  :
  - Total Demand:  $Y = C + I + I_e + N + G + (EX - IM)$
  - Assume that the wage of clean-up workers is same as the manufacturing workers'. Consequently, clean-up and manufacturing workers are same and now,  $L_1 = L_m + L_e$  where  $L_m$  stands for manufacturing labor.
  - $Y_{DI} = R \cdot K + W \cdot (L_m + L_e) + \alpha(1 - \alpha)Q + [I_e - (R + \tau_{14})K_e] - Tax$ 
    - Clean-up household labor income:  $W \cdot L_e$
    - The amount of the monopolistic profit of env capital goods is basically determined by the regulation cost, i.e. the minimum cost between clean-up cost and penalty (as in Stranlund, 1997). However, in this model, no penalty is assumed, the profit is thus the income of monopolists minus the rental and depreciation rate of capital i.e.  $\{I_e - (R + \tau_{14})K_e\}$