

동태적 분석 및 설계를 위한 인과지도 작성법의 한계와 개선방안에 관한 연구*

A Study on Theoretical Improvement of Causal Mapping for Dynamic Analysis and Design*

정재운** · 김현수***

Jung, Jae Un** · Kim, Hyun Soo***

Abstract

This study explores the limitation in making a causal model through an existing case and proposes an alternative plan to improve a theoretical system of causation modeling. To make a dynamic and actual model, several principles are needed such as reality based analysis of system structures and dynamics, consistent expression of causations, conversion of numerical formulas to causal relations, classification and arrangement of variables by size of concept, etc. However, it is hard to find cases to apply these considerations from existing models in System Dynamics. Therefore, this study verifies errors of derived models from literatures and proposes principles and guides that should be considered to make a sound dynamic model on a causal map. It contributes to making an opportunity for exciting public opinion to improve theory about causal maps, yet it has limitation that the study does not advance forward to the experimental step. For future study, it plans to make up by classifying and leveling causal variables, developing a dynamic BSC model.

Keywords: 인과관계, 동태적 분석 및 설계, 인과지도, 다이내믹 시스템

(Causation, Dynamic Analysis and Design, Causal Map, Dynamic System)

* 이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

** 동아대학교 경영정보학과 박사과정 (제1저자, ace@goodplayer.kr)

*** 동아대학교 경영정보학과 교수 (교신저자, hskim@dau.ac.kr)

I. 서론

현실 문제(시스템)를 구성하는 다양한 개체들의 구조와 행태를 분석하고 규명하는 문제는 오래된 학문적 과제이다. 시스템을 구성하는 개체들의 양태가 시간에 따라 다양하게 변함으로써 그 표면적 현상이 갈수록 복잡하게 나타난다. 이에 표면적 현상을 야기하는 근본 원인을 규명함으로써 문제를 본질적으로 해결하기 위한 연구적 접근이 늘고 있다. 그러나 동적 시스템(dynamic system)은 복잡도가 높아 연구적 접근이 어렵다는 문제가 있다. 이에 문제의 영역을 제한하고, 실증적으로 규명하기 힘든 부분에 대해서는 논리적 추정을 통해 연구의 편의성을 도모하는 것이 일반적이다. 특히 정치, 경제, 사회 등 인문사회 영역의 전 반에서 이러한 현상을 쉽게 찾아볼 수 있다. 이는 사회문제의 접근영역 자체가 광범위하기 때문이다. 문제 구성 개체(변수)의 수와 종류가 많을 뿐만 아니라 이들 간의 관계 또한 복잡 다양하기 때문에 문제에 대한 연구적 접근 자체가 어렵다. 이러한 이유로 과학적 연구 방법론의 대표 격인 통계적 분석방법론에서도 현실적인 어려움 때문에 시스템 내의 일부 영역만을 문제영역으로 정의하여 연구를 진행한다. 그리고 동적 시스템 분석에 적합하다고 평가되는 시스템 다이내믹스(System dynamics)의 경우에도 정도의 차이는 있지만 연구자의 관심 영역을 중심으로 문제의 영역을 제한해서 문제를 해결한다.

한편 통계적 분석방식과 시스템 다이내믹스의 각 두 가지 연구방법론 모두 이론적 근저에는 사실적 인과개념이 자리를 잡고 있다. 하지만 세상에는 아직 인과관계로 설명할 수 없는 문제들이 존재한다. 이런 경우 카오스(chaos), 프랙탈(fractal) 등의 이론이 동원되어 시스템에 내재된 질서나 규칙을 규명한다(윤영수, 채승병; 2005). 이는 주로 자연과학 분야에서 다루어지는 문제이며 인문사회 계열에서는 인과적 개념을 바탕으로 사회 현상을 규명하는 데 많은 가치를 둔다. 사회적 문제를 연구하기 위해서는 동태적 모형의 분석 및 설계 능력이 요구되기 때문에 이와 관련된 시스템 다이내믹스가 해당 분야를 연구하는 데 유용한 도구로 인식되고 있다. 하지만 시스템 다이내믹스도 동적 모형을 설계함에 있어서, 특히 인과지도를 활용한 현실 모형의 설계에 있어서 작성체계의 한계가 존재한다. 이에 본 논문에서는 시스템 다이내믹스의 인과지도를 활용하여 실세계에 존재하는 다양한 동적 시스템을 분석, 설계할 수 있는 방안에 대해 논의를 진행하고자 한다. 본문을 통해 논의되는 사항으로는 동적 모형 설계 시 고려되어야 하는 것들로서 시스템 구조 및 행태의 사실적 분석, 인과관계의 일관적 표현, 수식의 인과적 표현, 인과관계의 계층적 표현, 다양한 동태적 특성 표현 등이 있다. 이들은 기존의 인과지도 작성의 한계와 개선방안에 대한 논의 과정에서 함께 설명된다.

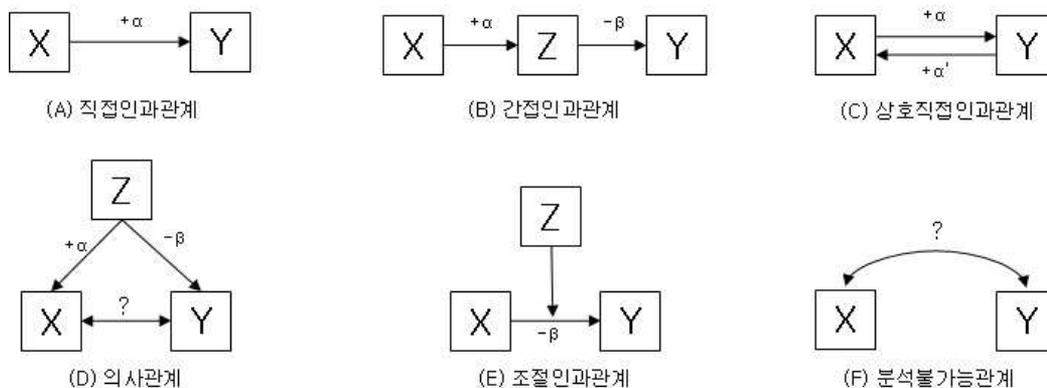
II. 인과모형

1. 인과관계

인과관계(causality, causation, cause and effect 등)는 철학, 법학, 심리학, 경제학, 병리학 등 매우 다양한 분야에서 오래전부터 문제(시스템)의 근본원인(본질)을 분석하고 규명하는데 활용되어 왔다. Wiener, Philip P.(1979)에 의하면 인과관계의 개념이 사용되기 시작한 것은 B.C. 440년경 Melissus의 철학적 사유에 의해서였다. 이로부터 현재까지 과학적으로 규명되어 온 인과관계의 개념과 종류는 다음과 같다.

인과관계란 종속변수에 영향을 주는 독립변수들 이외의 외생변수들을 통제하는 것을 전제로 하고, 원인변수인 독립변수가 결과변수인 종속변수에 미치는 영향의 방향과 크기를 나타내는 것으로서 인과관계가 성립하기 위해서는 다음의 세 가지 조건이 충족되어야 한다. 첫째, 원인변수(독립변수)와 결과변수(종속변수)의 값 모두가 변해야 한다. 둘째, 원인이 되는 변수가 먼저 변화한 후에 종속변수가 변해야 한다. 셋째, 원인변수와 결과변수 이외의 변수(제3의 외생변수)는 제거한 상태에서 인과관계가 검증되어야 한다(김계수, 2006).

한편 인과관계의 종류는 [그림 1]과 같이 6가지로 구분할 수 있다. 변수 간의 인과관계에 대한 방향성은 화살표로 표현하고, 인과관계의 영향도는 +/- (상관관계의 극성) 기호와 숫자(인과관계를 형성하는 경로의 계수)를 활용하여 표현한다. 다만 변수 간의 구체적인 상관계수를 알지 못하는 경우에는 +/- 기호만을 사용하기도 한다.



[그림 1] 인과관계의 6가지 유형(김계수, 2006: p.221)

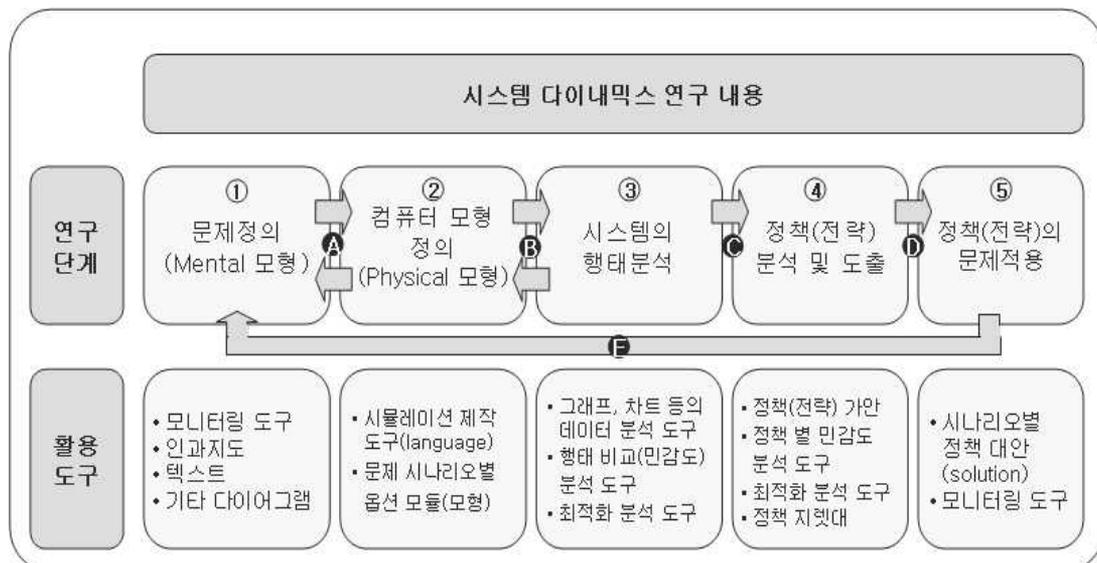
[그림 1]에서 설명되는 인과관계의 종류는 다음과 같다. 첫째, 변수 X가 변수 Y에 직접적으로 영향을 미치는 관계로, 이를 직접효과(direct effect)관계라고 한다. 둘째, 두 변수 X,

Y 사이에 변수 Z가 존재함으로써 X의 효과가 Z에 매개되어 종속변수 Y에 영향을 미치는 관계로, 이를 간접효과(indirect effect)관계라고 한다. 셋째, 두 변수 X, Y가 직접적으로 상호간에 영향을 미치는 관계로, 이를 상호-직접 인과관계라고 한다. 넷째, 서로 관련성이 없는 두 변수 X, Y가 제 3의 변수 Z로부터 동시에 영향을 받아 변화함으로써 마치 두 변수 X, Y의 관계가 존재하는 것처럼 보이는 관계로, 이를 의사효과 또는 허위적 효과(spurious effect)관계라고 한다. 다섯째, 두 변수 X, Y의 인과관계가 제3의 변수 Z(예-성별 등과 같은 명목척도)에 의해 조절되는 관계로, 이를 조절인과관계라고 한다. 여섯째, 두 변수 간의 관련성이 있으나 그 원천이 파악되지 않은 관계로, 이를 분석불가능관계라고 한다(Scheines, 2004; 김계수, 2006).

2. 시스템 다이내믹스와 인과지도

1) 시스템 다이내믹스

시스템 다이내믹스(System Dynamics)는 1950년대에 Jay W. Forrester에 의해 시작되었으며 Industrial dynamics, Urban dynamics, Business dynamics(Forrester, 1961; Forrester, 1969; Sterman, 2000) 등으로 발전되어 왔다. 이는 문제(시스템) 구성 변수들의 인과관계가 피드백 루프(feedback loop)를 형성하는 구조상에서 나타나는 동태를 집중 분석함으로써 문제의 분석과 해결방안을 모색하는 것이 특징이다. 연구 과정은 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 시스템 다이내믹스의 연구 단계 및 단계별 활용 도구

첫째, 문제 분석을 위해 연구자가 실제 시스템에 대해 인지하고 있는 내용 또는 상태를 연구모형으로 전환시키기 위해서 인지 내용을 시각화(visualization)하는 과정이 필요하다. 이 때 연구자가 연구모형으로 활용하고자 하는 내용을 멘탈 모형(mental model 또는 soft model)이라고 하며, 이를 시각적으로 표현, 정의하는 과정을 문제정의 단계라고 한다 (Goldsmann, 2007). 해당 연구 단계에서는 멘탈 모형을 주로 인과지도라는 형태의 모형으로 정의한다.

둘째, 연구자의 멘탈 모형에 대한 동태성을 구체적으로 분석하기 위해 컴퓨팅 실험(simulation)을 진행해야 하는데, 이를 위해서는 멘탈 모형이 시뮬레이션이 가능한 컴퓨터 모형(hard model 또는 physical model)으로 설계되어야 한다. 이 때 주로 SFD(Stock and Flow Diagram)가 활용된다.

셋째, 컴퓨터 모형(SFD)을 시뮬레이션 함으로써 연구자는 문제를 야기하는 시스템의 동태를 파악할 수 있다. 이때 다양한 시뮬레이션 결과 값을 비교분석 가능하도록 테이블 또는 그래픽 기반의 민감도 분석(sensitivity analysis) 도구를 활용한다.

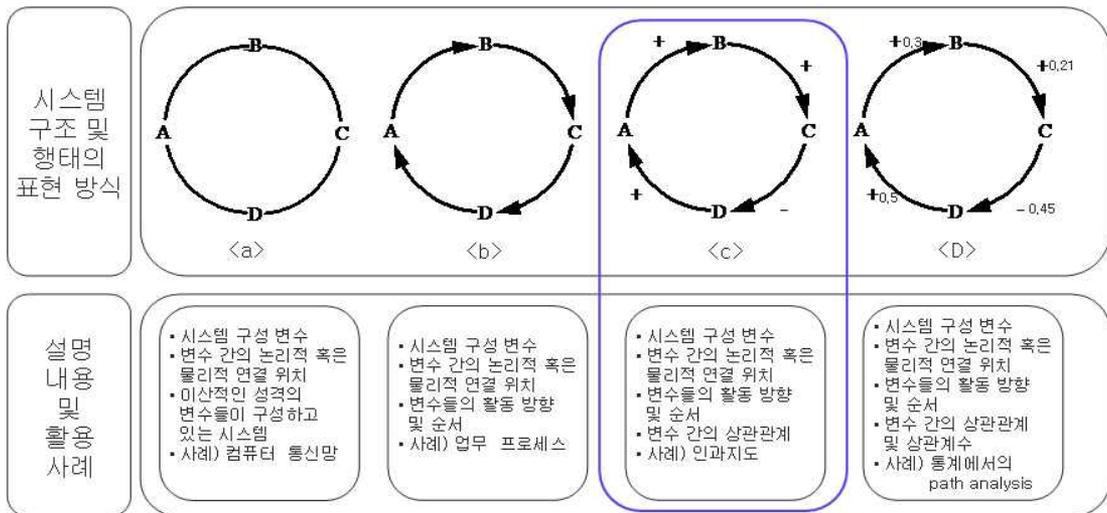
넷째, 분석된 시스템에서 연구자가 통제하고자 하는 대상과 그 내용(상태)을 바탕으로 문제를 해결할 수 있는 대안(alternative)들을 분석, 도출해 낸다. 개별 안에 대한 시뮬레이션 값들을 비교함으로써 가장 적절한 안을 최종 해(solution)로 채택, 활용한다. 시스템 다이내믹스에서는 이 과정에서 시스템 통제 가능 시점, 지점 등을 지렛대(leverage)라는 개념으로 정의하며, 문제의 해를 정책 또는 전략이라고 표현한다. 그리고 문제의 해는 SFD 상의 유량변수의 값(flow rate)의 변화에 따른 다양한 실험을 통해 도출된다.

다섯째, 최종 안을 실제 문제(시스템)에 적용한다. 이 때 몇 가지 고려사항이 있다. 먼저 연구 모형이 실제 시스템과 완벽하게 일치하지 않기 때문에 실험을 통해 밝혀낸 해의 결과가 실제 상황에서 어떤 효과를 나타낼지 확신할 수 없다. 따라서 지속적인 모니터링을 통해 연구과정의 첫 번째 단계로 피드백 하는 과정이 필요하다. 하지만 시스템 다이내믹스의 기존 문헌을 살펴보면 연구결과를 실제에 적용하고, 이를 다시 문제 분석 단계로 피드백 하는 사례는 아직 찾아보기 어렵다. 이는 연구자가 실제 사회적 시스템에 문제의 해를 적용할 수 있을 만큼의 의사결정권을 가지고 있지 못한 점도 있겠지만, 실제 시스템의 복잡성 때문에 실제 모형과 연구모형의 괴리로 인해 실제 문제를 해결할 수 있을 만큼의 해가 산출되지 않기 때문인 것으로 추정된다. 전자의 경우는 연구자의 연구외적 요인으로서 연구적 접근으로 해결할 수 있는 사항이 아니다. 그러나 후자의 경우 연구적 접근을 통해 연구모형을 실제 모형과 유사한 방향으로 개선, 발전시킴으로써 극복 가능한 부분이다. 이를 위해서는 시스템의 분석 및 설계, 타당성 검증 등 다양한 영역에서 이론적 개선을 위한 노력들이 필요하다.

2) 인과지도

인과지도(causal map, cognitive map, causal loop diagram, influence diagram, word-and-arrow diagram 등)는 연구자의 시스템에 대한 멘탈 모형(mental model)을 분석, 설계하는 과정에서 생성된 시스템의 구조와 동태를 그림(diagram)으로 표현한 산출물이다. 이는 동적 시스템을 분석, 정의하고 설명하는 데 유용하다(Richardson, 1997; Sterman 2000).

한편 그래프는 방향성이 없는 그래프(<a>), 방향성이 있는 그래프(), 그래프 구성 요소인 정점(변수)이나 선(인과경로)상에 라벨(label)을 표기한 라벨 그래프(<c>와 <d>) 등으로 구성된다(피터 린즈, 2008). 인과지도는 이 중 방향성을 가지는 라벨 그래프(labeled graph)의 유형에 해당한다. 각 그래프의 활용 사례 및 설명은 [그림 3]을 통해 살펴볼 수 있다.



[그림 3] 시스템의 구조 및 행태 표현의 종류

시스템 다이내믹스의 경우 시스템의 동태적 변화에 대한 분석을 중요하게 여기기 때문에 연구모형의 형태가 주로 피드백 루프(feedback loop)를 구성하는 인과적 모형(폐쇄적인 시스템 모형)으로 나타난다. 하지만 경우에 따라서는 피드백 고리가 없는 인과적 모형이 사용되기도 하며 그래프 사용 없이 논리적 기호만으로 인과관계를 정의하는 사례(논리나 명제를 설명하는 경우도 존재한다(함미옥, 홍영진, 2005)).

인문사회 영역에서 취급되는 문제는 복잡도가 높기 때문에 개별 변수 간의 인과관계를 명확하게 규명하기 어렵다. 따라서 인과관계가 확률적일 수밖에 없는데, 이는 기본적으로 시스템이 개방형임을 전제로 한다. 그러나 시스템 다이내믹스 연구자(system dynamicist)들은 주로 폐쇄적인 피드백 루프 중심의 연구모형을 설계함으로써 연구모형이 확정적으로 설

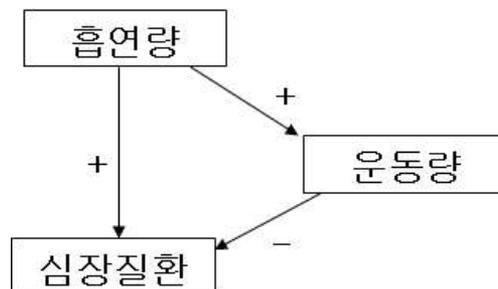
명되어지는 한계가 존재한다. 즉 연구모형 작성 시 연구자가 미처 파악하지 못한 변수 및 인과관계가 존재할 수 있기 때문에 해당 내용을 확정적으로 정의하게 되면 연구모형의 현실적 설명력(객관적 타당성)이 결여될 수 있기 때문이다. 물론 폐쇄적 시스템 관점이라 하더라도 문제 전체를 명확하게 설명할 수 있는 독립적 시스템(프렉탈처럼 독립적이면서도 문제 전체를 설명할 수 있는 하위구성 시스템)으로 정의할 수 있다면 개방형 시스템에 버금가는 연구적 접근이 이루어질 것이다. 시스템 다이내믹스가 추구하는 이상향이 바로 이것이지만 이는 현실적으로 어렵다. 따라서 시스템의 내외부적 환경 요인(제약)을 명확히 밝혀 특정 상황에서만 동작되는 모형을 정의하거나, 그렇지 않으면 다양한 동적 상황에서도 모형이 설명될 수 있도록 모형의 타당성을 강화할 필요가 있다. 이를 위해서 인과지도의 개념과 표현 기법에 대한 개선 연구가 이루어져야 한다. 관련연구로는 Richardson(1997), 정재운, 김현수(2007) 등이 있다.

Ⅲ. 인과모형 작성의 한계와 개선방안

1. 추정에 의한 허위적 인과모형

1) 부분의 합에 의한 논리적 오류

연구의 기본 바탕은 사실성과 객관성이다. 시스템 다이내믹스에서 강조하는 시스템적 사고 역시 이를 토대로 하고 있다. 하지만 사실적 사고를 바탕으로 문제를 분석하더라도 연구자는 변수들의 인과관계를 부분적으로 수집하기 때문에 전체 시스템의 구조와 동태는 이들의 부분적 합으로 만들어진다. 그러나 이 과정에서 부분과 전체의 인과적 일관성이 결여되는 경우가 발생한다.



[그림 4] Cartwright의 허위적 인과관계의 반증(Scheines, 2004)

일례로 Scheines(2004)에서 설명하고 있는 1979년의 Cartwright의 반증(counterexample)을 살펴보도록 하자. [그림 4]는 다음의 인과관계 ①, ②, ③을 별도의 검증 없이 단순히 연결만 해놓은 것이다.

- ① 흡연은 심장질환을 야기한다.(양의 인과관계) : 흡연량 \rightarrow 심장질환
- ② 흡연은 운동을 야기한다.(양의 인과관계) : 흡연량 \rightarrow 운동량
- ③ 운동은 심장질환을 억제하는 데 효과가 있다.(음의 인과관계) : 운동량 \rightarrow 심장질환
- ※ 원인변수 변화량의 감소에 대한 인과설명은 생략함

사전적으로 노출되어 있는 인과관계 ①, ②, ③이 존재한다고 할 때 이들을 활용하여 전체 인과모형으로 만들면 [그림 4]와 같이 나타난다. 여기서 인과관계 ①, ②, ③을 개별적으로 분석해보면 문제 될 것이 없어 보인다. 하지만 부분적인 관점과 전체적인 관점에서의 인과관계를 살펴보면 다음과 같은 논리적 오류가 발생한다.

- ① 흡연량 \rightarrow 심장질환
- ②+③ 흡연량 \rightarrow 운동량 \rightarrow 심장질환 : 흡연량 \rightarrow 심장질환

우선 인과관계 ①의 경우 흡연이 심장질환에 양의 인과관계를 미친다(흡연이 심장질환 유발에 양의 관계를 가진다). 그러나 ②와 ③이 결합된 인과관계(②+③)를 살펴보면 흡연이 운동에 양의 인과적 영향을 미치고, 이후 운동은 심장질환 유발에 역의 인과적 영향을 미침으로써 궁극적으로는 흡연이 심장질환 유발에 역의 인과성을 미치는 것으로 정의된다. 이는 ①과 ② \rightarrow ③의 인과관계를 구성하는 변수가 궁극적으로는 ‘흡연량’과 ‘심장질환’의 두 변수로 동일함에도 불구하고 서로 상반되는 인과관계가 동시에 양립하는 오류가 발생하는 것이다.

만약 흡연이 심장질환을 유발하는 인과성(①)보다 운동이 심장질환을 감소시키는 인과성(③)이 더 클 경우 흡연이 심장질환을 감소시킨다는 허위적(비사실적) 인과논리가 성립한다(Scheines, 2004). 이는 개별적(부분적)으로 존재하는 인과관계에 대해 아무런 검증 없이, 그리고 단순히 이들을 상호 연결하여 전체 모형을 별도의 검증과정을 거치지 않고 모형을 정의하는 방식에 문제가 있음을 보여주는 단적인 예가 되겠다.

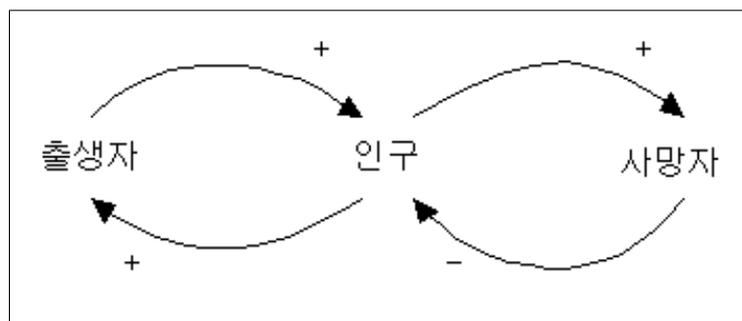
실제로 인과관계 ①과 ③에 대해서는 건강다이제스트, 삼성의료원 등의 자료를 통해 확인할 수 있지만 나머지 부분(②)에 대해서는 확인할 수 있는 문헌을 찾지 못했다. 이는 흡

연이 심장질환 등 건강의 위험요소를 증가시킴으로써 흡연자가 건강관리의 필요성을 인식한 결과로 운동을 하게 되는 경우가 생길 수도 있겠지만, 흡연자 중에서는 흡연 이외의 이유(여가활동, 체력증진, 재활훈련 등)로 운동을 하는 경우도 발생할 수 있다. 이처럼 다양한 원인에 의해 운동이라는 결과로 이어질 수 있지만 별도의 인과관계에 대한 검증(사실적 분석) 없이 추상적인 논리에 의해 변수 간의 단순 연결함으로써 연구모형에 오류가 발생한 것이다. 따라서 부분적으로 정의되어 있는 인과관계들을 통합할 때는 동일 변수에 대한 부분과 전체의 인과관계에 대한 일관성 검증과정이 필요하다. 검증과정에 대한 구체적인 설명 및 방안 제시는 3장 3절의 다요인에 의한 오류 부분에서 함께 논의된다.

한편 흡연량과 심장질환, 그리고 운동량 간의 인과관계를 보다 사실적으로 표현하기 위해서는 해당 변수들의 계량적 표현이나 인과관계가 작동하는 영역의 한계를 설정하는 것이 필요한데, 이는 실측이나 실험 없이는 언급하기 어려운 사항으로 본 논문에서는 논외의 대상으로 한다.

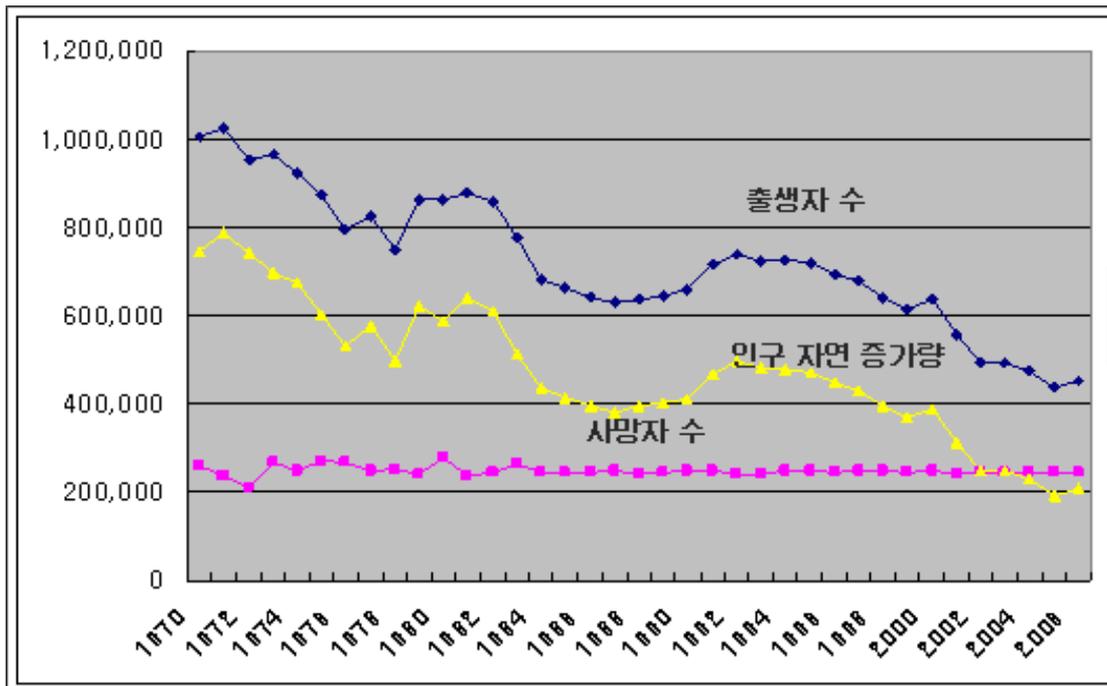
2) 검증되지 않은 인과적 설정에 의한 오류

이번에 살펴볼 모형은 변수 및 변수 간의 인과관계를 정의 할 때 실제적 시스템 구성과 이들의 동태를 제대로 분석하지 않고, 단순히 연구자의 논리적 근거(가설, 시나리오)만으로 인과모형을 추정함으로써 모형의 문제 설명력이 실제와 괴리를 나타내는 사례를 통해 살펴 보도록 한다. 그 대표적인 예가 [그림 5]의 인구 동태학적 모형이다.



[그림 5] 출생자-인구-사망자 인과모형(김도훈 외, 1999:65)

위의 그림은 시스템 다이내믹스(김도훈 외,1999) 상에서 인구의 동태학적 특성을 인과지도로 설명하기 위해 정의된 모형이다. 이는 그 동안 별다른 의문 없이 수용되어 왔던 모형이지만, 인구 변화에 대한 실증 자료를 바탕으로 해당 모형을 분석해보면 인구 동태학적 설명을 하기에는 모형의 구성에 논리적 한계가 존재함을 알 수 있다.



[그림 6] 실제 대한민국 인구 통계 자료(통계청, 2008)

[그림 6]은 [그림 5]에서 설명되어지는 출생자, 사망자가 인구의 동태적 변화에 어떤 영향을 주는지를 설명하는 실측 자료(대한민국 통계청, 2008)이다. 해당 그림을 보면 사망자 수는 1970년대부터 2008년 현재까지 큰 변화를 보이지 않고 일정 수준에서 유지되고 있다. 출생자의 경우 우하향 그래프를 그리며 지속적으로 감소하고 있다. 그러나 출생자 수가 사망자 수보다 여전히 많기 때문에 인구는 지속적으로 증가하고 있다. 이는 인구의 출생자 수에서 사망자 수를 뺀 인구 자연 증가량이 양수인 것을 통해서도 알 수 있다.

한편 이를 토대로 [그림 5]의 인구 동태학적 모형에 대한 타당성을 살펴보면 다음과 같은 오류를 범하고 있다.

첫째, 인구가 지속적으로 증가(인구의 자연 증가량이 계속 양의 값을 유지)하고 사망자 수가 일정 수준을 유지하고 있는 상황일 때 [그림 5]의 논리대로라면 출생자 수는 지속적으로 증가해야 한다. 하지만 현실에서는 오히려 그 반대 양상을 나타내고 있다. 즉 인구가 증가함에도 불구하고 출생자 수는 감소하고 있는 것이다.

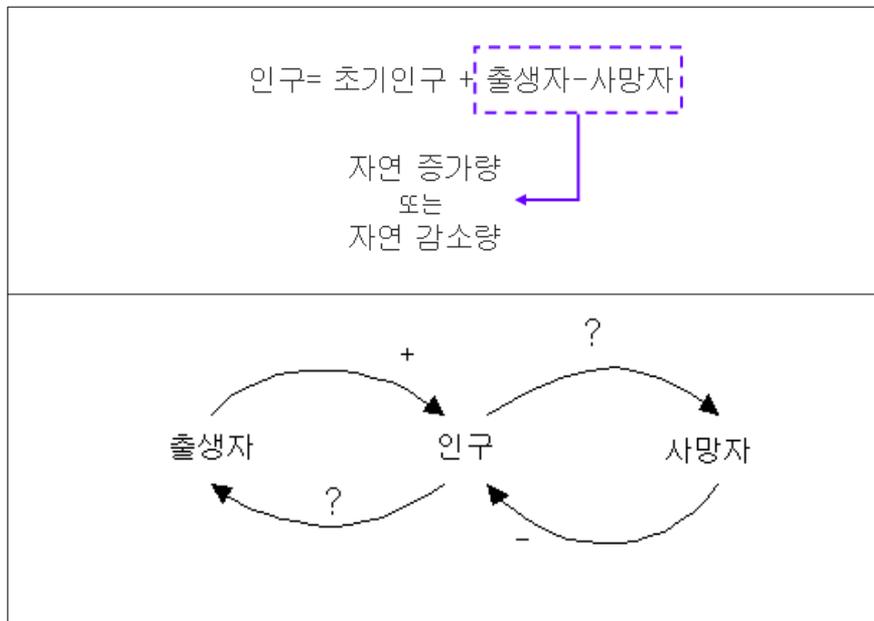
둘째, [그림 5] 모형에서 사망자 수가 일정하다는 전제하에 출생자 수가 감소하면 인구가 감소해야 하지만 현실은 그렇지 않다.

셋째, [그림 5] 모형에서 인구가 증가하게 되면 사망자 수가 증가할 것이라는 논리를 펴고 있지만 실제로는 인구의 변화와 상관없이 사망자 수는 일정 수준을 유지하고 있다.

해당 모형에 이 같은 문제들이 존재한다는 것은 변수들 간의 인과관계가 실제와 다르게

정의되었거나 누락된 변수 및 인과관계가 존재하기 때문이다. 즉 인과관계의 설명력이 부족한 두 변수를 마치 확정적인 인과관계인 것처럼 추정하여 인과모형을 정의함으로써 인구 동태학적 모형에 현실성이 결여되었다. 즉 인구의 동태성은 의료, 복지, 사회, 경제, 문화 등 다양한 요인에 의해 설명되어야 함에도 불구하고 단정적이고 확정적인 모형 정의에 의해 실제 문제의 분석적 한계를 드러내고 있는 것이다. 그렇다면 이 같은 오류는 왜 발생하였으며, 어떤 연구과정에서 발생했는지에 대해 살펴보도록 하자.

[그림 5]의 인과모형은 아래의 수식을 통해 도출될 수 있다. 인구는 초기인구, 출생자, 사망자 등 3가지의 변수로 계산된다.



[그림 7] 수정된 인구 동태적 인과모형

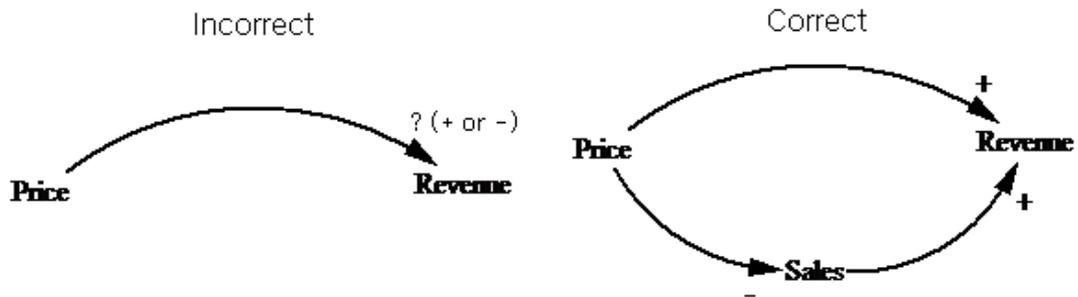
이때 흔히 우변의 변수 앞에 연산기호 '+' 또는 '*' 가 있을 경우 좌변의 변수와 양의 인과적 관계를 가지고, 우변의 변수 앞에 연산기호 '-' 또는 '/'가 있을 경우에는 좌변의 변수와 역의 인과적 관계가 있는 것으로 정의된다. 그리고 변수 간의 인과적 방향성의 우변에서 좌변으로 향한다(3장 4절 참조). 따라서 이러한 원리를 바탕으로 각 변수에 대한 인과관계를 도출하면 '출생자 \rightarrow 인구', '사망자 \rightarrow 인구'의 형태로 나타낼 수 있다. 물론 실제적 인과관계가 검증된 것은 아니지만 논리적 인과관계는 도출할 수 있다. 하지만 우변에 있는 변수들 사이의 인과관계나 좌변에서 우변으로의 향하는 인과적 관계(인구가 출생자와 사망자에 영향을 미치는 인과관계)를 정의할 수 있는 논리적 근거는 발견할 수 없다. 그럼에도 불구하고 연구자는 피드백을 강조하기 위해 인구가 출생자 및 사망자 수에 영향을 주

는 것으로 인과관계를 임의로 설정함으로써 인구의 동태학적 모형이 [그림 5]와 같이 정의 되는 오류가 발생하였다. 이러한 오류를 범하지 않기 위해서는 크게 네 가지의 노력이 필요하다.

첫째, 사실에 입각한 연구 모형 정의가 필요하다. 둘째, 수식을 인과모형으로 전환할 때는 연산기호의 사실적 표현에 입각해야 한다. 셋째, 시스템 다이내믹스에서 강조하는 피드백 형태의 인과모형을 만들기 위해 증명되지 않은 변수들 간의 인과관계를 불필요하게 추정해서는 안 된다. 넷째, 실제적 인과관계가 아닌 논리적 인과관계의 설정이라고 하더라도 논리적 근거 위에 인과관계가 설정되어야 한다.

2. 조건부 인과관계 설정의 오류

변수들 간의 인과성은 시간에 의해 설명되며 시스템의 동태성은 시간에 따라 달리 표현될 수 있다. 따라서 동일 시스템이라고 하더라도 시간의 변화에 따라 시스템의 동태성이 달라질 수 있기 때문에 동적 모형 설계를 위해서는 다양한 상황(조건)하에서 나타나는 여러 속성들을 시각적으로 표현할 수 있는 기호 및 작성체계가 지원되어야 한다. 하지만 인과지도의 경우 다양한 동태학적 속성을 뒷받침하기에는 부족한 부분이 있다. 그 대표적인 예로 Business Dynamics (Sterman, 2000:147)의 (그림5-7)을 언급할 수 있다. 이는 다음의 [그림 8]과 같다.



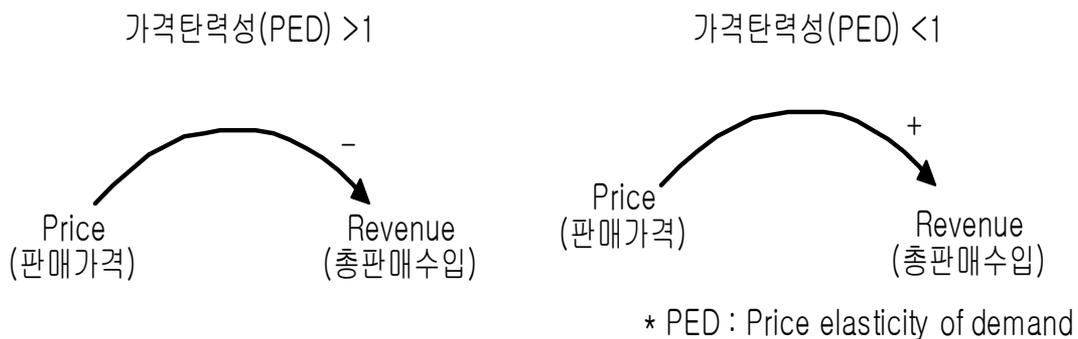
[그림 8] Sterman(2000:147)의 Revenue = Price*Sales에 대한 인과모형

[그림 8]은 Sterman이 동일 시스템이 상황에 따라 변하는 문제를 인과지도로 표현하는 방법을 제시한 사례로서 수식 “Revenue(총판매수입)=Price(제품판매가격)*Sales(판매량)”을 인과관계로 표현한 것이다. 여기서 Sterman은 시스템이 운영상황에 따라 전개되는 양상이 다르게 나타날 경우, 즉 환경의 조건에 따라 동일 변수 간이라도 인과관계가 서로 다르게 나타날 경우 어떻게 표현하는 것이 인과지도를 올바르게 작성하는 것인지에 대해 설명하고

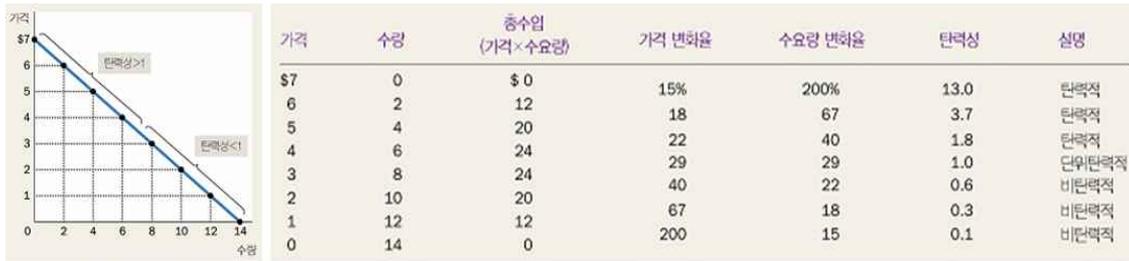
있다. 그 예로 제품의 판매가격과 판매수입에 대한 사례를 언급하고 있다. 제품의 가격 탄력성이 1보다 큰 경우와 1보다 작은 경우 제품 가격과 수입의 인과관계가 서로 다르게 나타나는데, 이런 상황을 표현할 때는 [그림 8]의 왼쪽 형태로 그리는 것보다 오른쪽 형태로 나타내는 것이 바람직하다고 하였다. 즉 하나의 인과경로에 동시에 양립할 수 없는 두 가지의 인과관계를 모두 표시하는 것은 바람직하지 않다는 것이다. 따라서 두 변수간의 명확한(단일) 인과관계가 드러나는 수준까지 변수들의 인과관계를 구체화하여 인과지도를 그리는 것이 올바른 인과지도 표현법이라고 소개하고 있다. 하지만 [그림 8]의 오른쪽 모형 역시 잘못된 인과지도 작성 사례이다. Sterman의 이 같은 표기 방식은 앞서 살펴본 Cartwright의 반증(counterexample)에서 언급된 것처럼 서로 상반되는 상황이 동시에 양립하는, 모순된 인과지도 작성 사례이다. 가격이 수입에 양의 인과관계를 가지면서 동시에 가격이 수입에 음의 인과관계를 가질 수는 없기 때문이다.

한편 해당 사례는 앞서 살펴본 Cartwright의 사례와 차이점이 있다. Cartwright의 사례는 부분적 인과관계를 전체적으로 통합하는 과정에서 오류를 발생시켰지만, [그림 8]의 경우에는 동시에 발생할 수 없는 인과관계를 하나의 도면에 표현하는 과정에서 오류를 발생시켰기 때문이다. 따라서 이는 동일 변수 간의 서로 다른 인과적 상황을 하나의 도면상에 표현하기 위한 기호체계가 마련되어 있지 않음으로써 발생한 오류로 정의할 수 있다.

실제로 제품가격과 총판매수입의 인과관계를 따질 때 가격탄력성이라는 환경적 조건에 따라 이들을 달리 정의할 수 있다. 이때 [그림 8]에서 Sterman이 표현하고자 했던 내용(판매가격과 총판매수입)의 인과관계를 그리면 Price \rightarrow Revenue(가격탄력성이 1보다 큰 경우) 또는 Price \leftarrow Revenue(가격탄력성이 1보다 작은 경우)로 표현할 수 있다([그림 9]). 이에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.



[그림 9] 판매가격과 총판매수입 간의 관계

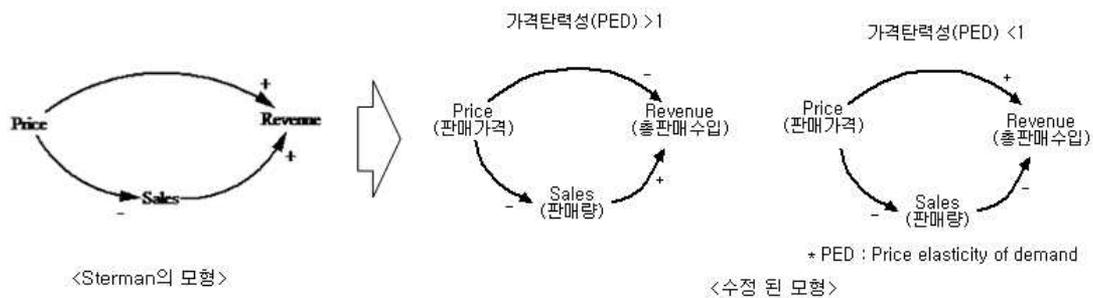


[그림 10] 제품가격, 판매량, 총판매수입, 가격탄력성의 관계(Mankiw, 2000) 가격단위: 달러(\$)

기업의 제품 판매수입은 제품가격과 판매량의 곱으로 결정되는데, 이때 이론적으로 제품의 가격 탄력성(price elasticity of demand)이라는 시스템의 환경적 특성(조절변수의 개념)이 존재한다. 즉 제품이 1보다 큰 가격 탄력성의 특성을 가지고 있으면 가격의 증감에 따라 판매수입은 역의 방향으로 증감하고, 제품이 1보다 작은 가격 탄력성의 특성을 가지고 있으면 가격의 증감에 따라 같은 방향으로 판매수입이 증감한다. 따라서 가격탄력성이라는 시스템의 환경적 상황(condition)에 따라 판매가격과 총판매수입 간의 인과관계가 서로 다르게 나타난다. 하지만 총판매수입은 판매가격과 판매량(수량)이 함께 존재해야 계산되어지기 때문에 [그림 10]을 통해 세 변수의 인과관계를 살펴볼 필요가 있다. 해당 자료를 보면 가격탄력성은 판매가격과 판매량의 변화로 인해 분석되어지는 판매가격 변화율(가격 변화율), 판매량의 변화율(수요 변화율)에 의해 계산되어지는 종속 변수이다. 따라서 앞서 살펴본 것처럼 가격 탄력성에 의해 가격과 수요의 변화가 결정되는 것이 아니라, 실제로는 가격과 수요의 변화에 의해 가격탄력성이 결정되는 것이다. 또한 표면적으로는 가격탄력성이 1보다 크던 작던 간에 가격과 판매량 사이에는 상관관계의 극성 변화가 없기 때문에 동태적 변화가 없는 것처럼 보인다. 하지만 실제 인과관계를 따져보면 가격 변동 폭이 각 구간 별로 일정하더라도 구간별 가격 변화율이 서로 다르며 판매량의 변화율 역시 각 구간마다 다르게 나타난다. 또한 그 결과로 가격탄력성의 크기가 달라짐을 볼 수 있다. 이 외에 가격이 \$0보다 작은 경우는 없다는 가정 하에 \$7 이상인 상황에서는 판매량(수요)이 존재하지 않으므로 인과관계가 더 이상 성립되지 않는다. 이처럼 인과 분석이 사실적이고 개방적인 관점에서 진행되지 않으면(문제를 구성하는 다양한 변수를 고려하지 않으면) 실제 시스템의 운영 메커니즘을 제대로 파악하기 어렵다. 이는 곧 연구 모형의 잘못된 설계로 이어져 타당성에 문제를 야기한다. 한편 [그림 10]을 통해 분석된 인과관계를 정리하면 <표 1>과 같다.

<표 1> 가격탄력성에 따른 가격과 수입의 인과관계

구분	가격탄력성의 크기	가격-수입의 관계	가격-판매량의 관계	판매량-수입의 관계	가격-판매량-수입의 관계
1	1초과	가격 \rightarrow 수입	가격 \rightarrow 판매량	판매량 \rightarrow 수입	가격 \rightarrow 판매량 \rightarrow 수입
2	1미만	가격 \rightarrow 수입	가격 \rightarrow 판매량	판매량 \rightarrow 수입	가격 \rightarrow 판매량 \rightarrow 수입
3	1	관계없음	가격 \rightarrow 판매량	관계없음	가격 \rightarrow 판매량 ? 수입



[그림 11] Sterman 모형의 수정 전과 후

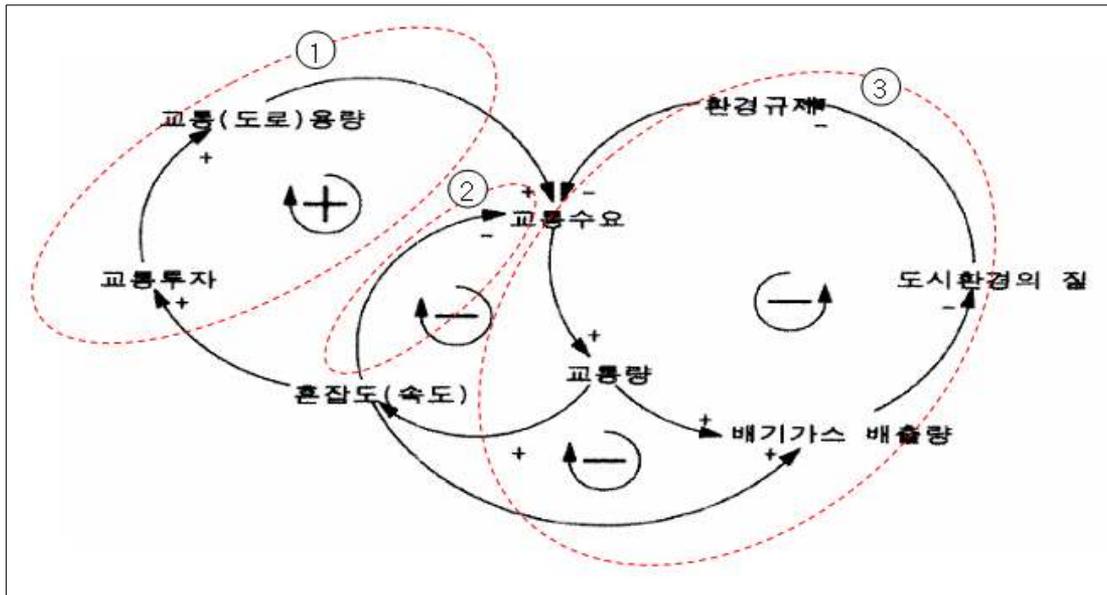
수요(판매량)는 직선 그래프임을 가정한다. 그렇지 않으면 제품의 가격탄력성을 논의하기 어렵기 때문이다. 실제 경제학에서도 이 같은 가정을 사용한다. 그런데 여기서 주목할 점은 바로 판매가격(Price)과 총판매수입(Revenue)의 두 변수 간 인과관계이다. 해당 두 변수 간의 인과관계는 ‘판매가격-판매량-총판매수입’의 표현적(표면적) 인과관계이다. 즉 ‘가격탄력성>1’인 상황에서 판매가격과 판매량 간 상관관계의 극성이 ‘-’이고, 판매량과 총판매수입 간 상관관계의 극성은 ‘+’으로 나타난다. 따라서 판매가격과 총판매수입 간의 표현적 인과관계에 대한 극성은 ‘-’이다. 반대의 경우(가격탄력성<1)는 두 변수 간의 표현적 인과관계에 대한 극성이 ‘+’가 된다. <표 1>의 인과관계를 [그림 9]의 형태로 표현하면 [그림 11]과 같다. 그리고 ‘판매가격 → 총판매수입’의 인과경로와 ‘판매가격 → 판매량 → 총판매수입’의 인과경로는 전체적인 관점에서 동일 변수 간의 경로이기 때문에 둘 중에 하나만 표현하는 것이 가능하며, 계량적 데이터를 기반으로 인과지도를 작성하는 경우 모형 작성에 사용되었던 데이터를 모형과 함께 제시함으로써 모형의 객관적 타당성을 확보할 수 있다.

한편 Sterman은 조건부 시스템의 특성을 표현할 필요성에 대해서 문제제기를 하였지만 이를 제대로 표현할 수 있는 방안을 제대로 제시하지 못하였다. 이는 타당성의 논리적 검증 과정이 누락되었기 때문이다. 따라서 동시에 양립할 수 없는 서로 다른 두 상황을 별도의 상황적 설명 없이 [그림 8]과 같이 표현함으로써 서로 다른 두 시스템이 마치 동시에 발생 가능한 것으로 오인하게 만들었다. 이에 해당 문헌을 참조하는 많은 연구에서 잘못된

인과지도가 연구모형으로 작성되는 등 동적 시스템 분석 및 설계의 체계에 많은 문제를 야기하고 있다. 이 같은 오류를 범하지 않기 위해서는 모형을 정의할 때 문제의 상황적 설명(제약조건)을 명시하고, 다양한 상황에서 동일 변수 간의 인과관계를 달리 표현해야 하는 경우 상황별로 인과관계를 설정함으로써 기존의 문제를 해결할 수 있다.

3. 다요인에 의한 오류

본 절에서는 앞서 살펴본 3장 1, 2절의 오류를 복합적으로 범하고 있는 최남희, 김선경(2001)의 교통정책 관련 모형(그림 12)에 대한 사례를 통해 인과모형의 타당성 검증 방안을 논의해보고자 한다.



[그림 12] 교통과 환경 간의 관계를 설명하는 연구 모형 (최남희, 김선경; 2001:104)

[그림 12]에 대한 타당성을 분석하기 전에 모형(시스템)을 구성하고 있는 변수의 정의 상태를 확인해 볼 필요가 있다. 교통의 ‘혼잡도’와 자동차의 주행 ‘속도’는 서로 음의 상관관계이기 때문에 두 변수를 하나의 범주로 묶어 단일 변수로 정의하기 어렵다. 따라서 ‘속도’를 ‘정체시간’ 등으로 바꾸던지 ‘속도’를 제거하는 것이 바람직하다. 여기서는 ‘속도’를 삭제하기로 한다. 시스템 구성 변수들의 부분과 전체의 인과성에 대한 타당성을 분석할 때 변수들 간의 경로를 개별적으로만 분석해서는 모형의 오류를 찾아내기 어렵다. 따라서 Cartwright의 모형에서 살펴본 바와 같이 인접한 변수들이 다수 존재할 경우 개별 인과관계를 상호 비교해보거나 인접한 인과관계 외에 특정 변수와 관련되어 있는 전체 경로의 극

성(상관관계)을 함께 비교, 분석함으로써 경로의 일관성을 파악해 볼 필요가 있다(정재운, 김현수; 2007). 이러한 원리에 따라 [그림 12]의 모형을 분석하면 결론적으로 ‘혼잡도’와 ‘교통수요’ 간의 인과경로에 일관성이 결여된 사실을 도출해 낼 수 있다. ‘혼잡도’와 ‘교통수요’ 두 변수 사이에 존재하는 경로는 ‘혼잡도 \rightarrow 교통투자 \rightarrow 교통(도로) 용량 \rightarrow 교통수요’(경로①), ‘혼잡도 \rightarrow 교통수요’(경로②), ‘혼잡도 \rightarrow 배기가스 배출량 \rightarrow 도시환경의 질 \rightarrow 환경규제 \rightarrow 교통수요’(경로③) 등 3가지다. 이 때 경로상의 계수를 제외한 인과관계의 극성만 고려했을 때, 동일 시스템의 같은 상황(조건)에서는 ‘혼잡도’ 변수와 ‘교통수요’ 변수 간의 인과관계는 3가지 모두 궁극적으로 동일한 표현 속성(극성)을 가져야 한다. 이는 앞서 살펴본 Cartwright의 반증에서 주장하는 것처럼 혼잡도가 증가할 경우 서로 모순되는 상황이 동시에 양립하는 오류를 야기하지 않게 하기 위함이다. 하지만 [그림 12]의 모형에서는 아래와 같이 동일 변수 간의 인과관계가 상호 모순되는 상태로 동시에 양립하고 있다.

경로① 혼잡도 \rightarrow 교통투자 \rightarrow 교통(도로) 용량 \rightarrow 교통수요 요약 : 혼잡도 \rightarrow 교통수요
경로② 혼잡도 \rightarrow 교통수요
경로③ 혼잡도 \rightarrow 배기가스 배출량 \rightarrow 도시환경의 질 \rightarrow 환경규제 \rightarrow 교통수요 요약 : 혼잡도 \rightarrow 교통수요

즉 경로①에서는 혼잡도가 증가하면 교통수요가 증가하는데, 경로②, ③에서는 교통수요가 감소한다. 이때 경로①의 인과성이 다른 경로보다 강할 경우 혼잡도가 증가함으로써 교통수요가 증가하는 비현실적 상황이 전개되는 문제가 발생한다. 만약 상황에 따라 동일 두 변수가 서로 다른 인과관계가 성립할 경우 3장 2절에서 언급한 바와 같이 시스템적 상황(조건)이 서로 다르다는 것을 명시하거나 상황별로 모형을 분리하여 작성하는 것이 바람직한 모형 작성법이라 하겠다.

한편 [그림 12]의 경로①의 표현적 인과관계는 최남희, 김선경(2001)의 ‘교통 혼잡도가 증가하면 교통 수요가 감소’한다는 원칙에 위배된다. 따라서 이를 교통의 혼잡도와 교통수요의 인과관계가 역의 관계를 가지도록 해당 경로를 수정해야 한다. 이럴 경우 경로①은 경로②와 ③의 인과관계의 표현적 극성이 동일하게 됨으로써 모순되는 상황이 양립하는 오류를 제거할 수 있다. 단 이때 교통 용량 증설 투자를 통해 혼잡도를 조절하는 메커니즘은 훼손하지 않는 방향으로 인과경로를 재설정해야 한다. 이는 개별적으로 논리적 타당성

을 갖추고 있는 경로① 상의 세부 인과관계들의 논리적 타당성이 훼손되는 것을 방지하기 위함이다. 이를 위해 경로①을 세부적으로 살펴보자. 교통의 ‘혼잡도’가 증가하게 되면 이를 해결하기 위한 수단으로 ‘교통투자’가 늘어난다. ‘교통투자’가 많아질수록 ‘교통(도로)용량’이 증가하게 되며, 그 결과로 교통의 ‘혼잡도’가 감소하고 교통의 편의성이 향상됨에 따라 ‘교통수요’가 증가하게 된다. 그렇다면 경로①에서의 ‘교통(도로) 용량’이 곧장 ‘교통수요’에 연결되기 보다는 ‘교통(도로) 용량’과 ‘교통수요’ 사이에 교통 ‘혼잡도’ 변수를 추가함으로써 문제의 구조 및 동태를 설명하는 것이 더 자연스럽다. 또한 이 과정에서 ‘교통(도로) 용량’과 ‘교통수요’ 간의 표면적 인과관계를 변화시키지 않으면서도 ‘혼잡도’와 ‘교통수요’의 인과관계를 역의 관계로 수정할 수 있다. 이를 정리하면 아래와 같다.

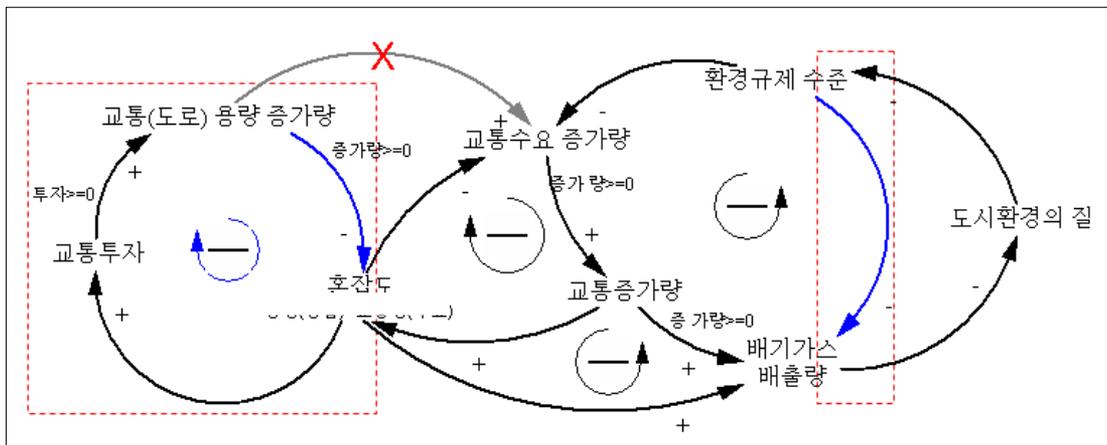
표면적 인과관계) 교통(도로) 용량 \rightarrow 교통수요
 세부적 인과관계) 교통(도로) 용량 \rightarrow 혼잡도 \rightarrow 교통수요
 = 교통(도로) 용량 \rightarrow 교통수요

이 외에도 [그림 12] 모형에 대해 다음의 몇 가지 사항을 짚어볼 필요가 있다.

첫째, 현대·기아자동차(2007)와 통계청의 자료를 보면 자동차 보유대수는 인구 증가 및 경제 발전 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 실제로 통계가 집계된 이후부터 2006년까지 자동차 보유대수는 세계적으로 계속 증가해왔다. 이는 전국 및 지역 단위로 분석해도 같은 결과를 도출할 수 있다. 또한 전국의 주차 시설 및 도로 인프라도 증가추세를 보이고 있다. 앞으로도 지속적으로 인구는 증가할 것이고 특별한 환경적 변화가 없는 한 이와 같은 추세는 계속될 것이다. 이를 근거로 한다면 교통수요와 교통용량은 증가 방향으로만 변할 것이라는 것을 유추할 수 있다. 따라서 [그림 12]의 인과모형의 메커니즘은 ‘교통용량’과 ‘교통수요’ 변수의 값이 증감하는 것이 아니라 증가 값의 크기(변화량)가 달라짐으로써 발생하는 동태학적 특성을 설명하는 구조로 정의되어야 한다. 이러한 주장에 대해 변수 정의시 증가 또는 감소라는 용어를 사용하지 않는 것이 올바른 인과지도 작성법이라는 문제 제기를 할 수 있으나, 이는 해당 시스템의 구조적 특성을 제대로 이해하지 못함으로써 발생하는 문제인 것이다.

둘째, 환경과 교통수요 간의 메커니즘을 설명함에 있어서 환경규제가 교통수요를 통제해서 배기가스 배출량을 감소시키고, 이에 따라 도시환경의 질적 개선이 이루어진다는 내용이 해당 모형을 통해 설명되고 있다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 실제로 도로 위의 자동차 수는 계속 증가하고 있기 때문에 자동차 수(교통수요)를 감소시켜 환경의 질을 개선한다는

논리는 현실성이 부족해 보인다. 또한 실질적으로 환경규제가 매연저감장치 장착, 경차 세제 혜택, 경유의 세금 부과 확대 등의 방식을 통해 배기가스의 양을 조절하는 도구로 활용되고 있기 때문에 이와 관련된 내용을 추가하는 것이 모형의 설명력을 향상시킬 수 있는 방안이 된다. 이 같은 문제 인식 및 해결 방안을 바탕으로 [그림 12]의 시스템 구성 변수에 대한 속성(변수명)과 인과관계를 [그림 13]의 형태로 수정, 보완하였다.



[그림 13] [그림 12]의 수정 결과

첫째, ‘혼잡도’와 ‘교통수요’ 간의 인과 경로를 수정하였다(왼쪽 점선 사각형 부분). 즉 기존의 ‘교통(도로) 용량 \pm , 교통수요’를 ‘교통(도로) 용량 \rightarrow 혼잡도 \rightarrow 교통수요’의 형태로 인과관계를 세분화하고 기존의 ‘교통(도로) 용량 \pm , 교통수요’ 인과 경로를 삭제하였다. 그리고 ‘교통(도로) 용량’과 ‘교통수요’ 변수에 ‘증가량’이라는 수식어를 추가하였다. ‘교통투자’, ‘교통(도로)용량’, ‘교통수요’가 현실 상황에서는 증가하는 쪽으로만 전개되기 때문에 해당 인과관계의 경로 값(계수)을 “ ≥ 0 ”으로 설정(제약)하여 표기하였다. 이러한 제약 표기는 해당 문제 상황을 명확히 함과 동시에 행여나 고려되지 않은 예외상황에 의해 모형의 설명력을 떨어뜨리는 경우를 배제하기 위함이다.

둘째, ‘환경규제 수준’과 ‘배기가스 배출량’ 간의 인과관계를 추가하였다(오른쪽 사각형 부분). 이는 환경규제가 실질적으로 차량대수(교통수요)를 조절하는 것보다 차량의 배기가스 저감장치 장착 등의 요인에 의해 배기가스 배출량을 직접적으로 영향을 미치는 부분이 있기 때문에 해당 인과경로를 추가하였다. 하지만 이는 표면적으로 ‘환경규제 수준’ \rightarrow 교통수요 증가량 \rightarrow 교통증가량 \rightarrow 배기가스 배출량과 중복되는 인과관계를 나타낸다는 점에서 모형의 복잡도를 증가시킨다.

한편 수정 모형의 개념적 수준은 기존 모형에서 설명하고자 하는 개념적 수준에서 정의하였다. 해당 문제를 정의하기 위해서는 보다 많은 변수들의 정의 및 재설정이 필요하지만

[그림 12]에서 언급하고 있는 정도에서 수정 작업을 진행하였다.

4. 수식의 인과적 표현의 한계

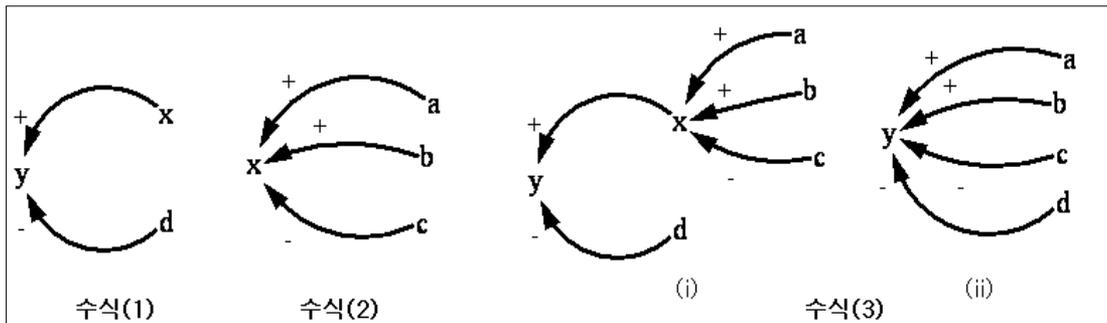
‘Revenue=Price*Sales’의 문제처럼 변수들을 수식으로 표현할 수 있는 인과관계를 확정적 인과관계라고 하며, 그 이외의 인과적 관계를 확률적 인과관계라고 한다(통계교육원, 2008). 한편 수식에 대한 인과적 표현은 [그림 14]의 형태로 표현할 수 있다.

$$y = x - d \tag{1}$$

$$x = a \times b / c \tag{2}$$

$$y = (a \times b / c) - d \tag{3}$$

단, $\{a, b, c, d, x, y\}$ = 변수, 변수 a, b, c, d 간에는 인과적 관계 없음



[그림 14] 수식의 인과관계 표현 방식

첫째, 수식(1), (2), (3)의 예가 있을 때 등호(=)를 중심으로 좌변과 우변을 구분하면 우변에 있는 변수가 원인변수, 좌변에 있는 변수가 결과변수가 된다. 따라서 이를 보고 인과관계의 방향성을 결정할 수 있다.

둘째, 수식의 산술연산자 중에 “+”나 “*” 기호가 있으면 양(+), “-”나 “/” 기호가 있으면 음(-)의 관계로 정의할 수 있다.

이를 근거로 수식(1), (2), (3)을 인과모형으로 표현하면 [그림 14]의 형태가 된다. 단, 수식 (1), (2), (3)을 구성하는 변수의 값이 양수임을 전제로 한다. 이는 변수의 값이 영(0)일 경우 해당 인과모형의 메커니즘이 다르게 나타나기 때문이다. 수식(2)에서 변수 a와 b 둘 중 하나라도 영(0)인 값을 가지게 되면 주변의 다른 변수들이 아무리 변해도 해당 수식의 좌변에 있는 변수 x는 0인 상태에서 아무런 변화를 보이지 않는다. 그렇게 되면 표면적으

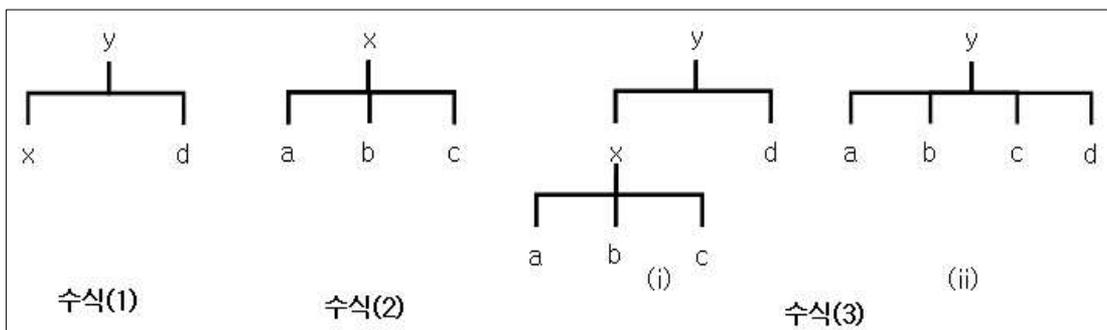
로는 좌변과 우변은 서로 관련성이 없는 것처럼 보인다.

한편 수식(1)의 우변에 x 가 존재한다. 이를 하나의 시스템으로 본다면 식(2)의 우변은 그 하위 레벨의 시스템 구성이 된다. 따라서 이를 식(1)의 우변에 있는 x 를 식(2)의 우변에 있는 변수들로 치환할 수 있다. 이때 [그림 14] 수식(3)의 (i), (ii) 두 가지 형태로 표현할 수 있다. 그러나 변수의 개념적 수준 및 시스템의 복잡도의 효율적인 관리를 위해서는 (i)보다 (ii)형태로 표현하는 것이 안정적인 모형을 설계하는 데 적합하다.

이처럼 수식(확정적 인과관계)을 인과모형으로 전환하기 위해서는 관련 제약을 명확히 분석, 정의할 필요가 있다. 또한 제약을 설정하지 않는 경우에는 다양한 동태적 특성이 인과모형을 통해 설명될 수 있도록 정의해야 한다.

5. 변수의 개념적 계층 분류의 어려움에 따른 모형의 복잡성

개념적 수준(개념의 크기)이 서로 다른 변수들이 혼재되어 있는 시스템을 인과모형으로 설계할 때 이들을 계층화하는 작업이 필요하다. 만약 특정기준에 의해 변수의 개념적 분류가 되지 않은 상태에서 인과모형을 만들게 되면 모형의 복잡도가 심화된다. 특히 변수의 개념적 계층 구조가 구분되어 있지 않기 때문에 모형의 일반화(요약) 또는 상세화 과정이 제대로 이루어지지 않는다. 이렇게 되면 문제의 모형의 설명이 불필요하게 복잡해져 연구의 효율성을 떨어뜨리게 된다. 그 예로 정재운 외(2007)에서 문헌 기반의 기업의 핵심성공요인 모형을 작성하는 과정에서 기업의 성공과 관련된 요인들의 개념적 수준을 제대로 분류하지 못해 성공영역별로 존재하는 개별 모형을 분리, 통합하는 데 어려움을 겪은 바 있다. 따라서 모형의 일반화 및 상세화, 영역별 분리 및 연계가 가능하도록 변수의 개념적 수준을 체계적으로 정의하고 관리할 필요가 있다.



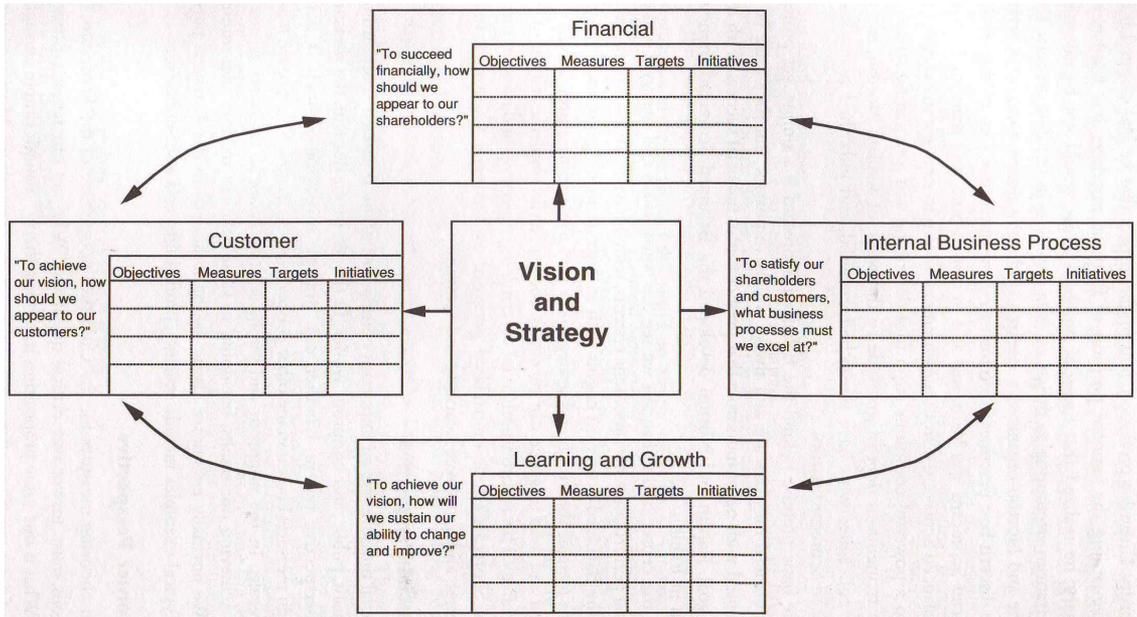
[그림 15] 변수의 개념적 수준에 따른 체계 분류

한편 변수의 개념적 수준을 정의할 때 앞서 살펴본 수식(1), (2), (3)처럼 등호에 의해 좌우가 명확하게 구분되어 있으면 변수들 간의 개념적 크기를 구분하기 용이하겠지만, 현실 문제에서는 수식과 같이 개념적 수준이 명확하게 구분되는 경우가 흔치 않기 때문에 체계적인 변수의 개념적 분류를 바탕으로 인과모형을 설계하는 것은 힘든 일이다.

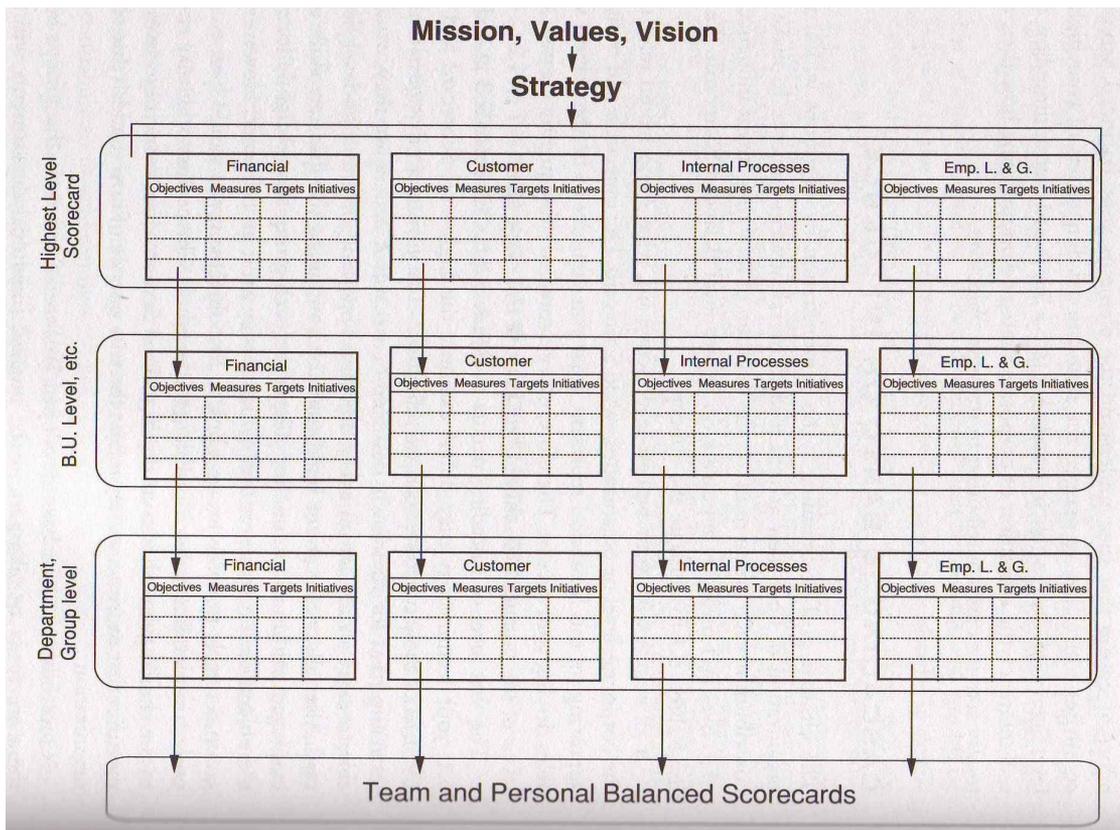
실제로 Forrester(1961)에서 변수의 통합을 위해 몇 가지 지침을 제공하고 있지만, 이 역시 단어의 범주화(categorization)를 통해 변수들의 개념을 통합하는, 일반적인 개념적 추상화 방법을 제시하고 있을 뿐이다. 현실에서는 수많은 변수들이 여러 영역에서 복합적으로 관계를 형성하고 있으며, 또한 개념적으로 모호한 정성적인 개념의 변수들이 존재하기 때문에 변수들의 인과관계를 특정 기준에 맞춰 분류하는 것이 쉽지 않다. 때문에 정성적인 변수들을 정량화하여 체계적으로 분류할 수 있도록 AHP, 델파이기법, 리커트 척도 등과 같이 정성적이고 모호한 개념을 정량화할 수 있는 기존의 기법들을 활용하여 변수들을 체계적으로 분류하여 인과모형을 정의하는 새로운 응용 연구가 진행될 필요가 있다. 이를 통해 인과관계의 계층적 분류 방법이 만들어지면 동태적 프로세스 설계 및 프로세스 상의 성과관리를 위한 모형 설계 등 기존의 인과지도가 표현하지 못했던 응용분야의 모형들을 표현하는 것이 가능해진다.

6. 응용분야의 연구모형 정의의 한계

인과관계의 개념을 활용하여 모형을 정의할 수 있는 대표적인 분야가 성과모형이다. 기업의 성과관리 모형 중 동적(인과관계) 개념을 가지고 있는 BSC(균형성과표, Balanced Scorecard)의 경우 1990년 Robert Kaplan과 David Norton에 의해 만들어졌다. 기존의 기업 성과 관리가 재무적 중심으로 이루어지던 상황에서 재무적 관점만으로는 조직 전체의 성과를 측정, 관리할 수 없다는 문제 인식하에 [그림 16]과 같은 성과관리 시스템을 개발하였다. 이를 보면 BSC의 성과 측정 및 관리는 재무적 관점(financial perspective), 고객 관점(customer perspective), 내부 프로세스 관점(internal business process perspective), 학습 및 성장 관점(learning and growth perspective) 등 4가지 관점에서 이루어진다. 또한 해당 모형에서 확인되는 바와 같이 조직의 비전 및 목표전략과 앞서 언급된 4가지 영역이 인과적으로 연계되어 설정, 관리된다. 이 때문에 BSC 성과관리 시스템이 재무적 관점의 정량적, 이산적 성과관리의 한계에서 벗어나 조직의 전반적인 영역에서 인과관계를 구성하는 성과 지표들을 바탕으로 유기적이고 전략적인 성과관리가 가능해지는 것이다(Niven, 2005). 이것이 기존의 성과관리 시스템보다 BSC가 유용하다고 평가받는 이유이다.



[그림 16] BSC의 프레임워크(Niven, 2005, p.14에서 재인용)



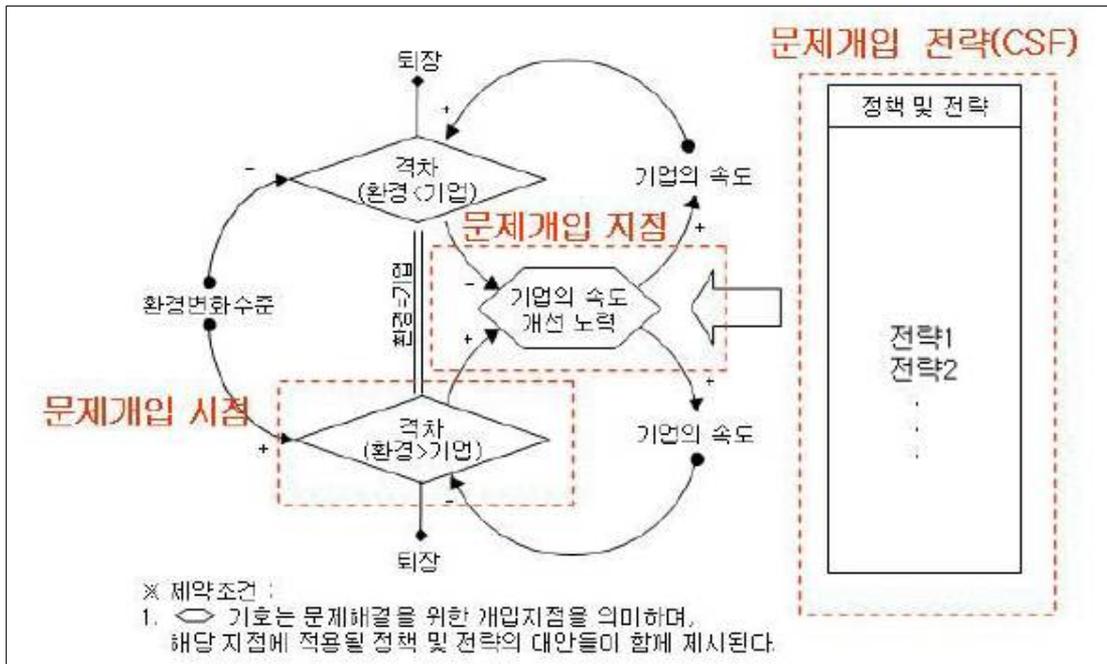
[그림 17] BSC의 영역 및 계층적 구조(Niven, 2005, p.132)

한편 BSC는 조직의 비전 및 목표를 달성할 수 있는 핵심성공요인(critical success factor)을 설정하고, 이를 측정, 관리할 수 있는 핵심성과지표(key performance indicator or index)를 개발하는 과정이 요구된다. 이에 이장희, 강수진(2006), 김순기 외(2006) 등과 같이 조직의 성과관리를 위한 핵심 요인 및 지표들을 규명하고 발굴하는 연구들이 전개되고 있다. 그리고 BSC 연구의 성숙도가 높아짐에 따라 Huang et al.(2008), 조현웅 외(2007) 등 시간(지연, delay) 개념을 포함한 동적(dynamic) BSC 관련 연구들이 진행되고 있다.

현실적으로는 기업의 폭넓은 영역을 대상으로 성공 및 성과관리 요인을 실증 분석을 통해 도출해 내기란 어려운 일이며, 관리적 관점에서도 많은 요인을 산정하고 관리하는 것도 바람직하지 않다. 따라서 성과관리의 효과성과 효율성이 균형을 이루는 적정 수준에서 해당 모형이 설계되어야 한다. 이를 위해서는 [그림 17]과 같이 BSC의 4개의 관점(영역)에서 고려되는 변수들이 개별 관점별로, 그리고 계층별로 개념적 분류 및 연계가 체계적으로 이루어져야 한다. 그러나 실질적으로는 이러한 연구과정이 제대로 진행되지 않고 있다는 게 해당 응용연구의 문제점으로 작용하고 있다. 즉 성과관리에 필요한 요인들의 상세 수준이 각기 다르거나 모형의 통합과정에서 세부 영역별 인과관계가 제대로 연결되지 않음으로써 동태적 성과관리 모형을 설계하는 데 한계를 드러내고 있다. 따라서 앞으로 보다 발전적인 성과모형을 만들어 내기 위해서는 변수들의 개념적 계층분류와 동일 계층 내에서의 변수들 간 인과관계 정의가 체계적으로 이루어질 필요가 있다.

7. 개방적 모형의 표현적 한계

시스템 다이내믹스는 피드백 형태의 인과모형을 분석하는 데 초점이 맞춰져 있기 때문에 개방형 시스템 관점의 분석, 설계 방식에 대한 인식이 부족하다. 하지만 실제 시스템은 논리적 전개에 따라 시스템의 양태가 다양하게 나타난다. 실제 시스템은 폐쇄형이 아니라 개방형 시스템의 형태로 존재하기 때문에 다양한 동태적 상황을 인과모형으로 표현할 필요가 있다. 하지만 기존의 인과지도 작성체계는 단순하기 때문에 다양한 개념적 표현을 하기 어렵다. 다양한 시스템의 동태적 상황을 분석하고 문제를 해결하기 위해서는 시스템의 동작을 유발(시작)하는 트리거(trigger), 시스템 동작을 멈추게 하는 스톱퍼(stopper), 시스템의 운영 상황(조건)을 표현하고 동태의 변환점을 설명하는 논리적 전환자(switch) 등에 관한 개념을 표기할 수 있는 체계가 제공되어야 한다. 그러나 이러한 개념들이 인과모형에서 표현되기 위한 작성 체계가 아직 마련되어 있지 않다. 또한 시스템의 동태적 분석 및 설계 시 시스템의 다양한 제약 사항을 기술하고 표기할 수 있는 이론적 체계도 미흡한 실정이다.



[그림 18] 정재운 외(2007)에 의한 동적 시스템 설계의 예

이 같은 문제점을 해결하기 위해 정재운 외(2007)에서 인과지도의 표기법 개선에 관한 연구를 진행한 바 있다. [그림 18]은 정재운 외(2007)에서 기업의 활동을 동적 모형으로 설계하기 위해 인과지도의 새로운 작성 체계를 제시하고, 이를 활용하여 기업의 속도 개선에 관한 메커니즘을 인과모형으로 표현한 것이다. 해당 모형에서는 기존의 인과지도 작성 기호 외에 여러 기호들을 추가 사용함으로써 기존에는 표현하지 못했던 시스템 운영의 시작점(●)과 종료점(◆), 시스템의 논리적 상황(<, >, =), 문제해결을 위한 문제 개입 지점 및 적용 전략, 제약사항 등 다양한 개념들을 표기할 수 있다. 따라서 기존의 시스템 다이내믹스에서 활용한 인과지도보다 많은 정보를 시스템 분석 및 설계 모형에 담을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 다양한 작성체계를 활용하기 때문에 문제영역이 넓은 경우 해당 모형에 사용되는 기호들이 많아짐에 따라 모형의 복잡성이 증가하는 한계점이 있다. 따라서 기존 문헌에서 제시되는 새로운 작성 체계는 문제 영역이 넓은 시스템보다는 영역이 좁고 상세 설계가 필요한 시스템 모형을 정의할 때 유용하게 활용할 수 있다.

IV. 결론

시스템 다이내믹스는 사회영역에서 다루는 동적(인과적) 시스템을 분석하고 설계하기 위해 인과지도를 사용해왔다. 하지만 인과지도의 작성체계에 대한 한계로 인해 동적 모형에 타당성이 결여되는 사례가 발생한다. 다양한 동태적 시스템을 연구하기 위해서는 해당 시스템을 구성하고 있는 개별 변수와 이들 간의 인과관계에 대한 실증적 연구가 뒷받침되어야 한다. 연구 대상과 연구방법이 무엇이던지 간에 그 근거에는 사실적 분석과 논리적 타당성이 뒤따라야 한다. 하지만 복잡한 동적 시스템을 구성하는 모든 변수들에 대해 일일이 실증적 연구를 통해 변수 간의 인과관계를 도출하는 것은 연구의 효과성과 효율성 면에서 많은 애로사항을 야기한다. 따라서 시스템 다이내믹스에서는 연구 대상 시스템의 구성 변수 및 인과관계 도출시 연구자의 주관성 개입을 어느 정도 인정하고 있다. 이것이 오히려 연구모형의 실제와 논리적 타당성을 결여될 수 있는 계기를 마련함으로써 연구의 효과성과 효율성을 떨어뜨리는 요인(오류발생 요인)으로 작용될 수 있음을 본문을 통해 확인하였으며, 해당 모형들의 수정 및 개선 방안에 대해 살펴보았다.

한편 BSC의 동적 성과모형 등을 연구하기 위해서는 개념적 크기가 서로 다른 변수들을 체계적으로 분류함으로써 모형의 추상화 및 상세화, 계층별 연계 등이 용이하도록 모형을 설계하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 추가적으로 진행되어야 할 후속연구들이 많다. 따라서 본문에서는 이에 대한 문제제기와 대안의 적용 가능성에 대해 논의를 진행하였다.

마지막으로 기존의 인과지도가 다양한 동적 시스템을 표현하는 데 필요한 표현 방법이나 기호체계들을 충분히 갖추지 못함으로써 발생하는 한계를 살펴보고, 이를 해결할 수 있는 대안을 기존의 연구 사례를 통해 살펴보았다.

본 연구가 실험적 연구단계로 진행되지 못하고 이론적 수준에서 기존의 연구적 한계에 대해 문제를 제기하고 방안을 제시하였다는 점이 한계라고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 기존의 동태적 인과모형의 잘못된 작성사례를 도출하여 검증하는 방안을 제시하였고, 이를 통해 인과지도 작성체계의 개선에 대한 공론화의 계기를 마련하였다는 데 본 논문의 시사점이 있다. 향후 연구로는 본문에서 제시한 방안 중 가능성만을 제시한 모형의 계층분류 및 연계, 동적 BSC 모형 개발 등에 관한 연구를 진행함으로써 본 연구의 미흡한 부분들을 보완해 나갈 계획이다.

【참고문헌】

- 건강다이제스트(http://www.kunkang.co.kr/kk2007_05/menu5.htm).
- 김계수(2006). 인과분석 연구방법론: 청람.
- 김도훈, 문태훈, 김동환(1999). 시스템 다이내믹스 : 대영문화사.
- 김순기, 이창대, 신성호(2006). BSC 시스템의 구축(균형성과표의 도입, 개발, 그리고 성공요인), 한국경영학회, 제10권, 제1호: 65-80.
- 맨큐(Mankiw, N. Gregory)(2000). 경제학(Principles of economics), 김경환, 김종석 역 : 교보문고
- 삼성의료원(<http://www.smc.or.kr/health/29/h029-05.htm>).
- 윤영수, 채승병(2005). 복잡계 개론 : 삼성경제연구소.
- 이장희, 강수진(2006). 균형성과표 요소와 기업성과와의 관계에 관한 실증연구, 기업경영연구, 제13권, 제1호 : 253-270.
- 정재운, 김현수(2007). 인과지도의 타당성 확보와 정보 표현력 향상을 위한 연구, 한국시스템다이내믹스연구, 제8권, 제1호:97-115.
- 정재운, 김현수, 최형립(2007). 시스템 다이내믹스의 정책지렛대를 활용한 RTE 핵심성공요인 도출에 관한 연구, 정보시스템연구, 제16권, 제4호: 177-194.
- 조현웅, 연승준, 김상욱(2007). BSC의 한계 극복을 위한 시스템다이내믹스의 활용, 한국시스템다이내믹스연구, 제8권, 제1호: 211-227.
- 최남희, 김선경(2001). 도시교통과 환경간의 동태적 관계와 정책실험논리, 한국 시스템다이내믹스 연구, 제2권, 제2호: 97-118.
- 통계교육원(2008). SPSS를 이용한 통계분석 온라인 교육 자료(<http://elearn.nso.go.kr>).
- 통계청(<http://www.nso.go.kr/>).
- 함미옥, 홍영진(2005). 이산수학: 한빛미디어.
- 현대·기아자동차(2007). Automotive Market.
- 피터 린츠(Peter Linz)(2008). 형식언어와 오토마타, 장직현, 김응모, 엄영익, 한광록 역저 : 홍릉과학출판사.
- David Goldman(2007). Introduction to Simulation, Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference: 26-37.
- Hao-Chen Huang, Wenyi Chu, Mei-Chi Lai, Lee-Hsuan Lin(2008). Strategic linkage process and value-driven system: A dynamic analysis of high-tech firms in a newly-industrialized country, Expert Systems with Applications, available online 4 March 2008.

Jay W. Forrester(1961). *Industrial Dynamics* : Pegasus Communications.

(1969). *Urban Dynamics* : Pegasus Communications.

Paul R. Niven(2005). *Balanced Scorecard Diagnostics* : John Wiley & Sons

Richard Scheines(2004). *Causation*, in *New Dictionary of the History of Ideas* : Charles Scriber and Sons.

Richardson(1997). *Problems in causal loop diagrams revisited*, *System Dynamics Review*, Vol.13, No.3: 247-252

Sterman, J.D.(2000). *Business Dynamics _ Systems Thinking and a Complex World* : McGraw-Hill.

Wiener, Philip P.(1979). *Dictionary of the History of Ideas* : Charles Scribner's Sons.