

인과지도의 타당성 확보와 정보 표현력 향상을 위한 연구

A Study on Ensuring Validity and Increasing Power of Expression on Causal Maps

정재운* · 김현수**

Jung, Jae-Un* · Kim, Hyun-Soo**

Abstract

In System Dynamics, causal maps are used as a tool for analyzing dynamic problems and discussing the outcome of analyzed problems. However there are some limitations to use causal maps. In the drawing phase of causal maps, the high abstraction of variables that constitutes problems makes it difficult to find out correct information. And principles or rules to check errors on causal maps are not sufficient yet. Moreover, simulation modeling tasks are required to be concerned separately from drawing causal maps because causal maps cannot provide enough information to simulation modeling.

In order to overcome these limitations, this study shows ways that ensure validity, increase power of expression of causal maps and improve the connection between causal maps and simulation modeling.

Keywords: 인과지도, 타당성 확보, 오류검증, 정보 표현력 향상, 시스템 다이내믹스
(Causal Maps, Ensuring Validity, Checking Errors, Increasing
Power of Expression, System Dynamics)

* 동아대학교 경영정보학과 석사과정 (제1저자, forshare@naver.com)

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

I. 서론

시스템 다이내믹스(System Dynamics : SD)란 문제를 구성하는 구조(System)와 구조 속에 존재하는 변수들이 시간 변화에 따라 변하는 행태(Dynamics)를 시스템사고(system thinking)로 분석하여 보다 근원적인 차원에서 문제를 해결하고자 하는 연구방법론이다. 이는 1961년 Forrester의 산업동태론(Industrial Dynamics)에서 처음 제안된 이래, 복잡성 해결에 관한 이론적 발전과 IT의 발전으로 보다 많은 동적 문제들을 시뮬레이션 할 수 있게 되었다. 이로써 복잡성을 고려해야 하는 다양한 분야에서 시스템 다이내믹스를 유용한 연구방법론으로 활용하고 있다(윤영수, 최승병, 2005; 김도훈 외, 1999; 정석환, 주영중, 2005).

시스템 다이내믹스에서는 문제를 분석하는 과정에서 인과지도(Causal Map)라는 도구(tool)를 활용한다. 이는 시스템 사고를 통해 분석한 문제구성 변수들의 인과관계를 인과지도 상에 표현함으로써 연구자가 문제의 구조와 행태를 효율적으로 파악할 수 있기 때문이다. 하지만 이를 작성하고 활용함에 있어서 인과지도의 이론적 한계가 존재한다. 현재, 시스템 다이내믹스의 시뮬레이션 모델링에 관해서는 Sterman, J.D. (2000)에서처럼 타당성 검증을 위해 다양한 방법들이 제시되고 있지만, 인과지도의 타당성 확보를 위한 방법론의 제시는 미흡한 실정이다. 또한, 인과지도의 작성체계와 정보표현의 한계 때문에 제3자가 인과지도의 정보를 명확하게 인지하는 데 어려움이 있고, 시뮬레이션을 위한 모델링의 기초 자료로서의 기능을 제대로 하지 못하는 등 여러 문제점이 존재하고 있다. 이 때문에 일각에서는 시스템 다이내믹스의 문제 분석 도구인 인과지도에 의문을 제기하는 경우도 있다.

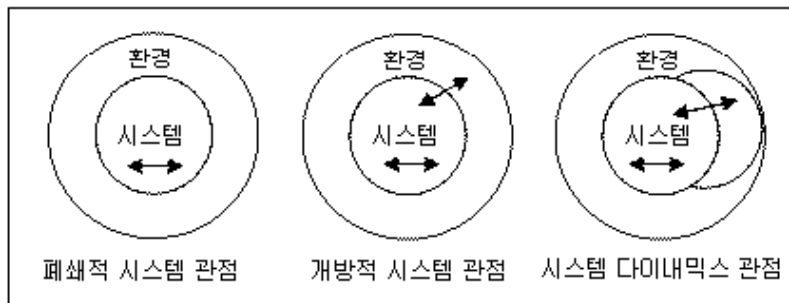
본 연구에서는 인과지도의 이론적 고찰을 통해서 기존의 한계를 극복할 수 있는 방안을 제시하였다. 이를 위해 인과지도에 관한 규칙성을 분석하고 분석된 규칙성을 인과지도의 오류검증을 위한 방법으로 제시하였으며, 기존의 인과지도가 가졌던 정보의 표현력 한계를 극복하기 위한 새로운 개념 및 기호체계를 제안하였다. 이러한 과정을 통해서 시뮬레이션 모델링과의 연계성을 향상시킬 수 있는 방안을 모색해보고자 한다.

II. 인과지도의 가치와 한계

1. 인과지도의 개념과 작성방식

시스템 다이내믹스에서 문제 해결을 위해 시뮬레이션 모델링을 진행하려면 문제의 구조와 행태를 분석하는 과정이 필요하다. 이 때, 시스템다이내믹스에서는 문제를 시스템 관점

에서 정의하고 분석하게 되는데, 시스템(문제) 영역의 정의에 있어서 다른 시스템과의 차별성이 존재한다. 환경과 상호작용하지 않는 폐쇄적 시스템으로 문제를 정의할 경우, 외부환경에 대한 고려 없이 문제를 간편하게 정의를 할 수 있다. 하지만 시스템 외부환경이 시스템 내부에 많은 영향을 미칠 경우, 문제의 정의는 현실과 괴리될 수밖에 없다. 반면, 완전히 개방된 시스템으로 문제를 정의할 경우, 문제의 복잡도가 불필요하게 높아지게 된다. 이러한 이유 때문에, 시스템 다이내믹스에서는 문제와의 연관성이 높은 외부환경을 시스템 내부영역으로 흡수(문제의 시스템을 외부환경으로 확대)하여 현실 상황을 왜곡하지 않고, 복잡한 문제를 충분히 설명할 수 있는 수준에서 시스템의 경계를 결정하고 문제를 정의하게 된다. 이는 복잡도가 충분한 폐쇄형 시스템을 문제영역으로 정의함으로써 현실 상황을 문제 해결과정에 충분히 반영함과 동시에 문제해결의 효율성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다(김도훈 외 2000; 운영수 외, 2005). [그림 1]은 위의 내용을 정리한 것이다.

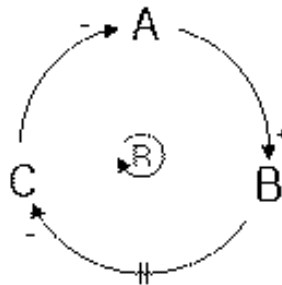


[그림 1] 시스템 다이내믹스 접근에서의 시스템과 환경(김도훈 외, 2000)

시스템 다이내믹스의 문제(시스템) 영역에 대한 정의가 이루어지면, 해당 문제의 분석을 통해서 문제를 구성하는 변수들의 정의와 변수들 간의 인과관계에 대한 방향성, 상관관계의 극성 등을 규명하는 과정을 거치게 한다. 연구자는 이 과정에서 분석된 내용을 다음과 같은 작성체계에 근거하여 인과지도를 작성하게 된다. 변수명은 변수의 속성을 잘 표현할 수 있는 명사형으로 정의하고 변수 간의 인과 방향성은 화살표(→)로, 변수 간의 상관관계는 +, - 기호로 표시한다. 또한, 두 변수 사이의 행태변화가 시간적 차이를 두고 발생할 경우, 화살표 방향과 수직으로 두 줄(|)을 겹쳐 표시하여 두 변수 사이에 지연이 존재함을 표현한다(Pack and Kim, 1992; Stecman, J.D., 2000).(이 외의 작성기호는 [표 2] 참고)

이러한 방식으로 인과지도를 작성하다보면, 2개 이상의 변수가 순환구조를 이루고 있는 형태를 발견할 수 있다. 이를 피드백 루프(feedback loop)라고 하며, 연구자는 이를 통해 문제의 행태에 대한 규칙성을 발견하고자 한다. 피드백 루프와 관련한 개념으로는 피드백의

극성에 따라서 양의 피드백(자기 강화 피드백, 일탈 강화적 피드백)과 음의 피드백(목표 지향형 피드백, 안정화 피드백, 자기억제 피드백)으로 분류된다(김도훈 외, 1999). 피드백의 극성은 피드백을 구성하는 변수들의 음의 인과관계 개수에 의해 결정된다. 음(-)의 인과관계가 홀수 개이면 음(-), 0개 또는 짝수 개이면 양(+),의 극성을 가진 피드백이라고 한다. [그림 2]는 인과지도 작성의 예이다.



[그림 2] 인과지도의 작성 예 양의 피드백 루프

[표 1] 인과지도의 기호체계

기호의 의미	기호	설명
인과관계의 방향성	→	변수 A가 변수 B에 영향을 미치는 관계이면, 화살표를 A에서 B 방향으로 A→B 와 같이 표시한다.
인과관계의 극성	+	변수 A, B에 대해서 $\Delta A \uparrow \rightarrow \Delta B \uparrow$ 이고 $\Delta A \downarrow \rightarrow \Delta B \downarrow$ 이면, A는 B 방향으로 양(+),의 상관관계를 가진다고 하며 $A \xrightarrow{+} B$ 와 같이 표시한다.
	-	변수 A, B에 대해서 $\Delta A \uparrow \rightarrow \Delta B \downarrow$ 이고 $\Delta A \downarrow \rightarrow \Delta B \uparrow$ 이면, A는 B 방향으로 음(-),의 상관관계를 가진다고 하며 $A \xrightarrow{-} B$ 와 같이 표시한다.
지연	$\parallel \begin{array}{ c } \hline \text{dela} \\ \hline y \end{array}$	변수 A의 변화에 따른 변수 B의 변화가 즉각적으로 발생하지 않고, 일정시간의 이후(지연)에 발생할 경우, $A \xrightarrow{+} B$ 와 같이 표시한다.
양의 피드백 루프		2개 이상의 변수가 반복 순환하는 구조(feedback loop)를 형성할 때, 피드백 루프의 극성이 양(+),이면 해당 피드백 중심부에 R 의 기호를 표시한다.
음의 피드백 루프		2개 이상의 변수가 반복 순환하는 구조(feedback loop)를 형성할 때, 피드백 루프의 극성이 음(-),이면 해당 피드백 중심부에 S 의 기호를 표시한다.

2. 인과지도의 가치

1) 문제의 시각화

시스템 다이내믹스에서 해결하고자 하는 문제는 동적 환경의 복잡도가 높은 문제들이기 때문에 문제에 대한 분석정보를 글(text)만으로 서술하기에는 어려움이 있다. 하지만, 인과지도는 화살표(→)와 +, - 등의 기호체계를 사용함으로써 변수들 간의 복잡한 인과관계를 시각적으로 표현하는 것이 가능하다. 이로써 연구자와 의사결정자들이 인과지도가 담고 있는 문제에 대해서 직관적인 인식이 가능하다.

2) 의사소통의 도구

어려움에 처한 현실 문제를 제대로 해결하기 위해서는 연구자와 실무자 및 의사결정자 간의 원활한 의사교환으로 현황분석과 문제해결 과정에 대해서 지속적으로 논의할 수 있어야 한다. 그러나 복잡성이 높은 문제의 경우, 연구자는 문제분석 내용을 실무자나 의사결정자에게 이해시키기 어려울 뿐만 아니라 실무자나 의사결정자 역시 연구자가 문제해결 과정에서 현실 문제를 제대로 반영하고 있는지 검증하기도 곤란하다는 문제점이 존재한다. 하지만, 시스템 다이내믹스에서는 인과지도를 통해 문제분석 내용을 이미지로 집약하여 표현함으로써 연구자는 의사결정자에게 문제분석 내용을 효과적으로 이해시키고, 실무자 및 의사결정자는 연구자의 분석내용의 적절성에 대해서 논의하는 것이 수월해짐으로써 문제 해결의 질적 향상을 기대할 수 있다.

3) 시뮬레이션 모델링의 기초자료

시스템 다이내믹스 모델링에는 전체우선 모델링과 개체우선 모델링이라는 2가지 방식의 모델링이 있다. 전체우선 모델링은 문제의 전체적인 관점에서 세부적 관점으로 문제분석을 전개해나가는 방식으로, 인과지도를 먼저 작성하고 시뮬레이션 모델링을 위해 세부 개체 모델링(시뮬레이션 모델링)을 진행한다. 후자의 경우에는 이와 반대의 방식으로 모델링을 전개해나간다. 전체우선 모델링의 경우에 인과지도의 작성은 세부적인 시뮬레이션 모델링 이전 단계에서 진행되기 때문에 시뮬레이션 모델링의 기초 자료로 활용할 수 있다(김도훈 외, 1999; 김동환, 2000).

3. 인과지도의 이론적 한계

1) 타당성 검증 체계 미흡

인과지도는 분명, 시스템 다이내믹스에서 문제분석 도구로써 핵심적인 역할을 담당하고 있지만, 인과지도의 타당성 검증에 관한 기준이나 방법론에 관한 연구가 미흡한 상황이다. 타당성이 결여된 인과지도가 작성되었을 경우, 분석과정 이후의 연구에 있어서도 부정적인 영향을 미치게 된다. 하지만 모순되게도, 시뮬레이션 모델링에 관해서는 타당성을 검증하기 위한 다양한 방법론이 존재하고 있지만, 인과지도의 타당성을 검증하기 위한 방법은 찾아보기 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 인과지도 작성단계에서부터 연구자의 주관적 개입을 사전에 차단하거나, 차후 검증을 통해 오류를 검증할 수 있는 타당성 확보에 관한 연구가 필요하다.

2) 추상적인 의미 표현

기존에 작성된 인과지도를 살펴보면, 정보 표현방식이 추상적이고 의미가 모호한 경우가 많다. 이러한 문제는 복잡도가 높은 문제일수록 더욱 빈번하게 나타난다. 이는 연구자가 복잡한 문제를 실무자나 의사결정자에게 효과적으로 이해시키기 위해 복잡다양한 문제의 구조와 행태들을 몇 개의 피드백 중심으로 요약하는 경우에, 추상도가 높은 개념을 사용하여 인과지도를 작성하게 되므로 해당 문제에 익숙하지 않은 제3자는 인과지도에 대한 정보를 명확하게 이해하지 못하는 문제를 야기하게 된다. 또한, 연구자의 주관에 의해 모호한 개념을 사용함으로써 이와 유사한 문제들이 발생하기도 한다. 이를 해결하기 위해 현실에서는 인과지도 외의 부연설명을 첨부하여 정보의 이해를 돕고 있다. 하지만, 인과지도가 시스템 다이내믹스에서 문제 분석서의 기능을 한다면, 인과지도만으로도 문제에 대해 충분히 이해할 수 있도록 명확한 개념으로 인과지도가 작성되어야 한다. 그러므로 정보를 보다 명확하게 표현할 수 있는 작성체계 개선에 관한 연구가 필요하다.

3) 정보 표현력의 부족

기존의 인과지도는 변수명과 화살표, +/- 부호, 지연(|) 부호 등을 활용하여 변수 간의 인과관계 방향성, 상관관계, 여러 인과관계 속에서 나타나는 피드백의 극성과 행태에 관한 정보 등을 표현한다. 하지만, 시스템 다이내믹스에서 사용되는 개념들을 인과지도에서 충분히 표현할 수 없는 한계가 있다. 예를 들어, 임계치가 존재하는 변수들의 행태를 인과지도로 작성할 경우, 현재로서는 임계치에 관한 정보를 표현할 수 있는 방법이 없다. 또한,

동적 환경의 문제에서는 문제가 전개되는 특정한 상황(조건, condition)에 따라 행태의 양상이 달라진다. 이러한 논리적 표현을 하기 위해서는 비교논리 연산자(<, >, = 등)를 인과지도 상에서도 활용할 수 있어야 하지만, 이 역시 표현할 수 있는 이론적 근거가 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 시스템 다이내믹스에서 사용되는 개념들이지만, 인과지도에서는 표현할 수 있는 없는 것들을 찾아내어 표기할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

4) 모델링의 연계 및 통합성 부족

시스템 다이내믹스에서 시뮬레이션 모델링을 위해서는 정확한 문제 정의와 분석이 선행되어야 한다. 이러한 선행 과정은 인과지도의 작성을 통해서 달성되고 있다. 그러므로 인과지도는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 보조 자료로 활용될 수 있다. 이론적으로는 이처럼, 인과지도가 시뮬레이션 모델링을 위한 보조 자료로 활용되어야 함에도 불구하고, 실질적으로는 시뮬레이션 모델링이 인과지도의 작성 내용과 별도로 진행되는 경우가 많다. 이러한 이유를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 인과지도에 작성되어 있는 대부분의 변수가 시뮬레이션 모델링에서 사용되기 부적합한, 추상도가 높은 개념으로 정의되어 있다. 둘째, 시뮬레이션 모델링에서 사용하는 수식 및 논리적 정보를 인과지도에서는 제공하지 못한다. 셋째, 변수의 개념적 정의에 있어서 유량변수와 저장변수 등에 관한 구분이 없기 때문에 인과지도의 내용을 시뮬레이션 모델링에 바로 적용하기 어렵다. 이 같은 문제를 해결하기 위해 김동환(2000)은 시뮬레이션 모델링에 필요한 정보를 인과지도에 담을 수 있도록 NUMBER라는 시뮬레이션 모델링 방법론을 연구한 바 있다. 하지만, 이는 시뮬레이션 모델링 툴(tool)을 이용하여 인과지도를 작성하였기 때문에 기존의 인과지도와는 달리, 손으로 쉽게 작성할 수 없다는 한계가 있다. 그러므로 인과지도의 정보표현에 대한 편의성을 보장하면서도 시뮬레이션 모델링과의 연계, 통합 수준을 높일 수 있는 방법론에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

Ⅲ. 인과지도의 가치향상을 위한 연구

1. 인과지도의 특성

1) 상관관계의 특성

변수 A, B, C, D 에 대해서 $A \xrightarrow{+} B \xrightarrow{-} C \xrightarrow{-} D$ 의 관계가 성립하는 인과지도가 있다고 가정한다. 그리고 인과지도에서 표현되는 변수와 변수들 간에 존재하는 관계 외에는 존재하는 것이 없다고 가정할 때, 변수 A와 C, A와 D 간의 인과관계를 살펴보자.

변수 A와 C, A와 D의 인과 방향은 $A \rightarrow C$, $A \rightarrow D$ 이다. 그리고 이들의 상관관계에 대한 극성(+/-)은 $(-)*(-)=(+)$ 라는 일반 수학적논리를 근거로 계산할 수 있다. 이 논리를 활용하여 변수들 간의 상관관계를 계산해보면, $A \rightarrow C$ 의 관계는 음(-), $A \rightarrow D$ 의 관계는 양(+임을 알 수 있다. 그러므로 변수 A와 C, A와 D를 인과지도의 기호체계로 표현해보면, $A \xrightarrow{-} C$, $A \xrightarrow{-} D$ 와 같이 표현할 수 있다. 이처럼, 인접하지 않은 두 변수의 인과관계는 인접하지 않은 두 변수 사이에 존재하는 인과방향성과 상관관계에 대한 극성(+/-), 그리고 상관관계의 극성에 대한 수(number)라는 3가지 요소에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이를 수식으로 정리한 것이 수식(1)이다.

$$\bar{R} = (R^+)^j (R^-)^k \quad (1)$$

- \bar{R} : 인과지도 상에 최초의 변수와 최종의 변수 사이에서 궁극적으로 표현되어지는 상관관계의 극성(양(+) 또는 음(-)을 값으로 가짐)
- R^+ : 인접한 두 변수 사이에 존재하는 양(+)의 상관관계(양(+))을 값으로 가짐)
- R^- : 인접한 두 변수 사이에 존재하는 음(-)의 상관관계(음(-))을 값으로 가짐)
- j : R^+ 의 개수
- k : R^- 의 개수

2) 피드백의 역인과관계

인과지도에는 2개 이상의 변수가 순환구조(피드백)를 이루는 인과관계가 존재한다. 이 때, 피드백의 극성이 음(-)일 경우, 정리1)의 논리가 성립한다.

정리1) $A \xrightarrow{+} B$ 이면, $B \xrightarrow{-} A$ 이고

$A \xrightarrow{-} B$ 이면, $B \xrightarrow{+} A$ 이다. (단, $F < 0(-)$, $F =$ 피드백의 극성(+ 또는 - 을 값으로 가짐))

증명1) $A \xrightarrow{+} B \xrightarrow{-} C \xrightarrow{-} D \xrightarrow{-} A'$ (단, $A=A'$)의 관계가 성립하는 피드백 루프가 있다고 할 때, $A \xrightarrow{+} B$ 의 역인과관계를 구해보자. 우선, 위의 가정에서 $A=A'$ 라고 하였으므로 $B \rightarrow A = B \rightarrow A'$ 가 성립한다. 그리고 $B \rightarrow A'$ 의 상관관계를 수식(1)을 이용하여 계산해보면, $(+)0*(-)3 = (-)$ 이다. 그러므로 $B \rightarrow A'$ 의 인과관계는 $B \xrightarrow{-} A'$ 이다. 위의 가정에서 $A=A'$ 라고 하였으므로 $B \xrightarrow{-} A' = B \xrightarrow{-} A$ 가 성립한다. 마찬가지로, $F < 0(-)$ 인 임의의 피드백 내에 존재하는 임의의 변수 A, B의 인과관계가 $A \xrightarrow{+} B$ 가 성립할 때, 이들의 역인과관계 역시 $B \xrightarrow{-} A$ 가 성립한다.

증명2) $A \xrightarrow{-} B \xrightarrow{-} C \xrightarrow{+} D \xrightarrow{-} A'$ (단, $A=A'$)의 관계가 성립하는 피드백 루프가 있다고 할 때, $A \xrightarrow{-} B$ 의 역인과관계를 구해보자. 우선, 위의 가정에서 $A=A'$ 라고 하였으므로 $B \rightarrow A = B \rightarrow A'$ 가 성립한다. 그리고 $B \rightarrow A'$ 의 상관관계를 수식(1)을 이용하여 계산해보면, $(+)1*(-)2 = (+)$ 이다. 그러므로 $B \rightarrow A'$ 의 인과관계는 $B \xrightarrow{+} A'$ 이다. 위의 가정에서 $A=A'$ 라고 하였으므로 $B \xrightarrow{+} A' = B \xrightarrow{+} A$ 가 성립한다. 마찬가지로, $F < 0(-)$ 인 임의의 피드백 내에 존재하는 임의의 변수 A, B의 인과관계가 $A \xrightarrow{-} B$ 가 성립할 때, 이들의 역인과관계 역시 $B \xrightarrow{+} A$ 가 성립한다.

반면, 인과지도에서 피드백의 극성이 양(+)일 경우, 정리2)의 논리가 성립한다.

정리2) $A \xrightarrow{+} B$ 이면, $B \xrightarrow{+} A$ 이고

$A \xrightarrow{-} B$ 이면, $B \xrightarrow{-} A$ 이다.(단, $F > 0(+)$)

증명3) $A \xrightarrow{+} B \xrightarrow{-} C \xrightarrow{+} D \xrightarrow{-} A'$ (단, $A=A'$)의 관계가 성립하는 피드백 루프가 있다고 할 때, $A \xrightarrow{+} B$ 의 역인과관계를 앞의 정리1)과 같은 방식으로 계산해보면, $A \xrightarrow{+} B$ 의 역인과관계가 $B \xrightarrow{+} A$ 임을 확인할 수 있다. 마찬가지로, $F > 0(+)$ 인 임의의 피드백 내에 존재하는 임의의 변수 A, B의 인과관계가 $A \xrightarrow{+} B$ 가 성립할 때, 이들의 역인과관계 역시 $B \xrightarrow{+} A$ 가 성립한다.

증명4) $A \xrightarrow{-} B \xrightarrow{+} C \xrightarrow{+} D \xrightarrow{-} A$ (단, $A=A$)의 관계가 성립하는 피드백 루프가 있다고 할 때, $A \xrightarrow{+} B$ 의 역인과관계를 앞의 정리1)과 같은 방식으로 계산해보면, $A \xrightarrow{-} B$ 의 역인과관계가 $B \xrightarrow{-} A$ 임을 확인할 수 있다. 마찬가지로, $F>0(+)$ 인 임의의 피드백 내에 존재하는 임의의 변수 A, B의 인과관계가 $A \xrightarrow{-} B$ 가 성립할 때, 이들의 역인과관계 역시 $B \xrightarrow{-} A$ 가 성립한다.

또한, 수식(1)과 정리1), 2)를 통해 인과지도 상에 존재하는 피드백의 역인과관계에 대한 특성을 살펴보면, 정리3)과 같은 규칙성이 발견된다.

정리3) $F<0(-)$ 인 경우, 피드백 내에 존재하는 임의의 두 변수 간의 역인과관계는 인과 방향성과 상관관계의 극성이 정방향의 것과 반대이다.
 $F>0(+)$ 인 경우, 피드백 내에 존재하는 임의의 두 변수 간의 역인과관계는 인과 방향성만 정방향의 것과 반대로 바뀌고 상관관계의 극성은 변하지 않는다.

증명5) $A \xrightarrow{+} B \xrightarrow{-} C \xrightarrow{-} D \xrightarrow{-} A$ 인 인과지도가 있다고 할 때, 정리1)을 근거로 역인과관계를 살펴보면, $A \xleftarrow{-} B \xleftarrow{+} C \xleftarrow{+} D \xleftarrow{+} A$ 의 관계가 성립하는 피드백을 생성할 수 있다. 반면, $A \xrightarrow{+} B \xrightarrow{-} C \xrightarrow{+} D \xrightarrow{-} A$ 의 인과지도를 정리2)를 근거로 역인과관계를 살펴보면, $A \xleftarrow{+} B \xleftarrow{-} C \xleftarrow{+} D \xleftarrow{-} A$ 의 관계가 성립하는 피드백을 생성할 수 있다. 마찬가지로, 임의의 피드백의 인과관계를 역방향으로 살펴보면, 정리3)이 성립함을 확인할 수 있다.

정리1), 2), 3)의 규칙성을 수리적으로 표현하면 수식(2)와 같다.

$$\bar{C} = C \times F \quad (2)$$

- \bar{C} : C의 역인과관계(양(+)) 또는 음(-)을 값으로 가짐
- C : 동일한 피드백 내에 존재하는 임의의 변수 A, B 사이에 존재하는 인과관계 (양(+)) 또는 음(-)을 값으로 가짐
- F : 피드백의 극성(양(+)) 또는 음(-)을 값으로 가짐

수식(2)를 활용하면, 피드백의 구성이 F 인 임의의 피드백이 존재하며, 해당 피드백 내에 존재하는 임의의 두 변수의 인과관계가 C 인 경우에 이들의 역인과관계(\bar{C})를 $C \times F$ 라는 계산과정을 통해서 구해낼 수 있다.

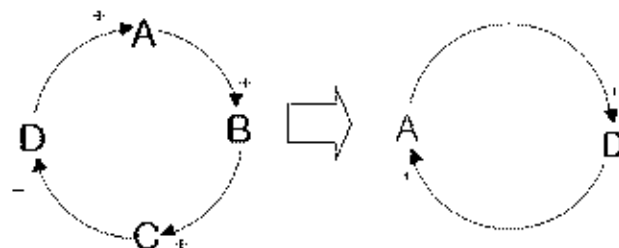
정리4) 역인과관계의 피드백 상에서도 수식(1)의 원리를 활용할 수 있다.

증명6) $A \xrightarrow{-} B \xrightarrow{+} C \xrightarrow{+} D \xrightarrow{+} A'(A-A)$ 인 역인과관계의 피드백이 있다고 가정할 때, 식(1)을 이용하여 인접하지 않은 변수들 간의 인과관계를 추론할 수 있다.

2. 인과지도 특성의 활용

1) 인과지도의 요약과 직관적 판단

변수 A, B, C, D가 [그림 3]의 왼쪽 부분의 피드백 형태와 같은 인과지도가 있다. 그리고 인과지도 상에 표현되고 있는 변수와 변수들 간에 존재하는 관계 외에는 존재하는 것이 없다고 가정할 때, 연구자는 주요 특정 변수들을 중심으로 인과지도를 요약할 수 있다. 예를 들어, 연구자가 변수 A와 D의 인과관계에 대한 정보만 필요할 경우(혹은 변수 C, D에 관한 정보가 없어도 A, D 간의 관계를 충분히 이해할 수 있을 경우 등), 수식(1)을 근거로 해당 인과지도 [그림 2]를 $A \xrightarrow{-} D \xrightarrow{+} A$ 형태로 요약할 수 있다. 그리고 굳이 [그림 3]처럼 요약을 하지 않더라도, 수식(1)을 근거로 변수 A와 D의 관계가 $A \xrightarrow{-} D \xrightarrow{+} A$ 임을 직관적으로 판단할 수 있다. 이 외에도 3장 1절의 다른 규칙성들을 활용한다면, 인과지도의 직관적인 분석에 도움이 될 것이다.



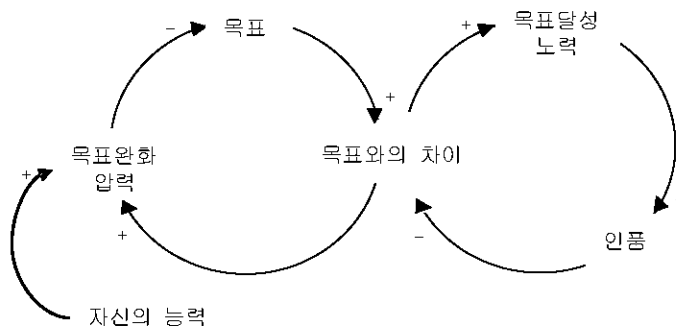
[그림 3] 인과지도 요약의 예

2) 다양한 관점에서의 분석

시스템 다이내믹스에서는 피드백 내에 존재하는 변수들의 동태를 분석함으로써 문제 해결방안을 모색하기 때문에 인과지도 상에 존재하는 피드백을 중요하게 여긴다. 그리고 피드백을 통해 문제의 해결방안을 발견하기 위해서는 피드백을 구성하는 변수들의 행태들에 대해 다양한 분석이 이루어질 필요가 있다. 이 때, 3장 1절의 인과지도 특성에 관한 규칙성들을 활용하여 피드백의 역인과관계를 살펴본다면, 보다 다양한 변수들의 행태를 분석할 수 있는 기회를 얻을 수 있다.

3) 오류검증

인과지도상에서 정의하고자 하는 문제가 복잡할수록 인과지도 작성 과정에서 오류를 범하기 쉽다. 그리고 복잡한 문제가 아니더라도, 인과지도가 작성된 이후에는 타당성 확보를 위한 오류검증을 거쳐야 한다. 하지만, 시스템 다이내믹스에서 인과지도의 타당성을 분석하기 위해 제시된 특별한 기준이나 방법론이 없다. 이에 3장 1절의 수식(1)을 타당성 검증의 기준으로 활용하고자 한다. 인접변수 간의 인과관계, 인접변수 이외 변수들 간의 인과관계 등이 일관되게 타당성을 유지하고 있는지를 살펴봄으로써 인과지도에서 범하고 있는 오류들을 검출할 수 있다. 하지만, 수식(1)은 [그림 3]처럼 피드백만 존재하는 인과지도 상에서는 오류를 검증할 수 없다는 단점이 있다.



[그림 4] 인과지도 오류 검증 예

[그림 4]는 인간이 목표를 달성하기 위해 자신의 능력과 노력에 대해서 어떤 행태론을 보이는가를 설명하는 인과지도이다.(KSDS(2007)에서 해당 그림을 발췌하면서 일부 변수 명을 요약하였음) [그림 4]가 표현하고 있는 내용은 다음과 같다. 개인이 달성하고자 하는 인

품(목표)이 현재 자신의 인품수준보다 높을 경우, 목표와의 차이를 감소시키려는 노력을 전개한다. 이 때, 현재 능력과 목표의 수준을 일치시키기 위해 전개하는 개인이 할 수 있는 노력은 2가지로 구분된다. 하나는 열심히 노력하여 자신의 수준을 목표수준으로 향상시키는 것이고, 다른 하나는 목표를 하향 조정하는 것이다. 이러한 행태론을 표현하고 있는 인과지도(그림 4)가 타당성을 확보하고 있는지 수식(1)을 활용하여 검증해보고자 한다. 참고로 수식(1)은 인접하지 않은 변수들 간의 인과관계를 파악할 수 있는 규칙으로써 이를 활용하여 변수들 간의 인과관계가 일관되게 성립하는지를 검증하는 데 활용할 수 있다.

우선, 피드백 외부에 유일하게 존재하는(그림의 좌측 부분) <자신의 능력>이라는 변수부터 확인을 해보겠다. 이 변수는 <목표완화압력>이라는 인접변수에 양의 상관관계를 미치고 있다. 이는 <자신의 능력>이 증가할수록 <목표완화압력>이 높아짐을 의미한다. 하지만 이는 <자신의 능력>이 향상되면 목표와의 괴리도가 낮아져 <목표완화압력>이 낮아진다고 하는 왼쪽 인과루프의 논리와 상충되고 있다. 그리고 식(1)을 근거로 <자신의 능력>과 <목표> 간의 관계를 살펴보면, 해당 인과지도는 <자신의 능력>이 향상될수록 <목표>가 낮아지는 인과관계를 형성하고 있다. 그러나 <자신의 능력>이 향상된다고 해서 <목표>가 감소하는 것은 아니다. 다만, <목표와의 차이>가 줄어들 수 있을 뿐이다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 <자신의 능력>이라는 변수의 정의가 잘못되었다는 결론을 내릴 수 있다. 이와 같이, 수식(1)을 활용하여 인접한 변수와 인접하지 않은 변수들 간의 인과관계가 일관되게 성립하는지를 검토함으로써 인과지도에 내재되어 있는 오류들을 검출할 수 있다.

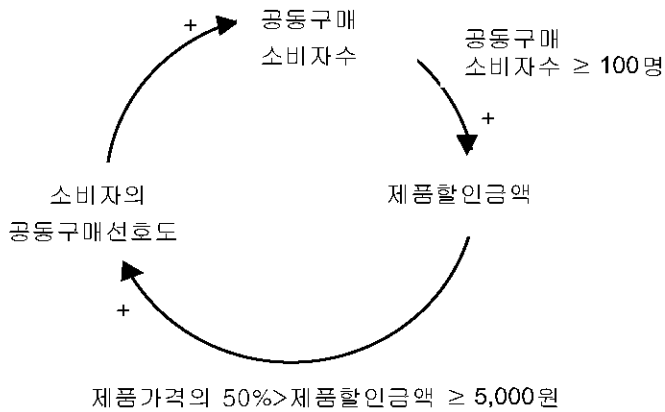
3. 인과지도의 개념 및 기능의 추가

1) 비교논리

다양한 문제를 분석하다 보면, 변수들 간의 규합상태(조건)나 임계치의 수준에 따라서 문제의 전개 양상이 달라지는 경우를 발견할 수 있다. 이러한 문제 행태를 인과지도상에서 표현하려면 비교논리(조건판단) 및 수리적 표현 등이 가능해야 하지만, 기존의 인과지도에서는 이러한 개념을 표현할 수 있는 방법이 없다. 이에 본 연구에서 비교논리 연산자(>, =, <)를 인과지도의 기호체계에 추가하고, 임계치 및 제약이 존재하는 상황 등을 표현할 수 있는 논리적, 수리적 표현들을 인과지도 상에서 표현하는 것이 가능하도록 새로운 방안을 제시하고자 한다.

[그림 5]는 공동구매에 관한 제품할인과 소비자의 참여도에 관한 행태론을 변수 {공동구매 소비자수, 소비자의공동구매선택도, 제품할인금액}으로 설명하고 있는 인과지도이다. 여

기에는 <공동구매소비자수>가 100명 이상인 시점부터 제품가격이 할인된다는 제약(임계치)과, <제품할인금액>이 제품 판매자 자신의 손익과 관련하여 제품가격 할인정책을 5000원부터 제품가격의 50%미만의 구간으로 설정함으로써 가격변동이 해당 구간에서만 이루어진다는 제약조건이 존재한다. 이들을 [그림 5]에서와 같이, 제약사항이 적용되는 인과관계(화살표) 위에 논리 연산자를 사용하여 표시함으로써 기존에는 표현할 수 없었던 정보들을 인과지도를 통해 작성할 수 있게 되었다. 그리고 수리적 표현이 필요할 경우에는, 마찬가지로 해당 인과관계(화살표) 위에 수리적 표현을 기술하면 된다.




[그림 5] 임계치 및 제약논리를 적용한 인과지도

2) 문제의 시작점

시스템 다이내믹스를 활용하는 연구자는 인과지도에서 순환하는 인과관계(피드백)를 발견하고, 발견된 피드백 속에서 문제해결을 위한 실마리를 찾고자 한다. 연구자들은 이러한 관점을 중요시 여기기 때문에 문제의 시작점에 대한 필요성을 못 느끼고 있는 것 같다. 하지만, 문제의 상황에 따라서 문제의 시작점이 존재하고, 이를 명시할 필요가 있는 경우에는 이를 표기할 수 있어야 한다. 이는 시뮬레이션 모델링에 있어서 모델링의 시작점을 발견하기 위한 시간을 단축시켜줄 뿐 아니라, 인과지도를 통해 정보를 파악하는 이(인과지도 작성자 이외의 자)들에게도 문제 발단의 기점을 명시해 줌으로써 인과지도의 정보해독에 관한 편의성을 제공할 수 있다. 하지만 기존의 인과지도는 피드백 루프를 통한 순환적 정보 표현만을 제시할 뿐, 행태의 시작점을 표시할 수 있는 개념이나 기호체계가 없기 때문에 본 연구에서는 굵은 점(●)이 달린 화살표를 사용하여 문제의 시작점을 표현하고자 한다. 한편, 시작점의 개념적 정의와 관련하여, 시작점(변수)이 비교논리를 연산하는 변수의 기준이

될 때는 상관관계의 극성을 고려하지 않고 방향성만 고려한다.

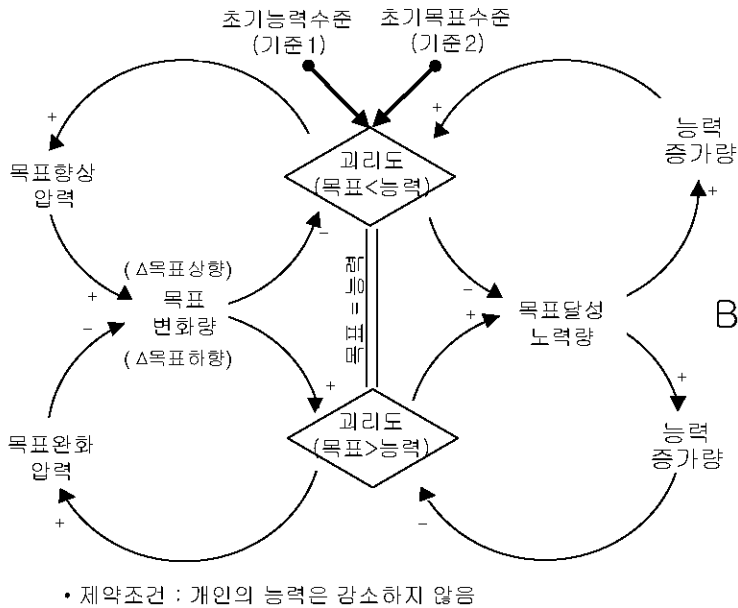
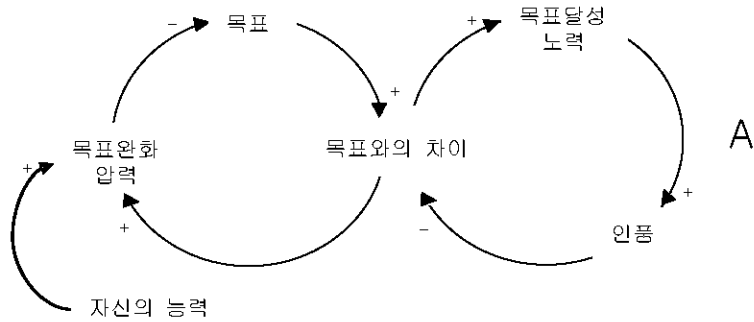
[표 2] 인과지도의 표현력 향상을 위해 도입한 개념 및 기호체계

개념		표현기호	표현 예
비교논리	임계치	>, <, - 등의 비교논리 연산자	A > B
	조건비교판단		
	조건판단변수	◇	
시작점		•	A → B
논리의 전환경로(균형점)		밑줄 2줄(-), 비교논리 연산자	<u><u>목표=능력</u></u>

이 외에도 인과지도의 정보표현력을 추가, 보완하기 위해 몇 가지 개념들을 [표 2]를 통해 정의하였다. 이는 뒤에 나오는 [그림 6]에서 설명된다. 기존 인과지도의 작성기호체계 [표 2]의 기호체계를 추가함으로써 앞으로 인과지도가 보다 다양한 정보 표현이 가능할 것으로 판단된다. 아울러 시뮬레이션 모델링에 필요한 논리적 개념들이 인과지도 상에서도 표현되어져 인과지도의 정보 표현력 향상은 물론이고 시뮬레이션 모델링과의 연계성도 향상될 것으로 기대된다.

4. 정보표현력이 향상된 인과지도

[그림 6]은 앞의 3장 2절에서 언급한 [그림 4]([그림 6]의 A)에 본 연구에서 새롭게 추가한 개념 및 기호체계를 적용하여 작성하였다. 이는 기존 작성기호체계로 작성한 인과지도와 기존 기호 체계에 [표 2]의 기호 체계를 추가하여 작성한 인과지도의 정보표현력을 비교하기 위함이다.



[그림 6] 정보표현력이 향상된 인과지도

[그림 6]의 A, B를 살펴보면, 외형적으로 피드백이 2개에서 4개로 증가되었으며 변수들의 개념이 보다 세분화되었음을 알 수 있다. 이는 그림 A에 존재하는 <목표와 능력의 차이>라는 변수를 3가지 비교논리(조건)로 세분화하였기 때문이다. 이렇게 세분화된 변수의 정의로 인하여 보다 구체적이고 다양한 행태를 묘사할 수 있게 되었다. 사실, 인과지도만 봐서는 그림 A의 <목표와의 차이>(그림 B에서는 <과리도>)가 '목표>인품'인 상황과 '목표<인품'인 상황을 모두 포함하여 설명하고 있는 것처럼 보이지만, [표 2]의 기호체계를 적용하여 개념의 추상도를 그림 B의 수준으로 낮춤으로써 행태 전개 상황을 세부적으로

구분(의미의 모호성 해소)할 수게 되었다. 그리고 만약, 비교조건에 관한 모든 상황이 인과지도에 표시되어 있지 않더라도, 특정 상황을 비교판단 하는 변수를 마름모 사각형(◇)안에 논리 연산자(<, >, =)와 함께 정의함으로써 마름모 사각형(◇)안에 정의된 조건만이 해당 인과지도에서 전개되는 행태의 환경임을 명확히 표현할 수 있다. 때문에 제 3자가 조건 판단에 대한 모호한 판단을 내리는 오류를 최소화할 수 있도록 기호체계를 보완하였다.

한편, 그림 B의 인과지도에서 설명되어지는 행태론은 <능력>과 <목표>라는 변수 값의 비교, 분석을 위해 두 변수 값을 입력하는 활동이 시발점이므로 두 변수의 초기 값을 <초기능력수준(기준1)>과 <초기목표수준(기준2)>로 정의하고, 정의된 변수에 시작점(↔) 기호를 사용하여 문제의 시작점을 표시하였다. 이로써 누가 보더라도 문제의 발단 지점을 알 수 있게 하였다.

그리고 각 변수의 활동이 '목표=능력'이라는 균형점을 향해 수렴하는 행태를 보이다가 균형점에서 상대 영역으로 이탈하는 행위가 전개되면, 예를 들어 '목표>능력'인 상황에서 '목표=능력'이라는 지점으로 수렴하는 행태를 보이다가 '목표<능력'이라는 영역으로 이탈하는 현상이 발생하게 되면 '목표>능력'에서 '목표<능력'으로의 논리적인 전환이 이루어지게 된다. 이러한 논리적 전환에 관한 개념을 인과지도 상에 표현하기 위해 '논리의 전환경로(균형점)'를 '목표>능력'과 '목표<능력' 사이에 목표=능력 와 같이 표시하였다. 그리고 문제에 관한 기본적인 제약사항이나 부연설명은 인과지도의 하단부에 그림 B와 같이 문자(text)로 표시함으로써 제3자가 인과지도만으로도 문제를 충분히 이해할 수 있도록 하였다. 하지만, 본 연구에서 제시된 인과지도의 기호체계가 실질적인 가치를 부여받기 위해서는 학문적으로 공론화되어 본 연구에서 제안된 기호체계들이 평가와 검증을 받아야 하는 과제가 남아 있다. [표 3]은 [그림 6]의 작성과정을 정리한 것이다.

[표 3] [그림 6]의 작성 절차

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> ① 그림 A의 오류검증을 통한 타당성 분석, 변수 재정의 ② 그림 A의 '목표와의 차이'라는 변수에 '목표', '인품' 두 변수 값을 비교하는 논리개념을 적용하여 '목표>인품, 목표<인품, 목표=인품'이라는 3가지의 논리로 개념을 세분화하여 변수 재정의 ③ 세분화된 행태논리'목표>인품', '목표<인품'에 맞도록 다른 변수들을 재배치. 이때 부터 피드백이 2개에서 4개로 증가, 그림 B의 형태를 갖추기 시작함 ④ 그림 B에서 2개로 나누어진 '목표와의 차이'의 사이에 '목표=인품'조건과 함께 [표 2]의 '논리의 전환경로(균형점)'개념을 인과지도에 적용하여 표현함 |
|--|

- ⑤ 인과지도의 규칙성 검사를 통한 오류검증 진행
- ⑥ 문제의 본질을 훼손하지 않는 범위 내에서 변수명의 재정의 및 제약설정을 통해 정보를 명확성을 향상시킴
- ⑦ 오류 검증 및 수정
- ⑨ [그림4]작성 완료

IV. 결론

본문을 통해서 인과지도의 규칙성을 살펴보고, 규칙성의 활용가능 방안에 대해 살펴보았다. 특히, 인과지도의 일관성에 대한 타당성 확보를 위한 방안에 대해서 살펴보았다. 그리고 기존의 인과지도에서는 표현할 수 없었던 개념과 정보를 표현하고자 새로운 개념 및 기호체계를 제시하였다. 이로써 인과지도의 표현력 향상과 함께, 시뮬레이션 모델링과의 연계성을 개선시킬 수 있는 방안에 대해서도 살펴보았다. 하지만, 본 연구에서 제시한 방안들이 현실적으로 어떠한 가치와 한계를 가지는지 검증하고 평가하기 위해서는 다른 연구자들로부터의 평가와 검증을 받을 필요가 있다. 또한, 시스템 다이내믹스와 인과지도에 관한 이론적 한계를 극복하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

[참고문헌]

- 김도훈, 문태훈, 김동환(1999). 시스템 다이내믹스 : 대영문화사
- 김동환(2000). "인과지도의 시뮬레이션 방법론 _ NUMBER," 한국시스템다이내믹스 연구, Vol.1, No.2, pp.91-111. 한국행정학회. 한국행정학보 제39권 제1호: 219-236.
- 윤영수, 채승병(2005). 복잡계 개론 : 삼성경제연구소
- 정석환, 주영종(2005). 시스템 다이내믹스 방법론을 이용한 정책과급효과분석_성매매특별법을 중심으로: 219-236.
- KSDS(2007). newsletter, No.1.
- Park, K.S., and Kim, S.H.(1992). "Cognitive Mapping with Multiple Participants," 한국경영과학회 학술대회논문집, 제1권, pp.283-290.
- Sterman, J.D.(2000). Business Dynamics _ Systems Thinking and a Complex World : McGraw-Hill