

시스템다이나믹스의 발전과 방법론적 위상¹⁾
Issues and Methodological Status of System Dynamics

문 태 훈 Moon, Taehoon
중앙대학교 도시및지역계획학과 교수
thmoon@post.cau.ac.kr

Abstract

This paper reviews issues and methodological status of system dynamics and suggest some research agenda for its development in Korea. After reviewing some characteristics of system dynamics approach, including dynamic feedback perspective and endogenous point of view, the paper pointed out methodological characteristics of system dynamics. It seems to be the most notable characteristics of System Dynamics that it use both quantitative and qualitative approach in explaining and modelling reality. Besides, System Dynamicists rely more heavily on refutationism than instrumentalism and this allows System Dynamicists follow more strict way of scientific inquiry. For the development of System Dynamics in Korean academic circle, developing training program and curriculum, networking scattered System Dynamicist all over the country, would be the most important task.

1. 서론

시스템다이내믹스는 1961년 MIT의 Jay Forrester 교수가 산업체 재고량과 노동력의 불안정한 변화, 시장점유율의 감소문제들을 다룬 산업동태론을 발표한 이후 기업경영, 공공정책, 공학, 그리고 각종 인간의 의사결정행위에 대한 이해와 문제해결을 위한 독특한 시각과 방법으로 광범위하게 응용되어 왔다(Forrester, 1961, 1969, 1971; Hamilton, et. al., 1969; Mass, 1974; Sterman, 1987; Darling and Richardson, 1990, Richardson, 1998).²⁾

사실 시스템다이내믹스는 산업분야에 대한 응용을 시작으로 발전되어 왔으며 지금까지도 산업체의 경영전략, 조직, 재고 문제 등에 가장 활발히 적용되고 있는 것이 사실이다. 그러

1) 이 논문은 1998년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

2) 시스템다이내믹스의 개념적인 차원에서의 이해와 방법론상의 유용성에 관해서는 김도훈 문태훈 김동환 (1999), Forrester (1987), Forrester (1980)를, 그리고 시스템다이내믹스에 대한 비판으로서 Legasto & Maciariello (1980)을 참조.

나 시스템다이내믹스의 발전은 초창기에 예상되었던 특정분야 -산업분야- 에 국한된 응용을 초월하는 것으로 이제는 규제완화, 전기공급, 에너지문제, 복지 및 건강문제, 교육, 미래비전의 제시, 방송, 국방, 석유, 환경문제 등 광범위한 이슈들에 활발히 응용되고 있다. 특히 최근 미국에서는 유치원에서부터 중고등학생에 이르기까지 시스템사고와 시스템다이내믹스를 활용한 교육을 위하여 각종 교육프로그램의 개발과 적용노력(K-12 project) 이 활발히 전개되고 있어 시스템다이내믹스의 활용분야는 더욱 광범위해지고 있다.

그러나 국내에서 시스템다이내믹스에 대한 연구는 산발적으로 이루어지고 있을 따름이었고 연구결과의 공유는 네트워킹의 부족으로 심히 제약된 상황이었다. 이런 의미에서 1999년 8월에 창립되어 이제 4년째를 맞이하고 있는 한국시스템다이내믹스는 네트워킹을 통한 연구결과의 활발한 교류를 가능하게 해 주고 있어 앞으로 발전이 기대된다. 그러나 시스템다이내믹스에 대한 이해의 정도는 아직 일천하며 시스템다이내믹스의 방법론적 위상에 대해서는 여전히 많은 논의가 국내외적으로 전개되고 있다.

이러한 맥락에서 시스템다이내믹스의 방법론적 위상에 대해 재검토해 보는 것은 의미있는 일이라 생각된다. 이를 위하여 이 글은 우선 시스템다이내믹스의 연혁과 특징들을 살펴보고, 시스템다이내믹스의 방법론적 위상을 질적, 양적 접근방법 그리고 도구주의와 반증가능주의 논쟁의 맥락속에서 비판적으로 검토해 보고자 한다. 그리고 마지막으로 시스템다이내믹스의 연구와 활용동향을 살펴봄으로써 한국에서의 시스템다이내믹스 연구와 적용에 시사점을 찾고자 한다.

2. 시스템다이내믹스의 관점과 특징

시스템다이내믹스(System Dynamics, 체계동태학)가 무엇인지 한마디로 설명하기는 쉽지 않지만 대체로 다음과 같은 정의가 가능하다고 본다. 즉, 시스템다이내믹스는 동태적이고 순환적 인과관계의 시각으로(dynamic feedback perspective) 현상을 이해하고 설명하거나, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모델을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변해 나가는지를 컴퓨터상에서 실험해 보는 방법론이자 현상을 바라보는 시각이며 준거틀(framework) 이다. 후에 상술하겠으나 위 설명에서 앞부분은 시스템다이내믹스의 질적접근방법을, 뒷부분의 설명은 양적접근방법을 말하고 있다.

시스템다이내믹스는 “시스템”이란 용어 때문에 그 이론적 연원과 방법론적 기반에 대하여 기존의 체제이론과 여러 가지 혼란을 야기한다. 사실 시스템다이내믹스라는 용어는 체제분석(system analysis)이나 일반체제이론(general system theory)에서 파생된 용어가 아니다. 시스템다이내믹스는 컴퓨터기술의 발전, 컴퓨터모의실험, 전략적의사결정, 그리고 피드백사고에서 출발한 것이다. 이러한 이유로 일부 컨설팅 회사와 논자들은 시스템다이내믹스 대신에 기업다이내믹스(business dynamics), 피드백다이내믹스(feedback dynamics), 사회다이내믹스(social dynamics)로 지칭하기도 한다(Richardson, 1998).

Richardson은 시스템다이내믹스가 이어받은 두가지 학문적 근원으로 사이버네틱스

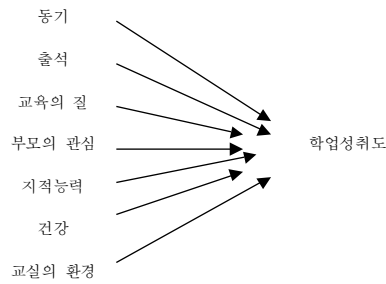
(cybernetics)와 서보메커니즘(servomechanism)의 전통을 들고 있다(Richardson, 1991). 사이버네틱스 이론은 통신과 통제에서 피드백의 역할을 강조하는 이론체계이며 서보메커니즘은 동태적 행태에서 피드백 루프의 역할을 강조하는 이론체계이다. 시스템다이내믹스는 서보메커니즘의 학문 계열안에서 강조하는 양의 피드백루프의 중요성과 컴퓨터 시뮬레이션이라는 엄격한 접근방법의 중요성을 받아들여 발전시켰다. 양의 피드백루프와 모델링에 관심을 갖는 서보메커니즘 계열의 연구방식이 포레스터의 『산업동태론』으로 흡수된 것이다(김도훈 문태훈 김동환, 1999:48-49).

이 접근방법의 특징은 첫째, 연구하고자 하는 특정 변수가 시간의 변화에 따라 어떻게 동태적으로 변화해 나가는가에 기본적인 관심을 둔다. 즉, 산업체 고용인력의 증감, 도시의 번영과 쇠퇴, 의료보험 비용의 급격한 상승 등 연구 대상 변수의 시간에 따른 동태적인 변화가 어떻게 일어나고 있으며, 또 앞으로는 어떻게 변화해 갈 것인가에 대해 관심을 둔다는 것이다. 따라서, 시스템다이내믹스는 일회적인 사건이나 모델 파라미터의 정확한 측정이나 변수의 추정 값을 구하기보다는 관심의 대상이 되는 변수가 시간의 흐름에 따라 어떤 동태적인 변화의 경향 --안정적, 불안정적 경향, 상하 주기적인 변동, 성장, 쇠퇴, 평형상태의 유지 등--을 보이는지에 보다 큰 관심을 둔다(Meadows,1980:31-36).

둘째, 모든 현상을 내부순환적 환류체계(closed loop thinking, circular feedback system)의 관점에서 이해한다는 것이다(김도훈 문태훈 김동환, 1999:36, High Performance, 1994:25-26). 즉, 어떤 변수의 동태적인 변화를 시스템내부에 존재하는 변수들과의 원형의 역동적인 상호작용(circular causation, two-way causation or feedback)에 의하여 일어나는 것으로 파악한다. 이때 시스템은 일반적 체제이론에서 말하는 시스템과는 다른 개념을 가진다. 여기서 시스템은 연구대상의 변수가 동태적 변화를 일으키는데 관련되는 모든 변수들의 집합체를 의미한다. 이러한 체제에서는 기존의 개방체제와 폐쇄체제의 구분은 더 이상 의미를 갖지 못한다. 따라서 변수의 동태적 변화는 시스템 내부의 원인에 의하여 발생하는 것이지 시스템 밖의 외부변수에 의해서 발생하는 것이 아니게 된다. 이런 의미에서 시스템다이내믹스는 내부순환적, 또는 내부지향적 관점(endogenous point of view)을 가지며, 관련된 변수들이 일방향의 단선적인 영향을 주는 것이 아니라 원형의 인과관계에 의하여 동태적인 상호작용을 하고 있는 것으로 파악하기 때문에 원형의 피드백 관점을 가진다(Richardson, 1982:1-2; Meadows, 1980:30-31).³⁾

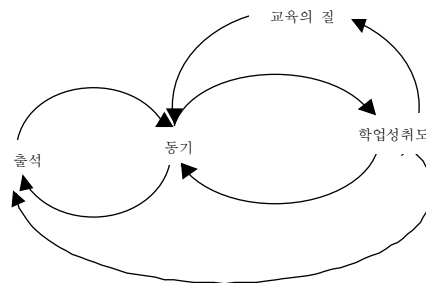
아래 [그림1]은 일방향의 단선적 인과관계는 학업성취도에 여러 원인들이 일방향으로, 그리고 일회적인 영향을 미치는 구도로 이해되고 있다. 그러나 [그림2] 원형의 피드백관점에서는 학업성취도에 영향을 미치는 변수들이 순환적으로 영향을 주고받는 상호작용 관계에 지속적으로 놓여있음을 나타내고 있다. 종속변수와 독립변수의 구분은 더 이상 의미가 없게 된다.

3) 환류체계의 관점에 대한 광범위하고 종합적인 논의는 Richardson(1991)을 참조할 것.



[그림1] 일방향의 단선적 인과관계

순환적인 인과관계에 의한 동태적인 현상들은 주변에서도 많이 찾아볼 수 있다. 예를 들면 부족한 도로사정으로 도시의 교통혼잡이 야기될 때 단순한 도로의 확장은 일시적으로 교통혼잡을 완화할 수 있을지는 몰라도 나아진 도로사정이 결국 더 많은 자동차를 유인하여 다시 교통체증을 유발하게 된다든지, 농업의 경쟁력을 제고시키기 위하여 정부가 농산물 보조금을 지불할 때 단기적으로는 경쟁력을 유지시킬 수 있을지는 모르나 장기적으로는 정부의 재정지원이 농촌의 경쟁력 제고 노력을 둔화시켜 결국 농업의 경쟁력을 더욱 약화시키는 결과를 가져오게 되는 것이다.



[그림2] 원형의 내부순환적 환류체계(closed loop thinking, circular feedback system)

셋째, 시스템다이내믹스는 사실적 사고(operational thinking)에 초점을 둔다. 이 사실적 사고란 변화가 실제로 어떻게 해서 일어나고 있는지 변화의 과정에 연구의 초점을 맞추는 사고이다. 즉 시스템 작동의 메카니즘을 파악하고자 하는 사고이다(김도훈 문태훈 김동환, 1999:38; High Performance, 1994:30-31). 미국의 한 유명한 경제학 논문지에 우유생산을 예측하는 이코노메트릭 모델이 발표된 적이 있다. 그 모델의 회귀식은 [우유생산 = $a_1 \times (\text{국민총생산}) + a_2 \times (\text{이자율}) + \dots$]의 형태를 띠고 있었다. 우유생산은 국민총생산, 이자율과 같은 거시경제적 변수의 함수라는 것이다. 그리고 각 거시경제적 변수가 우유생산에 영향을 주는 상대적 중요성은 a_i 로 표시하고 있다. 이 모델은 분명히 우유가 실제로 어떻게 생산되는지 나타내 주고 있지 않다. 모델 어디에도 우유생산에 필수적인 요소가 표현되어 있지 않다. 만일 우리가 실

제적 사고를 한다면 젓소야말로 모델에서 제일 먼저 고려해야 할 변수일 것이다. 다음으로 젓소 한마리가 매년 만들어내는 우유의 평균생산량이 중요변수가 될 것이다. 적어도 이 두변수가 포함되어 있어야 우유생산에 대해 실제적인 언급을 할 수 있을 것이다. 사실적 사고란 추상적이거나 수학적인 모델을 가지고 우유생산을 예측하려는 사고가 아니다. 사실적 사고란 실제 우유생산 과정에 무엇이 어떻게 일어나고 있는가를 파악하려는 사고이다.

3. 시스템다이내믹스의 방법론적 위상

진실을 규명하는데 있어서 과연 어떤 방법을 취하는 것이 가장 과학적이고 객관적이며, 효과적일 것인가에 대한 방법론적인 논란은 오랜 역사를 지니고 있다. 과학적 지식이라는 것이 과연 어떻게 얻어지는 것인가에 대한 논의는 지금까지 몇 부류의 학파들로 나누어지며 치열한 논쟁을 거치며 발전해 왔다. 관점의 차이나 접근방식의 차이에 따라 이를 표준과학(the standard view of science), 해석적 사회과학(interpretive social science), 비판적 사회과학(the critical social science)으로 나누기도 하고 주관론적 접근과 객관론적 접근 또는 질적접근과 양적접근방법으로 구분짓기도 한다. 그런가 하면 과학적 지식의 발전은 대체로 도구주의(instrumentalism), 패러다임주의(paradigmism), 반증주의(refutationism)에 의하여 발전해 왔다고 분류하기도 한다.

이러한 방법론적 시각의 스펙트럼위에서 시스템다이내믹스는 시뮬레이션을 위한 수량적 모델을 구축한다는 점에서 표준과학관, 객관론적 접근, 도구주의적 접근방법의 성향을 지니고 있으나, 모델을 구축하기 위한 현상의 파악에서 질적인 접근을 동시에 중시하고, 수량화의 한계를 인식하고 인과지도만으로 현상을 설명하려는 노력이 강하게 제기되고 있다는 측면에서 주관론적 접근이라고도 할 수 있으며, 모델을 항상 동태적가설에 입각하도록 하여 이를 비판적으로 검토가능하게 한다는 점에서 반증주의에 입각해 있다고 할 수 있다.

1) 질적접근과 양적접근의 동시적 활용

사회과학에 있어서 주관론자와 객관론자의 논쟁을 특징지우는 기본가정들은 아래 표와 같다. 시스템다이내믹스는 주관론자와 객관론자의 논의들을 동시에 포함한다.

질적분석과 양적분석방법은 분석의 대상과 범위, 자료의 모집, 그리고 결과의 제시형태에 있어서 차이를 갖는다. 우선 분석의 대상과 범위에 있어서 질적분석은 양적분석에 비하여 분석의 범위가 넓고 과정중심의 연구에 적합할 수 있으며 양적분석은 결과중심의 연구에 적합하다. 분석의 범위를 설정하는데 있어서 양적분석은 가능한 한 정교하게 분석의 범위를 설정하고 이를 다른 범주와 분리시킨다. 가능한 한 작은 부분으로 분리시켜 이를 관찰하고 검증한다. 따라서 풍부한 상황적인 요소와 과정에 대한 고려가 질적분석보다 약할 수 있다.

[표1] 사회과학에 있어서 주관론자와 객관론자의 차이

	subjectivist approach to social science	<----->	objectivist approach to social science
ontological assumption (존재론적 입장)	현실은 인간 의식과 상상의 반영, 투사물	현실은 인간이 부여하는 의미의 구성체(reality as a social construction)	현실은 인간 행동과 상호 작용을 통해 서 지속되는 상징적관계와 의미의 세계
인간성에 대한 입장	인간은 순수히 의도적, 주관적이며 정신적인 존재	인간은 사회적인 행위자, 공통된 믿음을 생산하는 상징 조작자	행위자, 세상과의 관계를 해석하고, 형성해 나가는 상징의 사용자
인식론적 입장 (epistemological stance)	현상학적 이해와 통찰, revelation	사회현실이 어떻게 형성되는가를 이해하려함	상징 사용패턴을 이해하려 함 (to understand pattern of symbolic discourse)
Favored Metaphors	transcendental 초월	language game, accomplishment, text	theater, culture, cybernetic (인공두뇌학의)
Research Method	순수한 주관성의 탐구 해석학	해석학적인 탐구 인류학	상징분석 (symbolic analysis) 사회행위이론
			상황분석 (contextual analysis of Gestalten)
			유기체 (organism)
			to study systems, process, change
			to construct a positivist science
			기계(machine)
			historical analysis of system theory
			lab experiment, surveys Behavioralism

Morgan, Gareth and Linda Smirchich. 1980. "The Case for Qualitative Research" *Academy of Management Review*. Vol.5. No.4. p.492.

또, 양적분석은 명확한 분석의 범위내에서 명쾌한 상관관계의 규명에 초점을 두나 질적 분석은 분석대상간의 관계의 형태(pattern)를 대상으로 한다. 이러한 성향의 차이는 양자간의 trade-off를 말해준다. 즉 양적방법은 제한되나 명쾌한 상관관계의 규명을, 질적방법은 제한되지 않은 풍부하고 복잡한 인과관계의 규명에 강하다.

자료의 모집에 있어서 양적분석은 숫자화된 기존의 데이터나 관찰로서 얻어지는 수량화할 수 있는 데이터에 제한, 질적분석은 숫자화된 데이터나 숫자화되기 어려운 자료를 모집한다. 양적분석에 있어서와는 달리 자료의 모집과 분석은 질적분석에 있어서 병행되는 경우가 많다. 결과의 제시에 있어서 양적분석은 통계검증의 결과, 테이블, 차트등의 결과를 제시하고, 질적분석은 서술형태의 결과를 제시한다. 시스템다이내믹스를 지금까지 설명한 질적인 분석과 양적인 분석의 특징과 비교하면 아래 표와 같이 정리될 수 있다.

[표2] 양적분석, 시스템다이내믹스, 질적분석의 특성

	양적분석	시스템다이내믹스	질적분석
분석의 논리	연역적	연역적추론, 반증가능성의 검토, 시뮬레이션	귀납적
분석의 대상	결과중심의 연구에 적합	동태적 과정 설명, 인과론적 결과	분석의 범위가 넓고 과정중심의 연구에 적합
분석의 범위	가능한한 정교하게 분석의 범위를 설정하고 이를 다른 범주와 분리시킨다 가능한 한 작은 부분으로 분리시켜 이를 관찰하고 검증	문제와 특정행태를 발생시키는 모든 요소를 시스템으로 규정, 전체적 맥락과 과정, 부분적 상황을 동시에 분석	전체적인 맥락과 상황하에서 특수한 문제를 인식하고 파악. 풍부한 상황적인 요소와 과정에 대한 고려
분석의 초점	명확한 분석의 범위내에서 명쾌한 상관관계의 규명에 초점 제한되나 명쾌한 상관관계의 규명	피드백시스템의 인과관계의 규명	분석대상간의 관계의 형태(pattern)를 대상 제한되지 않은 풍부하고 복잡한 인과관계의 규명에 강함
자료의 모집	숫자화된 기존의 데이터나 관찰로서 얻어지는 수량화 할 수 있는 데이터에 제한	숫자화된 데이터는 물론 숫자화되기 어려운 데이터를 활용, 테이블함수 등	숫자화된 데이터나 숫자화되기 어려운 자료를 모집. 자료의 모집과 분석이 병행되는 경우가 많음
결과 제시	양적분석의 통계검증의 결과, 테이블, 차트등의 결과를 제시	그래프, 테이블, 서술을 동시에 제시	서술형태의 결과제시

2) 도구주의와 반증가능주의

도구주의(instrumentalism)는 표준과학관, 객관론적 접근법에 해당하는 입장으로, 과학적 지식은 상관관계를 갖는 데이터들의 집합으로 구성되어 있다고 본다. 과학이론은 더 많은 자료의 수집과 이러한 자료들로부터 더 높은 상관관계를 발견할 때 발전한다고 본다. 사회과학분야의 계량경제학이나 행태주의, 그리고 자연과학의 물리화학이나 화학공학분야가 이러한 도구주의적 견해와 방법에 입각하여 과학이론을 구축해 나가는 대표적인 예로 들 수 있다. 여기서는 데이터에 적합한 공식이나 모델을 찾아내고 이를 경험적 모델, 이론이라고 말한다. 이러한 모델과 일치하지 않는 데이터가 존재할 때에는 그러한 데이터를 포용할 수 있도록 모델을 변경하거나 또는 오류의 허용범위를 정하는 한계조건(boundary conditions)을 설정하여 이론이나 모델이 오류에 노출될 가능성을 원천적으로 감소시키고 모델에 의하여 설명되지 않는 데이터는 예외로 취급해 버린다. 관찰될 수 있는 사실에 환원될 수 없는 아이디어는 과학적 지식이 아니라고 주장한 F. Bacon과, 같은 인과관계가 같은 결과를 항상 가져온다고 볼 수 없으며 미래의 사실은 오직 확률론적으로만 말해질 수 있을 따름이라 주장한 David Hume 등이 이러한 도구주의의 원조라 볼 수 있다(Bell and Bell, 1980:8).

패러다임주의(paradigmism)에서 과학적 지식은 일련의 아이디어의 집합으로 구성되어 있다고 본다. 과학적 지식의 발전은 이러한 아이디어로 현실을 설명하는데 한계를 드러낼 때 새로운 패러다임의 등장을 요구하고 새로운 패러다임의 등장에 의하여 현실의 설명이 보다 완벽하게 이루어지면서 발전한다. Thomas Kuhn이 말하는 과학혁명이란 이러한 새로운 패러다임의 등장으로 인한 혁신적인 과학적 지식의 발전을 의미한다.

반증주의(Refutationism)는 과학적 지식은 경험적 사실에 의한 반증이 가능한 추측으로 이루어져 있다고 본다. 과학적인 지식의 발전은 기존의 추측들이 이러한 경험적인 반증에 저항하여 견디어 나갈 수 있도록 끊임없는 수정의 과정에서 이루어진다고 보는 것이다. 이러한 반증주의는 William Whewell, Karl Popper등에 그 근원을 두고 발전해 왔다. William Whewell 은 “과학적 발견의 역사에 대한 연구”에서 과학의 발전은 베이컨이 주장하는 것처럼 귀납적인 방법에 의한 진리의 발견에 의하여 발전된 것이 아니라 과감한 추측(bold guess)과 이러한 추측이 사실에 입각한 검증과정을 거치면서 발전해 왔다고 주장하였다(*History of the Inductive Sciences*, 1837; *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1840). 웨웰에 의하면 대부분의 이러한 추측은 잘못된 것으로 판명이 나지만 그 중의 일부는 정당한 것으로 인정이 된다. 그러나 정당한 것으로 인정이 된 이론도 이후의 사실 검증에 의하여 잘못된 이론으로 밝혀질 가능성이 있어 그 진리의 절대성은 주장하지 못한다고 주장하였다. 따라서 웨웰은 사실이 과학적 진리를 발견하는데 중요하지는 않으나 과학적 진리를 정당화 시켜주는 데는 아주 중요한 역할을 한다고 주장하였다. 따라서 웨웰은 사실의 발견보다 자유스러운 사고와 풍부한 상상력이 과학발전의 중요한 요소였음을 주장한다. 이론이(idea) 어떤 현상을 이해하는데 도움이 된다면 과학자는 이를 뒷받침할 수 있는 사실을 찾게 되고 그러한 사실의 존재가 발견될 때 그 아이디어는 정당성을 가진 이론으로 발전한다. 그러나 귀납론자들과는 달리 웨웰은 아이디어는 이미 알려진 사실(known facts)에 항상 환원되는 않는다고 한다. Thomas Kuhn의 Paradigmism과 유사한 맥락으로 볼 수 있다.

문제해결의 능력과 이론적인 발전능력이라는 관점에서 도구주의, 패러다임주의, 반증주의의 한계들은 다음과 같이 지적될 수 있다. 도구주의에서는 모델에 적합하지 않은 데이터는 회피된다. 데이터간의 상관관계는 주어진 데이터 셋에 한정되기 때문에 다양한 현상을 설명하는데 기본적인 한계를 갖게 된다. 따라서 새로운 통찰력을 가져오는데도 또한 제한적이다. 통계법칙에서와 같이 가설의 수용과 거부와 같은 행위는 모델이 에러에 노출되는 정도를 크게 감소시킨다. 패러다임주의에서 패러다임의 변화는 과학적인 합리성에 의한 비교에 의해서 보다는 신념이나 감정적인 것이고 사회적인 영향 (발견자의 명성, 유명한 교과서의 동의 등)에 의하는 경우가 많다. 어떤 패러다임이 더 나은 것인지에 대한 명확한 기준이 없다. 오래된 패러다임이 그 유용성이 상실된 후에도 존속하는 경우가 많다. 반증주의에서 복합적인 인과관계의 모델설정은 모델의 에러에 대한 노출 가능성을 증진시킴으로써 과학적 진실의 규명과 축적에 도구주의보다 더 진일보한 입장을 취한다고 볼 수 있다. 시스템다이내믹스는 도구주의 보다는 반증가능주의에 그 방법론적 연원을 두고 있다고 할 수 있다.

4. 계량경제학과의 논쟁

도구주의와 반증가능주의, 질적접근과 양적접근을 동시에 추구하는 시스템다이내믹스의 문제에 대한 인식과 접근방법은 전통적인 계량적 접근방법인 통계적 접근방법과는 상이한 방법론적인 논리에 근거하고 있어 많은 방법론상의 논쟁을 불러일으킨 것이 사실이다 (Meadows:1980; Bell and Bell, 1980 참조). 대표적인 예로서 계량경제학(econometrics)에서는 주로 단기적으로 변수의 값을 정밀하게 추정하는데 주된 관심을 가지며, 모델의 구조와 모델 파라미터의 엄격한 통계적인 검증에 주안점을 두고 있다. 그러나 시스템다이내믹스는 이러한 정밀한 통계적 검증에 의한 예측은 방법론상의 제약과 너무도 많은 예외적인 변수의 영향으로 성공적인 예측이 어려울 뿐만 아니라 변수의 동태적인 변화를 예측하지도 못, 그 변화를 야기시키는 문제의 구조와 과정에 대한 설명도 제시하지 못한다고 비판한다 (Meadows, 1980:48).

계량경제학(econometrics)에서 파라미터(parameter)의 추정을 위하여 사용하고 있는 기본적인 방법은 최소자승법 (Least Square Method) 이며 이 최소자승법의 전제조건을 충족시켜 모델의 파라미터를 측정하기 위하여서는 모든 식이 선형(linear)으로 바뀌어져야 한다. 따라서 경제통계학의 모델에서는 변수간의 관계가 대부분 선형이거나(linear) 로그선형(log-linear)으로 제한된다. 예를 들어 문맹률과 소비와의 관계는

$$\text{소비} = \beta_0 + \beta_1(\text{문맹률}) + \varepsilon \text{ 또는}$$

$$\text{Log (소비)} = \beta_0 + \beta_1(\text{문맹률}) + \varepsilon$$

로 표시된다. 최소자승법의 또 다른 조건은 독립변수간의 다중공선성(多重共線性, multicollinearity)이 없어야 한다는 것이다. 예를 들어 소비 = $\beta_0 + \beta_1(\text{문맹률}) + \beta_2(\text{소득}) + \varepsilon$ 에서 문맹률과 소득은 상호 독립적이고, ε 에 영향을 줄 수 있는 다른 변수가 존재하지 않아야 파라미터 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 의 측정이 정확하다는 것이다. 그러나 파라미터의 측정을 위한 이러한 엄격한 전제조건들은 이코노메트릭스를 사용하는 연구자들로 하여금 상대적으로 적은 수의 설명 변수들만을 모델에 포함시키는 경향을 가져오게 하여 경제이론이 방법론에 의하여 제약당하는 결과를 가져오게 한다. 즉, 예를 들어 소비나 투자를 결정짓는 요인은 수십 가지에 달할 수 있으나 방법론상의 제약으로 경제통계학자들은 4-5개 이상의 변수를 거의 사용하지 않는다(Meadows, 1980:41-42; see also Johnson, 1980). 이외에도 통계적 모델에 대한 비판은 많다. 예를 들어 모델에 종속변수에 영향을 주는 독립변수가 빠지거나 영향을 주지 않는 변수가 포함될 때, 소위 model specification error가 일어날 때, 기울기의 측정은 편기되거나 효율적인 측정이 되지 못하게 된다. 물론 유의도 검증을 통하여 무의미한 변수를 찾아 낼 수는 있으나 유의도는 샘플의 수에 영향을 받는다. 샘플의 규모가 클수록 표준오차(SE)는 작아지고 따라서 유의미한 결과를 얻게될 수 있다. 또, 다중공선성이 존재하는 경우 표준오차가 커지고 실제로 유의미한 변수가 무의미한 변수로 판명될

수 있다. 이런 경우 변수를 제외시키는 것 또한 바람직스럽지 못하다. 이런 맥락에서 포레스터는 수리경제모델에 대하여 “수리경제 모델의 파라미터들은 수학적 조작에 의해 얻어진 것일뿐 실제 세계의 인간이 지닌 동기와 직접적으로 관련되는 것이 아니다. 더군다나 수리 모델은 데이터를 수집할 수 없는 변수에 대해서는 무용지물이다”라고 비판한다. 그러나 계량경제학자들은 시스템다이내믹스에 대하여 “시스템다이내믹스 연구자들은 안락의자에 앉아서 수십 수백개나 되는 수식들을 상식적인 지식만을 가지고 모델화한다”고 비판한다(김도훈 문태훈 김동환, 1999:53).

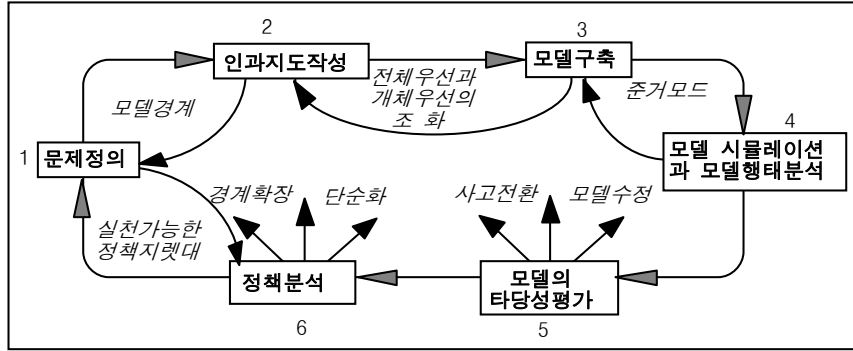
그러나 양 방법은 상호대립적이라기 보다는 상호 보완적으로 사용될 수 있다. 통계적인 추정이나 단기적으로 유효하다면 동태적인 체계이론은 장기적인 변수의 동태적인 변화를 예측하고 그 원인을 설명하는 데 효과적이다. 또, 통계적인 검증을 거친 파라미터를 동태적 체계모형의 파라미터로 사용함으로써 통계적인 접근이나 동태적 체계모형 어느 한 방법에 의할때 해결하기 곤란한 중기적인 변수의 행태를 예측하고 설명하는데 유용하게 사용될 수 있다(Meadows, 1980:46).⁴⁾

5. 시스템다이내믹스 연구절차

이러한 시스템다이내믹스를 이용한 컴퓨터 모의실험은 몇 단계로 이루어진다(Richardson, 1981:16). 우선 분석의 목적에 합당한 모델 작성을 위해 그 목적에 맞게 문제를 인식정의 한다 (Problem Identification and Definition). 두번째 단계에서는 문제를 피드백 시각(Feedback Perspective)에서 개념화 (Conceptualization) 시킨다. 이 단계에서는 특정 문제를 야기시키는 여러 원인들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 피드백 시각에서 나타내는 인과지도(Causal Loop Diagram)의 작성이 중요한 과제가 된다. 셋째, 이상의 개념화를 바탕으로 실제로 정책분석에 이용될 컴퓨터 모델을 작성하고 (Model Formulation), 넷째, 작성된 모델에서 보여지는 주요변수들의 행태를 중심으로 모델의 타당성을 평가한다 (Model Validation). 모델의 타당성이 입증되면 마지막으로 이 모델을 이용하여 정책대안에 대한 분석을 행하게 된다 (Policy Analysis). 특히 정책대안의 분석단계에서는 구축된 모델을 바탕으로 각종 정책대안을 모의실험하면서 최적의 대안을 찾아내는데 주력한다. 이상의 과정을 그림으로 표시하면 다음과 같다.

4) 계량경제학의 시스템다이내믹스에서의 응용에 대해서는 Mass and Senge(1980), Peterson(1980) 참조.

[그림] 시스템다이내믹스 연구절차



김도훈 문태훈 김동환, 1999:55.

6. 시스템다이내믹스 연구 및 활용 동향

최근 시스템다이내믹스의 연구 및 활용동향을 방법론, 응용, 컨설팅, 교육부문 등에서 분야별로 살펴보면 아래와 같다(Richardson, 1998:440-449).

1) 방법론 연구

우선 시스템다이내믹스의 방법론적인 측면에서 두드러지는 경향은 질적인 연구경향이 최근 들어 강하게 늘어나고 있다는 점이다. 시뮬레이션 모델을 구축하지 않고 단지 피드백 루프들을 사용한 인과지도를 이용하여 현상을 설명하고 직관을 얻고 이해를 촉진하는 이러한 연구들은 시뮬레이션 모델을 구축하는 것 보다 시간을 단축할 수 있고, 고객의 이해를 촉진시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 인과지도를 사용한 질적인 연구는 그것 자체로 한계가 있게 마련이다. 즉, 인과지도가 컴퓨터 시뮬레이션을 대체할 때 정신적 모델이 가지는 한계는 극복되지 못한 채 그대로 남겨져 있게 된다는 점이다. 컴퓨터 시뮬레이션은 복잡한 피드백 시스템이 가져올 시스템의 행태를 정신적 모델로 추론하기가 불가능하기 때문에, 인간의 정신적 모델이 가지는 한계를 극복하기 위한 수단으로 필요하다는 점을 생각한다면 인과지도에만 의존하는 질적연구가 가지는 한계는 자명해 진다. 더구나 질적인 연구의 용이성은 허용가능한 범위를 넘어선 과도한 질적인 연구의 활용을 가져올 가능성이 있게 된다.

한편, 모델링을 통한 양적인 연구방법의 두드러진 경향은 시뮬레이션 모델에 기초하여 시스템에 대한 통찰력과 이해를 증진하기 위한 각종 게임의 개발과 응용을 들 수 있다. 이러한 게임은 동태적인 의사결정환경을 제공함으로써 게임에 참여하는 자에게 시스템에 대한 통찰력과 이해력을 증진시켜 줄 수 있다. 그러나 게임모델의 개발과 활용에 항상 주의하여야 할 점은 게임 인터페이스의 디자인에 따라 게임의 수행능력에 큰 차이가 날 수 있다는 점이 연구결과 지적되고 있어 이 부분의 연구가 더욱 진전되어야 할 필요가 있다는 점이다.

이외에 시뮬레이션 모델을 사용한 양적인 연구경향 중 주목할 만한 경향은 최적화 기법으로 시뮬레이션 모델을 활용하는 것이다. 모델을 데이터에 가장 근접하게 구축할 수 있는 파라미터의 결정이나 목표치에 근접한 정책결과를 가져올 수 있는 정책설계를 위한 최적화

기법은 아직 활발하지 않지만 연구결과의 중요성이 강조될 수 있는 분야이다.

2) 활용 및 응용

시스템다이내믹스의 응용은 기업부분에 대한 응용이 압도적이다. 물론 포레스터 교수의 *Urban Dynamics*나 *World Dynamics*, 메도우즈의 *Limits to Growth* 등은 시스템다이내믹스의 응용범위를 공공관심 영역으로까지 확산시켰으나 대부분의 응용은 여전히 기업부분에서 일어나고 있다. 사부분에 국한되던 시스템다이내믹스의 응용이 타부분까지 확산되는 계기는 1960년대 말 미국 보스톤시의 도시성장과 쇠퇴문제를 다룬 『도시동태론』(*Urban Dynamics*)에서 비롯되었다고 보고 있다(Richardson, 1999). 사실 포레스터 자신도 보스톤 시장과 일련의 도시학자들과 모여 작업을 시작할 때만해도 시스템다이내믹스가 과연 도시의 쇠퇴라는 복잡한 도시문제에 얼마나 큰 도움을 줄 수 있는지에 대한 확신이 크게 서지 않았다고 한다. 그러나 도시를 하나의 시스템으로 보고 주택, 기업구조, 도시인구를 중심으로 구축한 도시동태모형은 도시의 성장과 정체, 그리고 도심내부의 쇠퇴를 분석하는 유용한 도구로 발전되었으며 이 모델은 지금까지도 도시문제에 대한 이해와 도시정책의 분석에 유용하게 활용되고 있다. 이외에도 포레스터의 1971년 『세계동태론』(*World Dynamics*), 메도우즈의 『성장의 한계』(*Limit to Growth*) 등은 시스템다이내믹스의 활용을 공공의 관심분야로 확산시키는 중요한 계기가 된다.

그러나 여전히 주된 응용분야는 사부분, 특히 기업부분에서 일어나고 있으며 공공분야에 대한 응용 및 연구의 확대가 주요한 이슈로 제기되고 있는 것이 사실이다(Richardson, 1999). 이렇게 시스템다이내믹스의 응용이 기업부분에 집중적으로 일어나고 있는 이유는 우선 대부분의 연구비가 기업부분에서 공급되기 때문이기도 하고 공공부분의 문제는 모든 사람의 문제이기 때문에 기업부분에 비교할 때 뚜렷한 단일 고객층이 없기 때문이기도 하다. 그럼에도 불구하고 기업체의 행태라는 것은 이에 영향을 미치는 사회시스템과 영향을 주고 받는 것이며 단일기업의 행태를 변화시키는데 성공적이었다 하더라도 사회시스템이 기업의 행태를 사회에 재앙과 같은 결과를 초래하도록 영향을 주고 있다면 이 사회체제에 대한 더 많은 관심과 연구가 필요하다고 할 것이다. 따라서 공공부분에 대한 시스템다이내믹스의 연구는 더욱 활성화될 필요가 있다.

또 한가지 주목할만한 시스템다이내믹스 활용동향은 기업의 미래비전의 설정에 유효하게 시스템다이내믹스를 활용할 수 있다는 점이다. 또 수량화가 어려운 이슈들, 예를 들면 기업의 이미지와 명성, 관리기술, 다양화전략 등에 대한 시스템다이내믹스의 응용이 활발해지고 있다는 점이다. 이러한 경향은 시스템다이내믹스의 활용분야가 지금까지 기업의 재고관리와 같은 아주 구체적이고 수량화가 용이한 부분에서의 활용을 넘어서 수량화가 어려운 부분으로 활용분야를 점차 확대해 갈 것이라는 점을 예견케 하는 대목이라 할 수 있다.

3) 컨설팅현황

불과 10년전까지만 해도 시스템다이내믹스를 전혀 사용하지 않던 컨설팅 회사들이 이제

는 시스템다이내믹스를 활발히 활용하기 위하여 노력하고 있으며 이 분야의 활용을 강화하기 위하여 시스템다이내미스트들을 확충해 나가고 있다. 자연히 고도로 숙련되고 경험있는 모델러에 대한 수요는 점차 증가하고 있으며 대학들은 시스템다이내믹스 교육을 확충해 나가고 있다.

4) 교육

최근 시스템다이내믹스 교육에 가장 주목할만한 성과는 노르웨이 베르겐대학의 국제석사 학위프로그램, 미국 Worcester Polytechnic Institute의 시스템다이내믹스 전공 등을 들 수 있다. 대학에서 뿐만 아니라 컨설팅회사들은 자체적인 교육능력을 확대시키면서 기업분석가들과 연구자들을 위한 시스템다이내믹스 교육프로그램을 꾸준히 발전시켜왔다. 시스템다이내믹스의 교육과 훈련에 빼 놓을 수 없는 최근의 경향은 인터넷을 이용한 시스템다이내믹스의 교육과 훈련이다. 예를 들면 <http://sysdyn.mit.edu/> 과 같은 웹사이트에서는 포레스터교수의 지도하에 학부생과 대학원생들이 한번도 만나보지 못한 다른 멀리 떨어진 학생들에게 시스템다이내믹스를 교육하고 이들의 경험을 나누고 있다. 더욱 괄목할만한 경향은 유치원생들부터 12학년 학생들을 대상으로 한 시스템사고와 시스템다이내믹스에 교육프로그램의 광범위한 개발과 적용이다. MIT대학 서보메카니즘 실험실의 창시자이자 포레스터의 스승이었던 Gordon Brown은 중학교와 고등학교의 교육내용에 시스템다이내믹스와 스텔라 교육을 시작하였으며 High Performance System 회사는 소프트웨어와 매뉴얼들을 지원해 줌으로서 어린이들에게 시스템사고와 시스템다이내믹스의 교육을 확산시키고 있다. 6살에서 7살 어린이들에게 인과지도를 가르치고 자기강화적인 과정을 가르치며, 초등학교 3학년 학생들에게는 게임에 대한 피드백 분석을 가르치고 있다. 이와 관련하여 대단히 고무적인 것은 최근 우리나라에서도 중학교 선생님에 의하여 중학생을 대상으로 시스템사고를 이용하여 사고력 향상과 표현능력의 신장을 시도하는 교육프로그램의 개발과 이에 대한 연구가 시도되고 있다는 점이다(최점순, 2002). 지속적인 관심과 연구가 필요한 중요한 분야라 할 수 있다.

웹사이트 <http://www.clexchange.org> 에서는 미국 전역 230여개 학교의 시스템다이내믹스 교육경험과 자료들을 서로 네트워킹해주고 있는데 이들 학교는 매년 학술회의를 개최하여 서로의 경험을 공유하고 있다.

7. 결론

과학적 지식을 찾기 위한 학문적 접근은 기본적으로 보수적인 성향을 띠고 있다. 이 가운데 시스템다이내믹스는 기존의 전통적인 계량적 접근방식과는 상이한 관점과 문제의식에서 출발한다. 따라서 시스템다이내믹스 연구는 기존의 방법론들로부터 상당한 비판에 직면할 수 있다. 이미 살펴보았듯이 시스템다이내믹스는 그 분석의 논리에 있어서 연역과 귀납적 논리를 동시에 내포하고 있으며, 양적인 접근임과 동시에 질적인 접근방식이기도 하다.

모델의 구축과 파라미터의 측정에 대한 계량경제학과 시스템다이내믹스간의 논쟁은 기본적으로 전통적인 양적접근방법 관점에서의 비판이며 이러한 비판은 시스템다이내믹스의 관점에서 새롭게 소화되지 않으면 안된다.

인과지도를 이용한 시스템다이내믹스 연구들은 양적인 접근방식에 대비되는 질적인 접근방식의 새로운 가능성을 개척할 수 있다는 점에서 고무적이다. 그러나 이러한 질적인 접근방식의 발전은 양적인 접근방식으로서의 문제들이 성공적으로 극복될 때 가능해지는 것이라 보여진다. 어차피 컴퓨터 모의실험이란 것은 인간의 머리로 추정할 수 있는 범위를 넘어선 복잡한 시스템의 상호작용 결과가 어떻게 전개될 것인가를 컴퓨터의 도움으로 밝혀보자는 데서 출발한 것이기 때문이다. 양적인 접근방법으로서의 연구역량이 우선적으로 구축되어 나가는 것이 필요하다고 볼 수 있다. 사실 소프트웨어의 발전으로 양적인 모델링 작업은 그 어느 때보다 용이하고 간편해지게 되었다. 그러나 모델구축의 용이성은 엄정한 모델구축의 절차에 입각하지 않아서 신뢰성과 타당성을 결여한 모델을 양산할 수 있다는 점을 명심해야 할 것이다.

시스템다이내믹스의 활용에서 공공부분보다 사기업부분의 활용이 압도적인 점은 앞으로 우리에게도 마찬가지일 것으로 보여진다. 특히 기업의 컨설팅에 시스템다이내믹스가 상당히 가파른 속도의 증가세를 보이며 활용되고 있다는 점은 우리에게도 곧 이러한 추세가 닥칠 것임을 예고한다고 볼 수 있다. 그러나 국내 인적기반의 취약성은 이미 이 부분의 인적자원을 보유한 Arther Anderson이나 Anderson Consulting 등 외국 컨설팅 기업에게 주도권을 상실하고 있는 것이 현실이다. 따라서 시스템다이내믹스를 이해하고 활용할 수 있는 각종 교육프로그램의 개발과 인적자원의 양성은 무엇보다도 중요한 과제로 보여지며 실질적인 수요도 증가하리라 보여진다. 산발적인 연구와 산재해 있는 인적자원의 네트워크와 더불어 시스템다이내믹스 인적자원의 개발에 우선적인 노력을 기울여야 할 것으로 보인다.

참고문헌

김도훈 문태훈 김동환. 1999. 「시스템다이내믹스」 대영문화사.

최점순. 2002. “시스템사고를 통한 사고력향상과 표현능력의 신장”. 「한국시스템다이내믹스학회 2002년 추계학술대회 발표논문집」(별쇄본). 마석중학교.

Bell, James A. and James F. Bell. 1980. "System Dynamics and Scientific Method." In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.

Darling, Thomas A. and George P. Richardson. 1990. "A Behavioral Simulation Model of Single and Iterative Negotiations." Proceedings of the 1990 International System Dynamics Conference.

Forrester, Jay W. 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge, The MIT Press.

-----, 1969. *Urban Dynamics*. Cambridge, The MIT Press.

-----, 1971. *World Dynamics*. Cambridge, Wright-Allen Press.

-----, 1980. "System Dynamics - Future Opportunities." *TIMS Studies in the Management Science 14*. North-Holland Publishing Company.

-----, 1987. "Lessons from System Dynamics Modeling." *System Dynamics Review*. Vol.3. No.2. Summer.

Forrester, Jay W. and Peter M. Senge. 1980. "Test for Building Confidence in System Dynamics Models." *TIMS Studies in the Management Science 14*. North-Holland Publishing Company.

Hamilton, H. R. et.al. 1969. *System Simulation for Regional Analysis*. Cambridge, The MIT Press.

High Performance. 1994. *Stella, An Introduction to System Thinking*. High Performance Systems Inc.:NH, USA.

Johnson, Curtis B. "Some Effects of Data Errors on Econometric Models." *TIMS Studies in the Management Science 14*. North-Holland Publishing Company.

Legasto, Jr. Augusto A. and Joseph Maciariello. 1980. "System Dynamics: A Critical Review." *TIMS Studies in the Management Science 14*. North-Holland Publishing Company.

Mass, Nathaniel(ed). 1974. *Readings in Urban Dynamics I*. MA, Wright-Allen Press

Inc.

Mass, Nathaniel J. and Peter M. Senge. 1980. "Alternative Tests for Selecting Model Variables" In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.

Meadows, Donella H. 1980. "The Unavoidable A Priori." In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.

Morgan, Gareth and Linda Smirchich. 1980. "The Case for Qualitative Research" *Academy of Management Review*. Vol.5.No.4.

Peterson, David W. 1980. "Statistical Tools for System Dynamics." In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.

Richardson, George P. & A.L. Pugh. 1981. *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*. Cambridge, MA: The MIT Press.

-----, 1991. *Feedback Thought in Social Science and System Theory*. Philadelphia, University of Pennsylvania Press.

-----, 1999. "Reflections for the future of system dynamics" *Journal of the Operational Research Society*. Vol.50. pp.440-449.

Sterman, John D. 1987. "Testing Behavioral Simulation Models by Direct Experiment." *Management Science*. Vol.33. No.12. December.

Tank-Nielsen, Carsten. 1980. "Sensitivity Analysis in System Dynamics." In Jorgen Randers. (ed.) *Elements of the System Dynamics Method*.