

# 시스템동학(System Dynamics)을 이용한 국가차원의 모델 개발

이 광석, 최 영명

한국원자력연구소

한 국가의 미래를 설계하기 위해서는 어떠한 형태로든 국가차원의 모델이 필수적이다. 국가차원의 모델은 한 국가를, 풀고자 하는 문제를 중심으로 총체적으로 바라볼 수 있어야 한다. 이러한 모델은 될수록 간단하고, 포괄적이며, 유연하고, 유용하며, 예견적이어야 한다. 이러한 모델의 개발을 위한 방법론으로는 시스템동학(System Dynamics)이 유용하다. 시스템동학은 국가 및 지구적 차원의 모델을 개발하는데 사용된 바 있다. 국가차원의 모델을 개발하는 과정의 이해를 위하여 간단한 국가차원의 환경·경제 모델을 소개한다.

## I 서론

우리는 현재 20세기와 21세기를 가르는 분수령에 서 있다. 많은 학자들이, 20세기가 19세기와는 근본적으로 달랐듯이, 21세기는 근본적으로 20세기와는 다른 모습을 띠 것이라고 예견하고 있다 [3, 7]. 한 국가의 미래는 이러한 분기점에서 어떠한 길을 선택하느냐에 달려 있다. 어떠한 길을 선택하느냐 하는 문제는 미래에 대한 한 국가의 예견과 의지를 의미한다. 선택의 과정은 ①문제의 정의, ②대안의 설정, ③각 대안에 따를 미래의 예견, 및 ④대안의 선택으로 구성된다. 이러한 일련의 과정을 위해서는 한 국가를 통합적으로 바라보는 국가차원의 모델이 필요하다. 저자들은 현재 이러한 국가차원의 모델을 개발중에 있다[4].

본 논문의 목적은 이 국가차원의 모델 개발과정에서 얻은 교훈을 정리하는 것이다. 본 논문에서는,

- 국가차원의 모델을 개발하는데 있어서 유의하여야 할 점들을 경험을 통해 살펴보고,
- 국가차원의 모델링 기법으로 유용한 시스템동학에 대해 간단히 소개하고,

국가차원에서 경제와 환경간의 역동적인 관계를 시스템동학을 이용하여 개발한 간단한 모델을 소개하고자 한다.

## II. 국가차원의 모델

국가차원의 모델이란 한 국가전체를 대상으로 한다. 국가는 개인, 가계, 기업, 비영리기관, 지방자치단체, 중앙정부 등 여러 주체들로 구성되어 있으며, 이들 주체들 하나하나가 내리는 결정에 따라 그 국가의 모습이 결정된다. 이들은 상호 동태적으로 복잡하게 연계되어 있다. 본 장에서는 이러한 국가 시스템의 특성을 살펴보고, 국가차원의 모델이 가져야 할 특성에 대해 토의하고, 개발시 유의사항을 저자들이 겪은 경험을 바탕으로 돌아보고자 한다.

### 1. 국가 시스템의 특성

국가는 여러 주체들이 모여서 이루는 하나의 시스템으로 볼 수 있다. 국가 시스템의 첫번째 특성은 복잡하다는 것이다. 한국의 경우만 하더라도 4천만 이상의 인구에 수만개 이상의 기업 및 기관들이 얽히고 설켜 있다. 이렇게 복잡한 시스템을 어떻게 축약하여 나타내는가 하는 문제 때문에 총체적으로 한 국가를 바라보는 모델을 개발하기가 어렵다.

국가 시스템의 두번째 특성은, 다른 시스템들과 마찬가지로, 공통된 목표를 갖는다는 것이다. 이는 각 주체들이 국가의 일원으로서 우선적으로 공통된 목표를 위해 노력한다는 것을 의미한다. 공통된 목표가 무엇이며, 이들은 어떠한 경로를 통하여 결정되며, 상충되는 목표들은 어떻게 조화되느냐는 문제들은 또다른 토의를 필요로 할 것이다.

국가 시스템의 세번째 특성은 역동적이라는 것이다. 국가 시스템은 한 요소의 변화가 다른 요소에 영향을 주고, 그 요소의 변화는 또 다른 요소에 영향을 주고, 결국은 원래의 요소에 되물려 영향을 주는 수많은 되물림고리 (feedback loop)들로 구성되어 있다. 이는 국가 시스템이 평형 상태에 머물러 있는 것이 아니라 항상 역동적으로 변화하고 있다는 것을 의미한다.

이러한 국가 시스템의 특성은 국가차원의 모델이 최소한 어떤 모습이나 특성을 가져야 하는지를 말해 주며, 국가차원의 모델 개발시 우선적으로 고려되어야 한다.

## 2. 국가차원 모델이 가져야 할 특성

국가차원의 모델은 간단하고, 포괄적이며, 유연하고, 유용하며, 예견적이어야 한다. 이들 특성은 모델을 개발할 때 설계 기준으로 고려되어야 할 것이다.

### 1) 간단성 (simplicity)

국가차원의 모델은 될 수 있는 한 간단하여 이해하기가 쉬워야 한다. 모델이란 분석하기 쉽게 복잡한 현실을 축약한 것이다. 간단할 수 있는 모델이 복잡해지면 그만큼 쓸데 없는 노력을 하는 셈이며, 모델이나 모델의 결과를 사용하는 사람들이 이해하기가 어려워져 모델의 효용성도 떨어지게 된다. 모델의 간단성은, "작은 것이 아름답다 (Small is beautiful)."라는 말과 같이, 모델에 힘을 넣어 주는 활력소라 할 수 있다.

### 2) 포괄성 (robustness)

국가차원의 모델은 될 수 있는 한 많은 분야를 광범위하게 포괄하여야 한다. 일반적으로 이제까지 개발된 국가모델들은 그간 국가시스템이 복잡하다는 이유 때문에, 변수를 양적으로 표현할 수 없기 때문에, 또는 모델 개발자의 전문성 때문에, 국가시스템의 한 분야만을 내생으로 다루고 다른 분야의 변수들은 고려하지 않거나 외생으로 처리하는 경우가 대부분이다. 예를 들면, 인구모델에서는 경제모델에서 구한 국민총생산을 외생으로 두고, 경제모델에서는 인구모델에서 추계한 인구를 외생으로 처리한다. 이렇게 되면, 각 모델의 결과는 일관성을 결여하게 된다. 포괄성은 간단성과는 일면 배치되는 것이기는 하나, 국가의 모습을 제대로 보여주기 위해서는 풀고자 하는 문제에 관련된 중요한 요소들은 모두 포함하여야 한다.

### 3) 유연성 (flexibility)

국가차원의 모델은 국가 시스템의 구조가 변화했을 때 이를 쉽게 반영할 수 있어야 한다. 국가 시스템의 구조는, 장기적인 안목에서 보면, 고정되어 있는 것이 아니다. 따라서, 구조의 변화가 정책 시나리오의 한 부분으로 표현될 수 있어야 한다.

### 4) 유용성 (usefulness)

국가차원의 모델은 어느 누군가가 사용해야만 그 의미가 있다. 예상되는 국가차원 모델의 사용자로는 대통령을 포함한 정책입안자들, 정책 분석가들, 및 각 분야의 전문가들을 들 수 있다. 따라서, 시나리오로 표현되는 각 정책에 따른 효과를 쉽게 볼 수 있어야 한다.

### 5) 예견성(predictability)

국가차원의 모델은 시스템의 구조를 파악하여 그 인과관계를 밝힘으로써 시스템의 행태를 예견할 수 있어야 한다. 예견(predict)와 예측(forecast)은 차이가 있다. 예견은 시스템의 구조를 앞으로써 가능한 것이고, 예측은 시스템의 구조를 파악하기보다는 과거의 연속선으로 미래를 바라보는 것이다. 정책분석을 위해서는 예견적인 모델이 필수적이다.

### 3. 국가차원 모델 개발시 유의사항

복잡하고 역동적인 국가차원 모델의 개발을 위해서는 몇가지 유념하여야 할 사항이 있다. 이는 저자들이 국가차원의 모델을 개발하는 동안 경험한 시행착오에서 다시 한번 깨우친 것들이다.

#### 1) 시스템과 문제의 구별

국가차원의 모델을 개발하다 보면, 자칫 시스템과 문제를 혼동하기 쉽다. 의욕적으로 모델을 개발하려다 보니, 풀어야 할 본연의 문제는 망각하고, 모든 것을 다 포함하는 모델을 만드려고 노력하게 된다. 모델은 우리가 풀려고 하는 문제를 중심으로 개발되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 풀려고 하는 문제를 명확히 인식하고, 점점 더 세부적으로 문제를 정의해 나가야 한다. 문제를 명확히 정의하지 않고 막연히 모델을 개발하게 되면, 결국은 원점으로 돌아와 다시 시작할 수 밖에 없는 경우가 많다.

#### 2) 명확한 목적의 정의

한 모델의 내용은 그 모델의 대상이 같다 하더라도 그 모델을 만드는 목적, 즉 모델을 어디에 어떻게 사용할 것인지에 따라 다른 모습을 띠게 된다[13]. 일반적으로 모델은 목적에 따라 단순히 있는 대상을 묘사하는 데 그치고 어떠한 예견이나 해결책을 제시하지 않는 설명적(descriptive) 모델, 어떤 전제조건을 달았을 때 그로부터 어떤 일이 일어날 수 있는지 알려주지만 최선의 해결책을 제시하지는 않는 예견적(predictive) 모델, 및 문제에 대한 최적해를 제시하는 규범적(normative) 모델세 가지로 분류된다[11]. 많은 경우 모델이 어떻게 누구에게 쓰여질 것인지에 대해 먼저 생각하지 않고 모델을 개발하기 시작한다. 이는 방법론의 선택에 영향을 주게 되어, 발을 매기 위해 총을 들고 나가는 꼴이 되기 쉽상이다.

### 3) 통제가능한 모델로부터 출발

모델은 통제가능한 간단한 수준에서 시작하여 점차 그 범위를 넓혀 나가는 것이 좋다. 처음부터 복잡한 수준에서 시작하면, 자칫 방향 감각을 상실하여 시간과 노력의 낭비를 가져오기 쉽다.

### 4) 방법론의 선택

모델을 개발하는 방법론은 전적으로 풀려고 하는 문제와 모델의 목적에 맞게 선택하여야 한다. 가끔 방법론을 먼저 선정해 놓는 경우가 있으나 이는 선후가 바뀐 것이다. 어디에도 모든 문제, 모든 목적에 맞는 방법론은 없다. 단지 문제와 목적에 가장 맞는 방법론이 있을 뿐이다.

## III. 시스템동학 방법론

### 1. 개요

시스템동학은 여러 요소들이 역동적으로 복잡하게 구성되어 있는 시스템의 종합적인 이해 및 분석을 위한 수리적 기법으로서, 미국 MIT 연구진이 다이내모 (DYNAMO)라는 컴퓨터 시뮬레이션 (simulation) 언어를 1959년 개발함으로써 시작되었다[8]. 시스템동학의 주요 대상이 되는 문제들은 적어도 다음 두가지 특징을 갖는다. 첫째, 시간적으로 변화하는 변수들을 포함한다. 둘째, 변수들간의 되물림고리(feedback loop)가 시스템 행태 (behavior)에 중요한 역할을 한다[12]. 되물림이란 변수들 간의 인과관계가 고리를 저 되돌아 오는 것을 말한다. 되물림은 시스템의 역동적 행태를 일으키는 기본적인 구조라 할수 있다.

### 2. 시스템동학 모델과 계량경제적 모델과의 비교

시스템동학은 수학적으로 말해서 시스템의 구조를 (식 1)과 같이 변수들간의 연립미분방정식 체계로 나타낸다[1].

$$dx(t)/dt = f(t, x, y) \quad (\text{식 1})$$

여기서  $x$  는 수준변수들의 벡터 (vector)를,  $y$  는 보조변수들의 벡터를,  $f$  는 비선형 벡터함수를,  $t$  는 시간을 나타낸다. 시스템동학에서는 파라미터 (parameter)의 정확한 추정보다는 분석대상이 되는 시스템의 구조를 파악하는 것을 더 중요시 한다. 따라서, 시스템동학은 과거 자료의 연속

선으로 미래를 예측 (forecast)하는 것이 아니라 시스템 내의 각 요소간의 상호작용을 밝힘으로써 미래를 예견(predict)한다.

계량경제적 모델은 수학적으로 (식 2)와 같이 평형상태를 가정한 연립방정식체계로 나타낸다.

$$Ay(t) + Bx(t) = \epsilon(t) \quad (\text{식 2})$$

여기서  $y(t)$ 는 종속변수들의 벡터를,  $x(t)$ 는 독립변수들의 벡터를,  $\epsilon(t)$ 는 에러 (error) 값들의 벡터를, A는 종속변수의 계수행렬을, B는 독립변수의 계수행렬을 각기 나타낸다. 계량경제적 접근방법에서는 A와 B의 값을 정확히 구하는데 중점을 둔다. 이와 같이 계량경제적 접근방법은 과거 자료에 의한 파라미터의 결정에 주안점을 두어 변수들의 결과를 나타내 주나 변수간의 인과관계에 대한 설명이 미약하다.

일반적으로 시스템동학은 주관적이고 예견(predict) 지향적이며, 계량경제적 접근방법은 객관적이고 예측(forecast) 지향적이라고 말할 수 있다. 이 두가지 접근방법중 일반적으로 어느 것이 낫다고는 할 수 없다. 방법론의 선택은 풀려고 하는 문제에 달려 있다. 국가발전모델은 시스템의 구조파악과 21세기의 예견에 주안점을 두었기에 시스템동학을 그 방법론으로 선택하였다. 시스템동학은 여러 미래 연구에서 방법론으로 쓰여진 바 있다 [6, 10, 14].

### 3. 모델의 정립 및 분석절차

시스템동학에 의한 시뮬레이션 모델의 정립 및 분석절차는 크게 문제의 정의, 모델의 개념 정립, 모델의 정립, 모델의 행태분석, 민감도분석, 및 정책분석 등으로 구분된다. 이에 대해서는 IV장에서 간단한 예를 통해 알아보기로 한다.

## IV. 시스템동학을 이용한 국가차원 모델의 개발

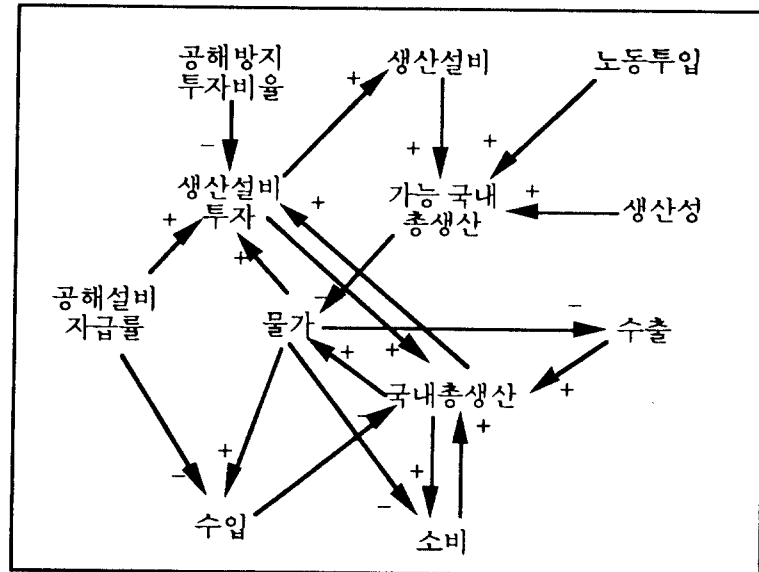
본 장에서는 현재 개발중인 국가차원의 환경·경제모델을 중심으로 시스템동학모델의 개발 절차에 대해 살펴보기로 한다.

### 1. 문제의 정의

이 단계는 관심을 갖고 있는 시스템의 행태, 문제가 되는 증상, 시간범위등을 정하는 것을 포함한다. 환경·경제모델에서 풀려고 하는 문제는 "경제성장에 따른 공해가 심각해지고 있는바, 공해방지투자를 현재의 수준보다 일정수준 늘렸을 때, 향후 30년간 국민경제에 어떤 영향을 미치겠는가?"이다.

### 2. 모델의 개념 정립

이 단계는 모델의 목적, 모델의 범위, 및 인과관계를 정의하는 것을 포함한다. 환경·경제모델의 목적은 공해방지투자수준에 따른 국민총생산과 경제성장률의 변화를 예견하여 보여주는 것이다. 이 모델은 거시경제학의 이론을 바탕으로 공급부문과 수요부문을 포함한다[2]. 모델에 포함되는 주요 변수와 그들간의 인과관계는(그림 1)에 나타나 있다. 인과관계도란 분석 대상 시스템내의 주요 변수들간의 기본적인 인과관계를 단순히 양의 효과(+)와 음의 효과(-)로 나타낸 그래프이다. 양의 효과란 한 변수의 변화가 다른요소의 변화에 같은 방향으로 영향을 주는 것을, 음의 효과는 반대 방향으로 영향을 주는 것을 말한다. 인과관계도는 시스템의 역동적 관계를 간략히 보기 위한 것이며, 이로부터 시스템 내의 되물림고리를 찾아낼 수 있다.



(그림 1) 환경·경제모델의 인과관계도

### 3. 모델의 정립

이 단계에서는 시스템동학의 언어를 사용하여 구체적으로 변수간의 작용관계를 나타낸다. 이는 수준변수들과 증감변수들이 어떠한 형태로 연결되어 있는지를 약속된 기호를 이용하여 상세하게 보여주는 순환체계도를 작성하고 이를 시스템동학 컴퓨터언어를 사용하여 보다 구체적인 방정식 형태로 변환시키는 과정을 말한다. 통상 컴퓨터언어로 다이نام(DYNAMO)을 사용하고 있으나, 아이-씽크(i-Think)와 같이 이 과정을 자동적으로 수행하는 컴퓨터 소프트웨어도 있다. 아이-씽크에서는 순환체계도를 작성하면 자동적으로 이를 방정식 형태로 변환시켜 준다.

### 4. 모델의 행태분석

여기서 모델의 행태 (behavior)란 특별한 정책을 모델 안에 포함하지 않았을 때 얻게 되는 각 변수들에 대한 시뮬레이션 결과를 말한다. 각 변수의 행태를 분석함으로써 각 변수들간의 작용관계를 비로소 파악할 수 있다.

### 5. 민감도 분석

일반적으로 모델 내의 파라미터 값은 실제 현실을 정확히 반영하기 힘들다. 모델을 가지고 정책분석을 하려는 경우 파라미터 값의 변화에 따라 모델이 민감하게 반응한다면 각종 정책대안의 효과를 제대로 파악할 수 없다. 민감도 분석은 파라미터 또는 모델 구조의 변화에 따른 모델의 반응을 파악하는 것이다. 모델이 민감하게 반응하는 경우 모델의 작성상에 오류가 없었는지 규명해야 한다.

### 6. 정책분석

정책분석은 민감도 분석의 한 부류로서, 정책변수의 파라미터 값을 바꾸거나 또는 모델 일부를 바꾸었을 때 얻어지는 모델의 행태와 변경 전의 모델의 행태를 비교 분석하는 과정을 말한다. 정책분석의 목적은 한 정책의 파급효과 경로와 사유를 밝히고 대상문제에 대한 정책대안들을 개발하는 것이다. 환경·경제모델에서의 정책대안은 총투자중 공해방지투자의 비율을 5%, 10%, 15%, 및 20%로 높음으로써 공해방지투자비율을 조정하는 것이다.



## V. 결론 및 토의

본 논문은 새로운 이론을 제창하기보다는 저자들이 모델을 개발하면서 얻은 교훈을 정리하는데 의미가 있다. 국가차원의 모델은 많은 변수들과 그들간의 역동적이고 복잡한 관계를 고려하여야 한다. 따라서, 개발 가능성의 문제때문에 국가차원 모델의 개발에 선뜻 나서기가 힘들다. 그러나, 국가의 미래를 설계하기 위해서는 국가차원의 모델이 필수적이다.

국가차원의 모델은 시나리오를 통한 시뮬레이션의 도구로 사용될 수 있다. 시나리오의 개발과 시뮬레이션을 통해 우리는 과거로부터만 배우는 것이 아니라 미래로부터 배울 수 있는 기회를 갖게 될 것이다[9].

IV장에서 소개된 모델은 현재 개발중인 모델의 일부이다. 현재의 계획으로는 환경오염부문 및 사회복지부문을 더 첨가하여 경제성장, 환경보전, 및 사회복지향상의 조화를 어떻게 이루어 나갈지에 대한 문제를 풀어보려고 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김 영표, 최 성욱, & 정 문섭, *지역간 투자파급효과의 측정모형 개발*, 국토개발연구원, 1988.
- [2] 박 준경, & 김 정호, *한국경제의 다부문모형: 모형구조와 추정결과*, 한국개발연구, 12권, 4호, pp 3-20, 1990.
- [3] Aykroid, Peter H., *A Look at the 21st Century: A Synthesis of National and Regional 21st Century Studies Relevant to Korea, Proceedings of the International Conference on Korea and the World in the 21st Century*, Seoul, 1991.
- [4] Bae, K. H., Choi, Y. M., Jung, G. H., Lee, D., & Lee, K. S., *Korea 2020: A Search for Balanced Future, Proceedings of the 1991 International System Dynamics Conference*, Bangkok, 1991.
- [5] Barney, Gerald O., Kreutzer, W. Brian, & Garrett, Martha J.(eds.), *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog*, Westview Press, 1991.
- [6] Drew, Donald R., *National Reconstruction and Development Model of Lebanon, Proceedings of the System Dynamics Conference*, U.S.A., 1981.
- [7] Drucker, Peter F., *The New Realities*, New York: Harper & Row, 1989.

- [8] Forrester, Jay W., *Industrial Dynamics*, The MIT Press, 1961.
- [9] Godet, Michel, *Scenarios and Strategic Management*, Butterworths, 1987.
- [10] Meadows, Dennis L., Behrens, William W. III, Meadows, Donella H., Naill, Roger F., Randers, Jorgen, & Zahn, Erich K. O., *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen Press, 1974.
- [11] Murdick, Robert G., *MIS: Concepts and Design*, Prentice-Hall, 1986.
- [12] Richardson, George P., & Pugh, Alexander L. III, *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*, The MIT Press, 1981.
- [13] Rothenberg, Jeff, The Nature of Modeling, In: Widman, Lawrence E., Loparo, Kenneth A., & Nielsen, Norman R. (eds.), *Artificial Intelligence, Simulation & Modeling*, John Wiley & Sons, 1989.
- [14] Steering Committee of Taiwan 2000 Study, *Taiwan 2000: Balancing Economic Growth and Environmental Protection*, Institute of Ethnology, 1989.