복잡계 방법론: 시스템 다이내믹스

한국 시스템 다이내믹스 학회

사회과학자료원

2011년 2월 7일 – 2월 14일

워크숍 목표 및 개요	본 워크숍의 목표는 시스템 사고의 인과지도 분석 기법과 시스템 다이내믹스의 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 익히고, 이러한 기법을 현실의 문제에 적용할 수 있는 능력을 키우는데 있다.
참가 대상	- 동태적 변화의 근원적 메커니즘을 이해하고자 하는 연구자 - 현실 문제를 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 구축하려는 연구자 - 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 논문을 작성하고자 하는 대학원생
선수 과목	- 없음
워크숍 운영방식	- 분야별로 특화된 10명의 강사들에 의한 집중적 강의와 실습의 병행
교재 및 참고문헌	- 김도훈, 문태훈, 김동환, 1999, 시스템 다이내믹스, 대영문화사 - 김동환, 2004, 시스템 사고, 선학사
실습자료	- 실습을 위한 모델링 사례는 강의 시간에 설명
사용될 프로그램	- Vensim PLE (http://www.vensim.com/ 에서 무료 다운로드 가능)
담당교수 정보	- 김동환 중앙대 공공인재학부 교수 - 현재 한국 시스템 다이내믹스 학회 회장
기타 사항	- 워크숍 참석자들에게 향후 시스템 다이내믹스 학회 및 월례 세미나에서 각자의 모델링 및 인과지도 분석 결과를 발표할 기회를 부여함.

일 시	강의 및 실습 내용	강 사
2/7 (월)	시스템 사고와 시스템 다이내믹스 모델링에 관한 전반적인 소개	김동환 김창욱
2/8 (화)	기본적인 분석 도구 소개: BOTG, 인과지도, Vensim S/W	최남희 박상현
2/9 (수)	인과지도 원형(Archetype)을 활용한 시스템 분석 방법	연승준 김동환
2/10 (목)	Stock/Flow Diagram 개념 및 모델링 방법	박경배
2/11 (금)	모델링에서의 고급함수 활용(Delay, Graph 함수) 및 시뮬레이션 결과 분석 방법	김창욱 전대욱
2/14 (월)	기본적 모형: 확산모형 / 생태계 모형	전재호 전대욱
2/15 (화)	발전된 모형: commodity cycle / 인구-환경-에너지	김창욱 유재국
2/16 (수)	민감도 분석 / 캘리브레이션 / 결과 검증	오영민
2/17 (목)	ST/SD 전략적 시사점, 이슈 분석	최남희 김동환
2/18 (금)	SD의 연구 성과 검토 및 타 연구방법과의 연계	문태훈 김동환

시스템 다이내믹스 소개: 역사와 정신

김동환
(중앙대, sddhkim@cau.ac.kr)

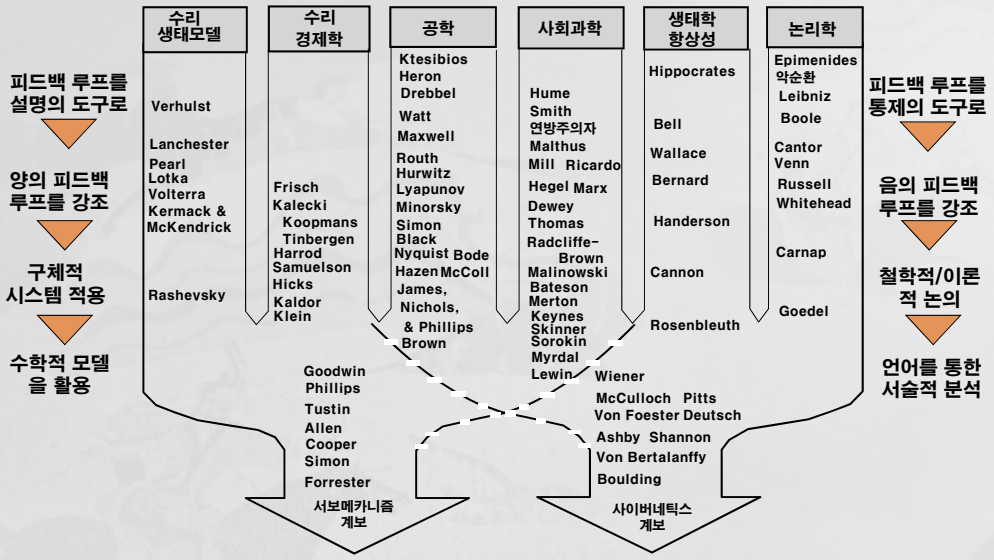
2011년 2월 7일

1. 시스템 다이내믹스의 출발

"산업동태론은 산업시스템들의 행태를 연구하는 방식으로서,
정책과 의사결정과 구조 그리고 시간지연 등이 어떻게 상호연결되어
시스템의 성장과 안정성에 영향을 주는지를 밝히고자 한다...
산업동태론은 시스템에 동태적인 특성을 부여하는
정보 네트워크의 중요성을 강조한다" (Forrester 1961, 서문)

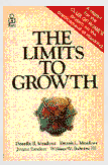
- Jay Forrester는 공학자로써 15년간 MIT에서 공군 프로젝트를 수행하여 왔음.
- 1956년 MIT Sloan School에 합류. General Electric의 켄터키 가전공장의 불안정한 가동률에 대해서 처음으로 종이에 연필로 시뮬레이션 수행.
- 1958년 Harvard Business Review에 "Industrial Dynamics-A Major Breakthrough for Decision Makers" 라는 논문 발표. 이때 Dick Bennett가 Dynamo의 전신인 SIMPLE(Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations)을 만듦. 이후 Jack Pugh가 DYNAMO를 만듦.
- 1968년 보스톤시의 전 시장 John F. Collins가 Forrester 연구실 옆 방에 오게 되어, 토론을 벌이면서 결국 Urban Dynamics로 발전함. Urban Dynamics는 많은 토론을 불러왔으며, 흑인들의 적개심을 사기도 하였음. 그러나 Urban Dynamics로 인하여 World Dynamics나 Limits to Growth, National Model등에 관한 프로젝트가 성사되었으며, System Dynamics는 많은 사회적 관심을 받게 되었음.

2. 시스템 다이내믹스의 역사적 배경



3. 시스템 다이내믹스의 발전

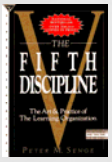
- 시스템 다이내믹스 발전의 중요한 사건들



1960년대: Forrester가 Industrial Dynamics, Urban Dynamics, World Dynamics 를 연속적으로 출판함으로써 시스템 다이내믹스를 하나의 학문체계로 구축함.

1970년대: Meadows의 The Limits to Growth가 환경정책의 중요성을 환기시킴

1980년대: Barry Richmond의 STELLA가 기존의 Dynamo를 대치하면서 그래픽 시뮬레이션을 도입하여 시스템 다이내믹스 모델링을 초등학생도 할 수 있을 정도로 쉽게 만들어 대중화의 기반을 닦음

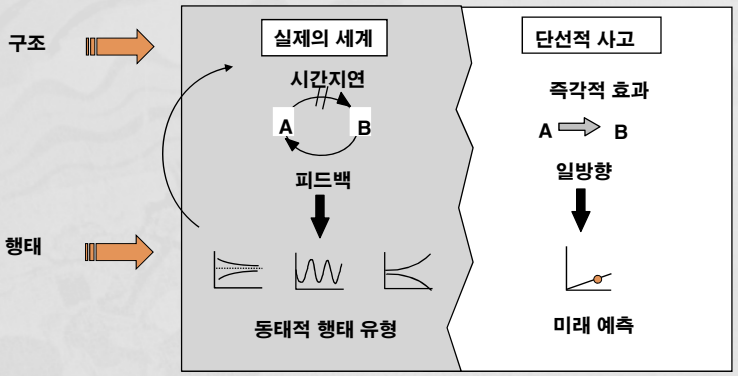


1990년대: Senge의 'The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization' 가 베스트 셀러가 되면서 시스템 다이내믹스의 유용성에 대한 광범위한 인식을 구축함

2000년대: Forrester의 주도로 1990년 부터 시작한 K-12 시스템 다이내믹스 프로젝트가 성공하는 경우, 초등학생, 중학생, 고등학생들에게 광범위하게 시스템 다이내믹스 교육이 이루어질 것.

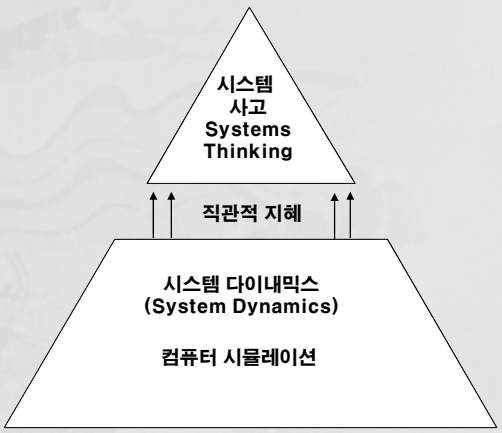
4. 시스템 다이내믹스의 세계관

- 시스템 다이내믹스는 구조가 행태를 결정짓는다는 세계관에 기초하고 있다.
- 여기에서 구조(structure)란 피드백 루프(feedback loops)를 의미한다.
  (피드백 루프를 형성할 때 시스템은 비로소 자기동력을 지니게 된다)
- 그리고 행태(behavior)란 동태적 행태유형(dynamic pattern of behavior)을 의미한다.
  (미래의 예측은 불가능하다고 생각한다. 현재는 이해의 대상이며, 미래는 창조의 대상이다.)



5. 시스템 다이내믹스와 시스템 사고

- 시스템 사고(systems thinking)은 컴퓨터 시뮬레이션에 초점을 두는 시스템 다이내믹스에서 직관적 사고 방식을 추출하여 체계화한 소프트한 분석 방법으로서 인과지도분석을 핵심으로 함.



6. 시스템 다이내믹스의 두 가지 연구 방법

ST 부드러운 방법론 (Soft Methodology)		SD 딱딱한 방법론 (Hard Methodology)
인과지도 모델링	↔	Stock/Flow 모델링
직관적 분석	↔	컴퓨터 시뮬레이션 분석
질적 분석	↔	양적 분석
상식의 구조화	↔	상식 밖의 현상 발견 (놀라움의 가치)
대중성 지향	↔	전문성 지향
Coyle, Eden, Meadows, Senge 등 비주류	↔	Forrester, Sterman, Richardson 등 주류

7. SD와 ST의 핵심은 ?

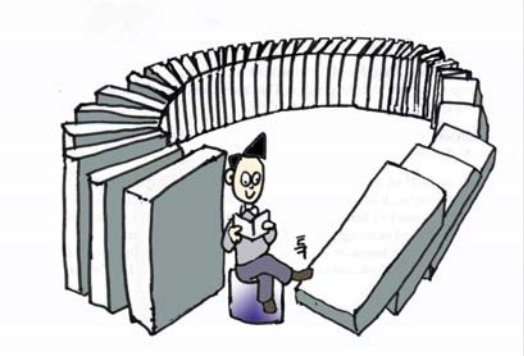
세계 시스템 다이내믹스 학회 로고

한국 시스템 다이내믹스 학회 로고

MIT 시스템 사고 교육 로고

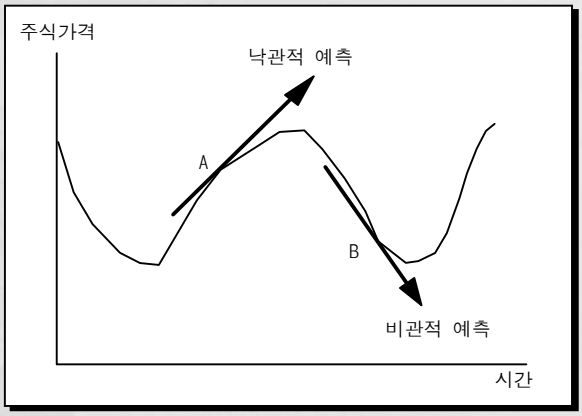
8. 피드백에 대한 무지

사람들이 가장 이해하기 어려운 것이 바로 피드백 효과



9. 피드백에 대한 무지와 실패

피드백을 이해하지 못하는 단선적 사고는 개미의 함정에 빠진다.

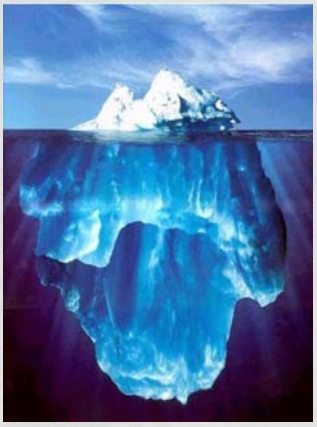


10. 보이지 않는 피드백 루프

피드백 루프는 보이지 않지만, 시스템을 움직여 나가는 원동력이다.

현상만 바라보는
단선적 사고의 세계

현상을 발생시킨
본질적 구조를 바라보는
피드백 사고의 세계



드러난 관계	매 → 뇌조
숨겨진 관계	전염병에 걸린 뇌조

11. 시스템 다이내믹스의 사고 방식

- 시스템 다이내믹스의 핵심은 피드백 루프의 발견과 이해에 있다.
  추상적인 변수들이 아니라 구체적인 피드백 루프에 의해 발생되는
  시스템의 동태적 변화를 이해하는 것이 시스템 다이내믹스의 본질이라고 할 수 있다.

▹ **피드백 사고(Feedback Thinking)란**

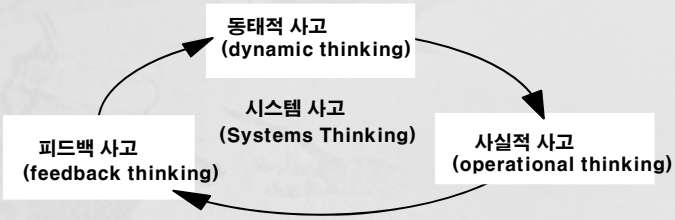
시스템의 작동 메커니즘이 피드백 루프라는 점을 인식하고 이를 발견하여 활용하는 사고방식이다.

▹ **동태적 사고(Dynamic Thinking)란**

시스템의 정태적 상태보다는 부단한 변화에 초점을 두어야 시스템을 이해할 수 있다는 사고방식이다.

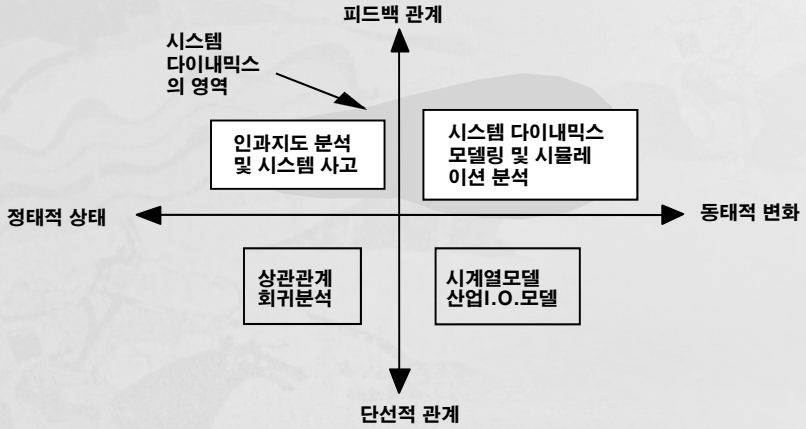
▹ **사실적 사고(Operational Thinking)란**

시스템의 요소와 관계성을 구체적으로 직시할 때에만 시스템을 이해하고 조절할 수 있다는 사고방식이다.



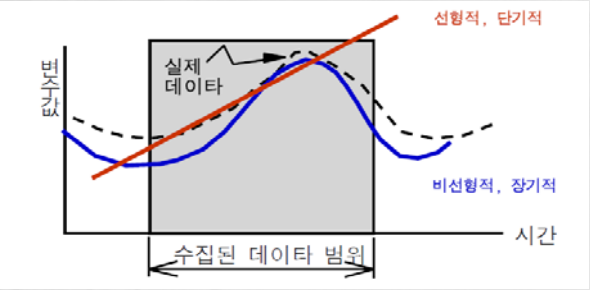
12. 시스템 다이내믹스의 방법론적 위상

연구의 방법
- 연구의 대상 (설명할 현상: 정태적 상태 / 동태적 변화)
- 연구의 초점 (설명의 도구: 피드백 관계 / 단선적 관계)



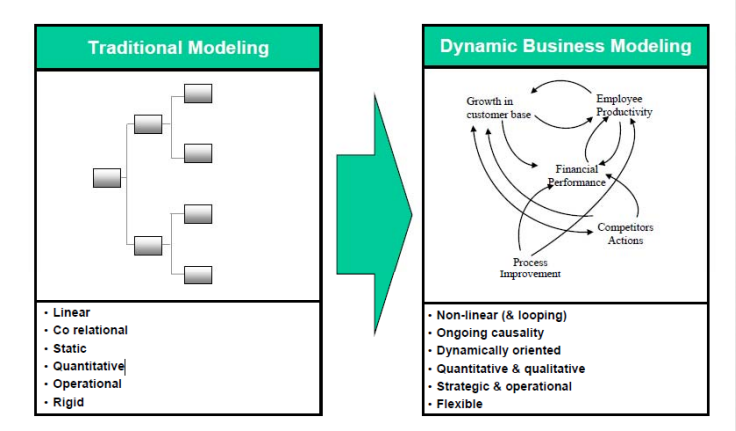
13. 시스템 다이내믹스의 지향점

시스템 다이내믹스는 시스템의 장기적이고 비선형적인 변화 유형에 초점을 둔다.



14. 기존의 분석과 시스템 다이내믹스의 분석

비즈니스의 Dynamics와 Complexity은 SD를 필요로 한다.



15. 시스템 다이내믹스와 동양적 사고

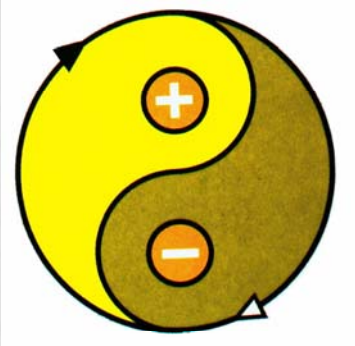
변화

↓

음양

↓

순환

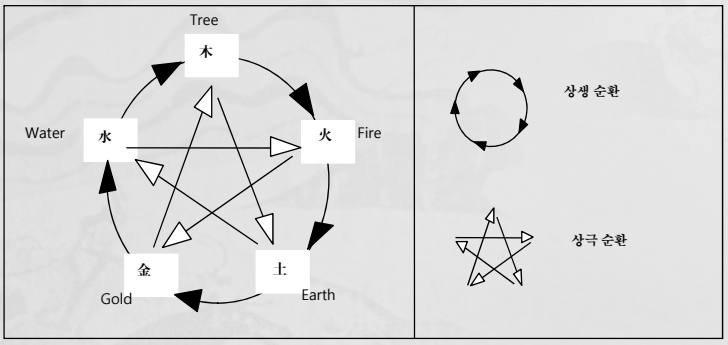


음의 피드백 루프 => 여성적인 안정성 => 변화 억제 / 균형

양의 피드백 루프 => 남성적인 역동성 => 변화 증폭 / 성장

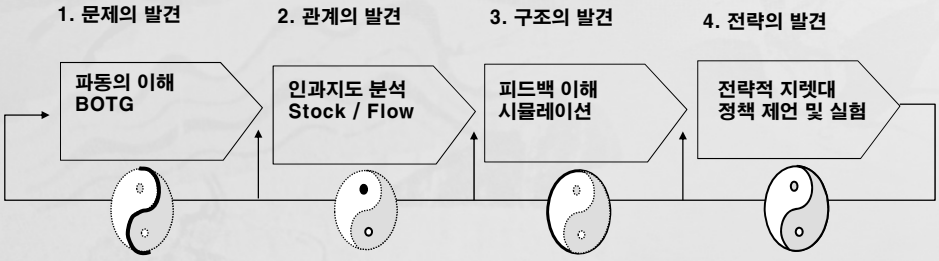
16. 구체적 사고 vs. 추상적 사고

태극도에 익숙한 한국 민족에게 있어서 양의 피드백 루프는
상생 순환으로, 음의 피드백 루프는 상극 순환으로 알려져 왔다.



17. 시스템 다이내믹스의 적용 과정

- 시스템 사고는 궁극적으로 시스템을 변화시킬 수 있는 효과적인 지점을 발견하고자 한다. 이러한 점에서 시스템 사고는 전략을 발견할 수 있는 사고로 연결됨으로써 완성된다.



18. 행태에서 구조로 그리고 전략으로

행태	구조	전략
패턴 분석 Continuous Patterns	피드백 분석 Endogeneous Feedback Loops	정책 지렛대 Policy Leverage

음의 피드백 루프
(Negative Feedback Loop)

기다림의
수비형 전략

음의 피드백 루프 + 시간지연
(Negative Feedback Loop + Time Delay)

수비와 공격의
혼합 전략

양의 피드백 루프
(Positive Feedback Loop)

선두주자의
공격형 전략

19. 우리는 어떠한 순환을 타고 있는가?

1. 우리는 순환을 타고 있는가?
   => 억지로 밀어 붙이는가 아니면 순환의 힘으로 흘러가는가?

2. 우리가 타고 있는 순환은 어디로 흘러 가는가?
   => 양의 피드백인가 아니면 음의 피드백인가?

System Dynamics 모델링 개요

김창욱
(삼성경제연구소, cwkim@seri.org)

2011년 2월 7일

CLD의 장점과 한계:
정성적 모형화 도구에 불과 / 정량적 모형화 도구로는 부족

- 장점:
  - 복잡한 시스템의 구조를 알기 쉽게 표현하여 이해되도록 함
  - 머리 속에 있는 생각을 객관화시킴으로써 생각의 교류를 가능케 함
  - 시스템 원형(archetype)을 활용하여 시스템의 행태와 정책 지렛대를 쉽게 발견

  ※ 시스템 원형: 현실에서 반복적으로 직면하게 되는 기본적이면서 전형적인 구조.
  Limits to Growth, Shifting the Burden, Tragedy of Commons …
- 한계:
  - 시스템의 동태적 변화(dynamics)를 보여주지 못함
  - 정성적 분석에 그쳐 정량적 분석을 제공하지 못함

어떤 Dynamics가 나타날지 알려면 정량적 모형의 구축과
이에 대한 시뮬레이션 분석이 필요

모델링 활용 사례: Ingalls社의 이야기

군함제작 회사, Ingalls

1970년, 미 국방성의 세계최대규모 계약

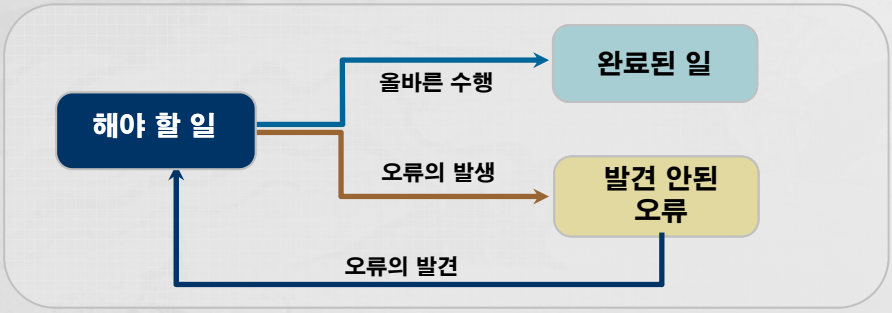
➔1976년, 5억 달러 비용 초과

Ingalls	미 국방성
설계변경 요청 때문에 적자	추가요구는 2억 달러뿐

간접적인 초과비용, 어떻게 밝힐 것인가?

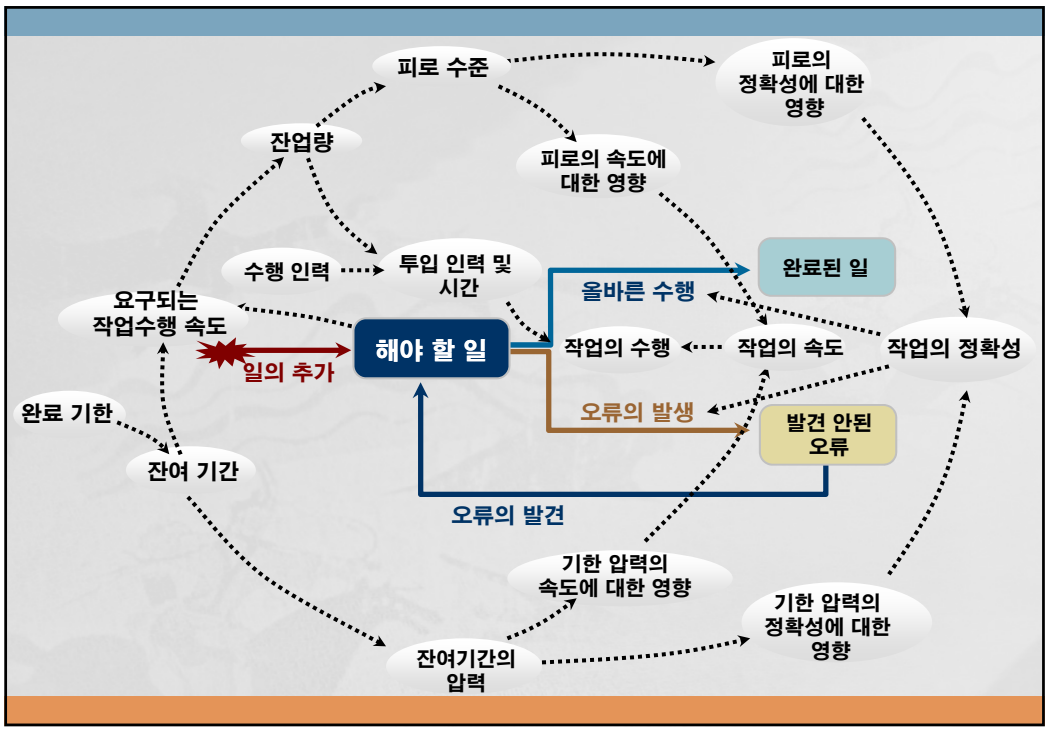
시스템 다이내믹스 모형을 활용

▶ 프로젝트의 **시스템 다이내믹스** 모형제작

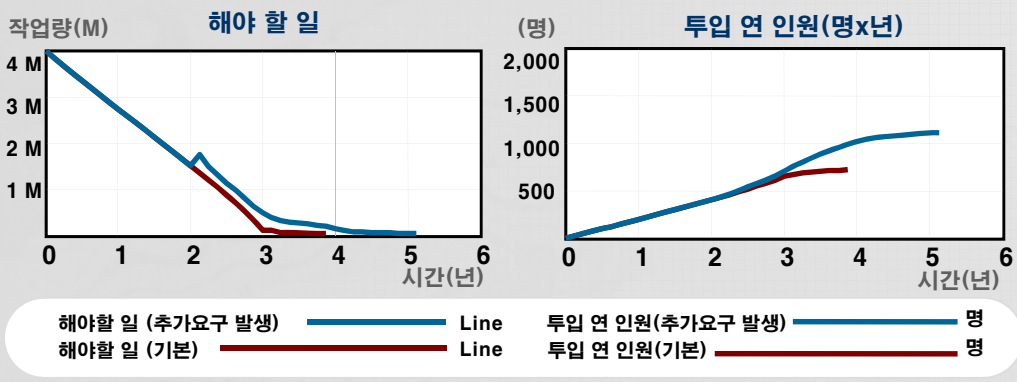


<일정의 압력>, <초과근무로 인한 피로>

➔ 작업의 속도, 정확성 결정



변수를 수량화하고 실제값을 입력하여 시뮬레이션을 수행



업무 10% 추가 → 50% 이상 추가비용 발생

시스템 다이내믹스의 승리

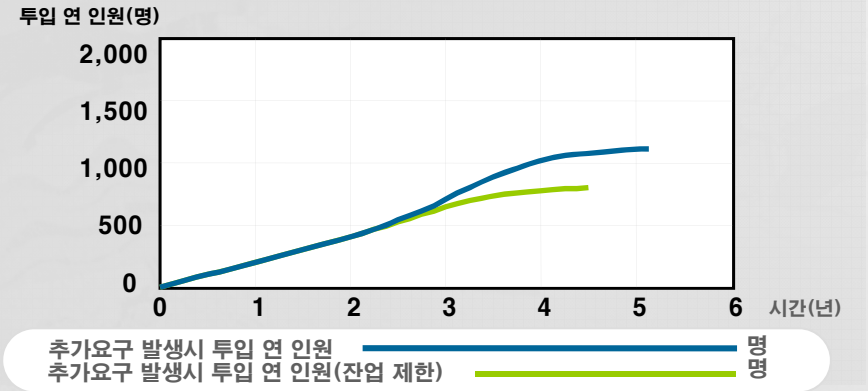
미 국방성, 4억 4700만 달러 지불

"시스템 다이내믹스가 뭐길래?"

System Dynamics

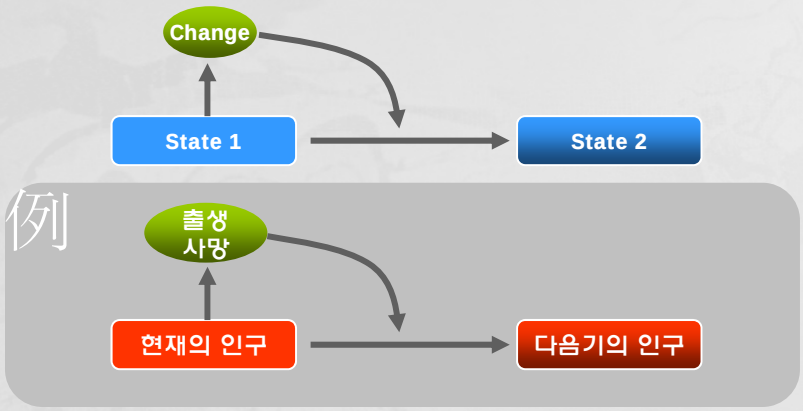
잔업 제한 정책의 효과

잔업, 작업의 정확도 저하



➔ 비용 40%감소

다이내믹스를 낳는 것은 'state' 와 'change' 의 feedback



Feedback의 반복을 통해 다이내믹스가 발생

모델링의 핵심과제: Stock/Flow 구분과 변수간 관계식 설정

- 모형: '현재 상태에서 다음 상태가 어떻게 결정되는지 정한 규칙들의 집합'
- 시뮬레이션: '모형에 따른 상태 이전을 반복적으로 적용하는 것'

  → 시스템의 총체적 상호작용 결과로 산출되는 동태적 특성을 분석

- 모형화의 핵심과제:

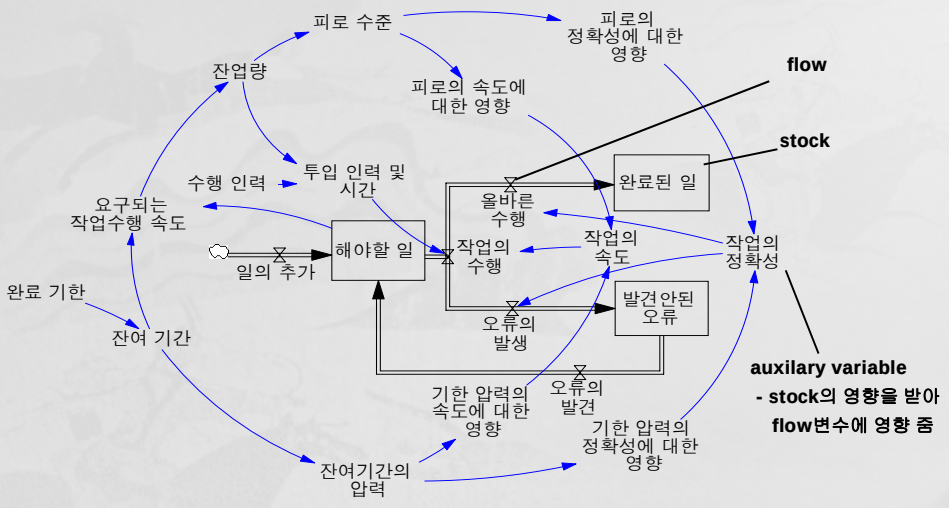
  1. 상태변수(stock)과 변화량 변수(flow)를 구분

     → stock-flow diagram(SFD)

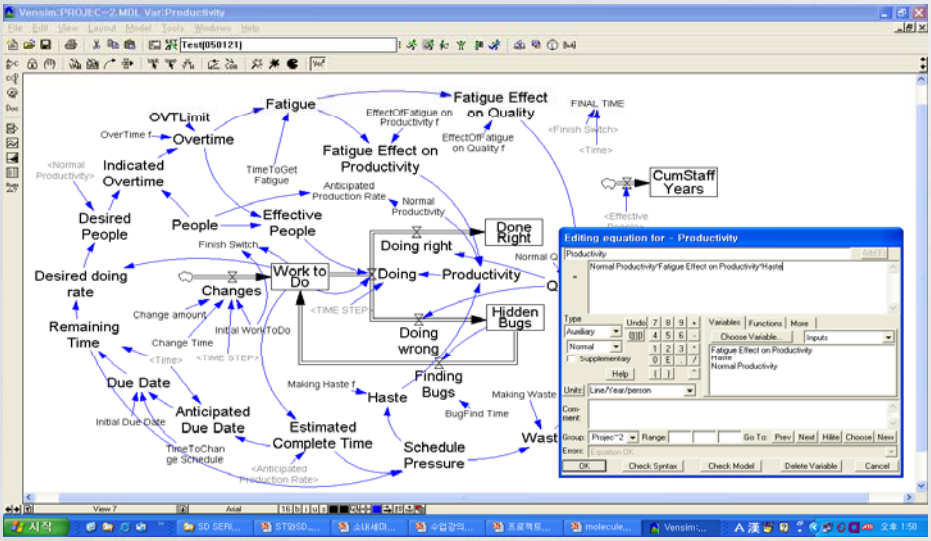
  2. 상호작용의 규칙을 정형화

     → 변수간 관계식(equations) 설정

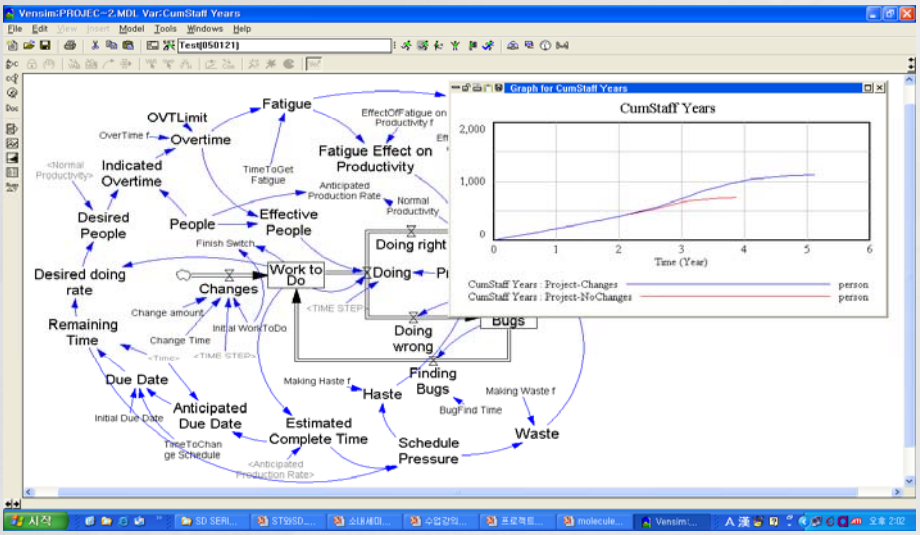
Stock-Flow Diagram: Stock, Flow, Auxilary Variables의 관계를 표현



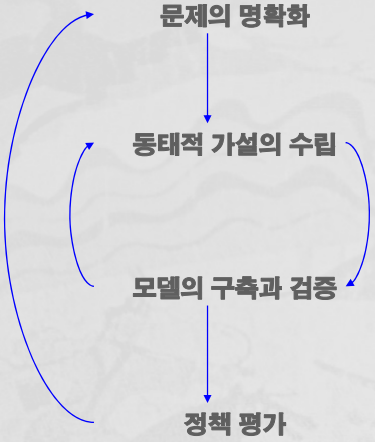
전용 소프트웨어(Vensim)의 활용: SFD 작성 / 관계식 입력



전용 소프트웨어(Vensim)의 활용: 시뮬레이션 / 결과 분석



SD 모델링 과정은 4단계로 구성



- 핵심변수 도출
- Reference Modes

- 멘탈 모델 추출
- 인과루프 다이어그램(CLD)
- 저량-유량 다이어그램(SFD)

- 변수간 관계식 및 초기값 설정
- 시뮬레이션, 적합화 (calibration)
- 모델의 테스트

- 시나리오 분석
- 민감도 분석(sensitivity test)
- 최적화(optimization)

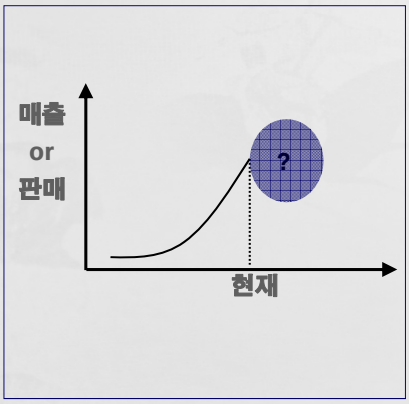
모델링 과정 예: Boom & what?

- 매출 하락을 막는 전략은?

Capacity 투자

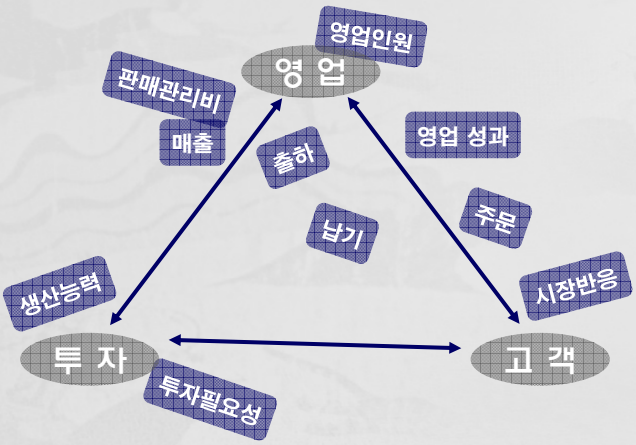
Vs.

판매 강화



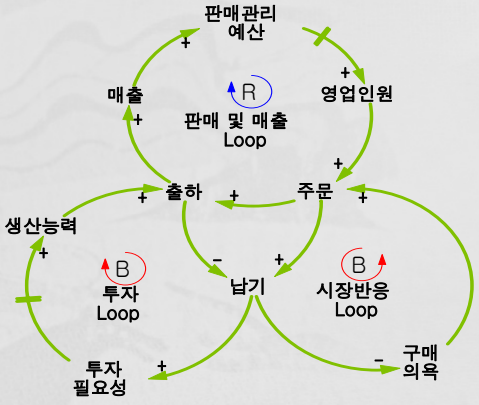
문제의 명확화 – 주요 고려 변수의 추출

- 영업, 투자, 고객 3 분야로 모델의 경계 설정



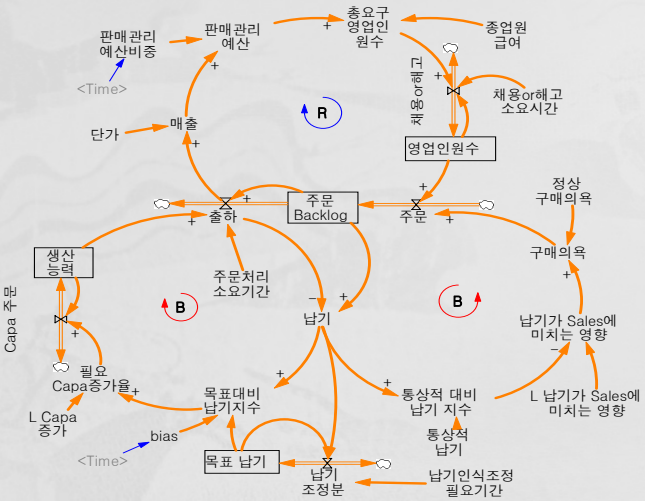
시스템의 구조 그리기

주문↑→ 매출↑→ 판매예산↑→ 영업인원↑→ 주문↑
납기↑→ 투자↑→ 생산능력↑ → 납기↓
주문↑→납기↑→ 구매의욕↓ → 주문↓



모델의 구축

- **Stock-Flow Diagram 작성 / 관계식과 초기값 설정 / 모델 행태 테스트**



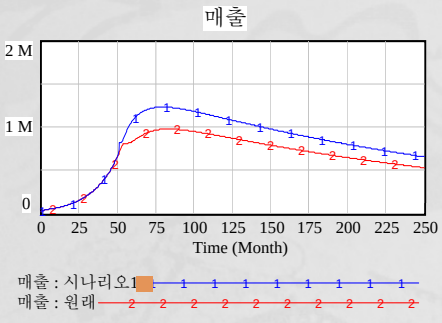
정책 평가 (1) – 정책수단

- **Positive Loop 강화 vs Negative Loop 약화**

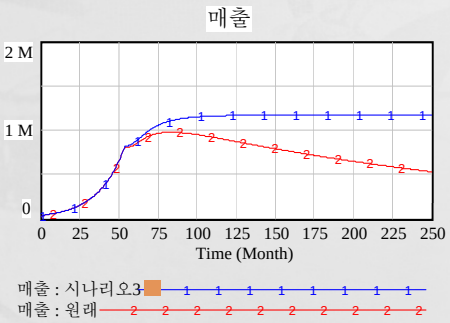
Strengthening the Positive Loop	Weakening the Negative Loop
◈ 판촉 활동 강화 · 판매관리비 비중 증대 · 소비자 인센티브 강화 → 영업인원 확대 ◈ 영업력 배가 · 영업인원당 판매대수 증대	◈ 투자의 적절성 확보 · 납기지연時 생산능력 증대 위한 투자지연 단축 → 적극적 투자 ◈ 납기지연 조기 인식 · 납기 조정기간 단축

정책 평가 (2) – 시나리오별 결과

시나리오 1 : Positive Loop 강화



시나리오 2 : Negative Loop 약화



모형화 방법 정리: '복잡한 현실을 모형화 하기'

어떻게?

- 문제와 관련된 Key Variables의 리스트를 만들어라
- 변수들간의 인과관계 속에서 Feedback Loop들을 찾아라
- Stock-Flow-Auxiliary Variables를 구분하라
- 변수들간의 관계를 Equation으로 만들어라
- Simualtion을 통해 여러 가지 정책의 효과를 Test해라

제2강 시스템 다이내믹스 분석 도구

박상현
(한국정보화진흥원, shpark@nia.or.kr)

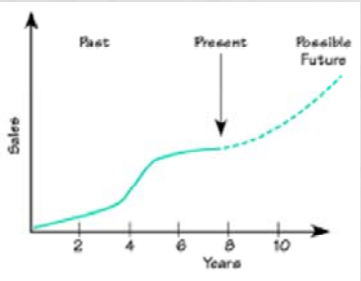
2011년 2월 8일

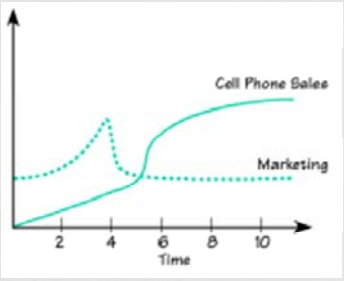
1. Behavior over Time(BOT) Graphs

시스템 사고 도구 중 하나인 Behavior over time (BOT) graphs 는 시간의 흐름에 따른 행태의 변화를 보여주는 그래프로 가로축은 시간, 세로축은 관심 변수의 값을 표시

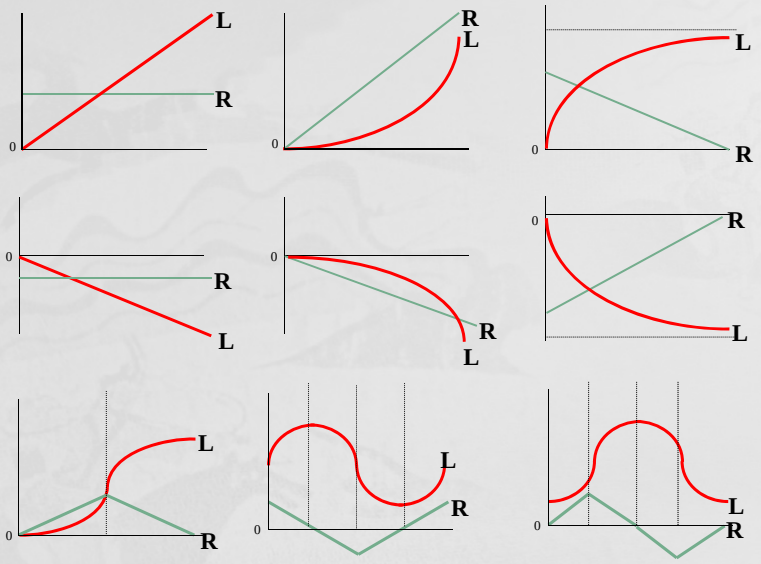
BOT 그래프는 불규칙인 행태를 나타내기도 하지만 대체로 일정한 유형을 가지는 경향이 있음

BOT는 해당 시스템의 구조적 특성에 따라 몇 가지 유형으로 보이며 구조를 통해 행태를 예측하거나 행태를 통해 구조를 유추하는 것도 가능함

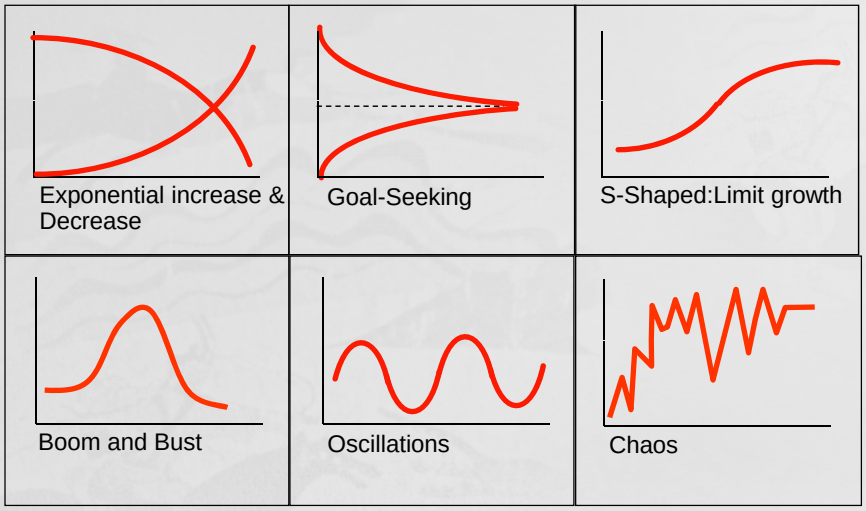




❖ 다양한 형태의 BOT 그래프



❖ 시스템 행태의 전형

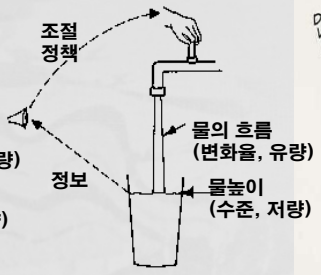


2. 인과지도의 정의 및 기본 개념

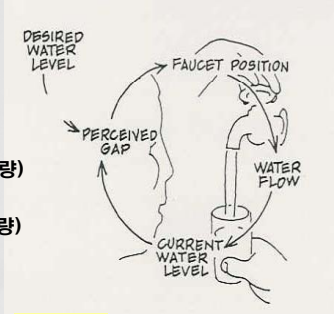
- 인과지도(CLD: *Causal Loop Diagram*)란 수면 위로 드러난 현상에 집착하지 않고 비가시적 세계 즉 수면 아래에서 그 현상을 유발하는 잠재원인들의 상호 작용 구조를 시각적으로 나타내 보인 것, 즉 자신의 인식을 외부로 나타낸 일종의 정신모델(*Mental Model*)을 말한다.
- 인과지도(CLD)의 작성은 시스템 사고 모델링을 위한 기초단계로서 무엇을 도식적으로 나타내고자 하는 가장 근본적인 목적은 자신이 관조하는 대상으로부터 인지 내지 이해한 바를 외부로 표출하고자 하는 것이다.
- 시스템의 피드백 구조 표현의 중요한 도구
  - ➢ 다이나믹한 인과관계에 대한 가설 도출 용이
  - ➢ 개인 또는 팀의 mental model 도출 및 정리 용이
  - ➢ 도출된 중요한 피드백이 문제에 합당한 지에 대한 정보 제공 용이
  - ➢ 매우 단순한 도구이나 충실하게 따라야 함.
  - ➢ 연주자의 악보와 대비
  - ➢ 초기엔 낯설지만 계속적인 훈련을 통해 곧 친숙해 질 것임

❖ 단선적 사고와 피드백 사고, 그리고 인과지도

단선적 사고



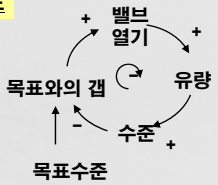
피드백 사고



인과지도

문제에 대한 정보 → 행동 → 결과

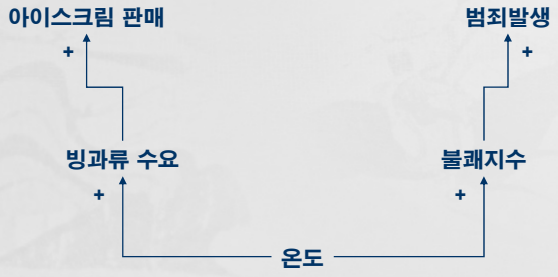
문제에 대한 정보 → 행동 → 결과



❖ 상관관계와 인과관계

- 상관관계

- 인과관계



❖ 변수들간의 관계를 인과관계로만 표현

❖ 상관관계는 시스템에서 변수들의 과거 행동을 반영, 시스템의 구조는 나타내지 못함

❖ 상관관계는 모델을 시뮬레이션 한 결과 모델의 행동으로부터 도출됨

❖ 인과지도의 구성요소

❑ 화살표 →

❖ 변수와 변수간의 인과관계 및 방향을 의미

암탉 → 달걀

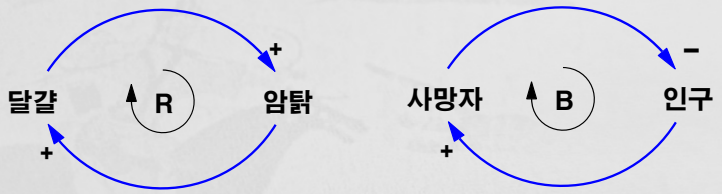
❑ + / -

❖ 변수간 인과영향의 방향

암탉 $\xrightarrow{+}$ 달걀　　사자 $\xrightarrow{-}$ 사슴

❑ 피드백 루프

❖ 여러 개의 인과관계로 연결된 고리, 쌍방향 영향을 표현

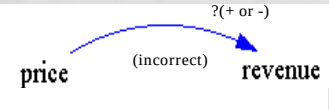


극성 (Link Polarity)

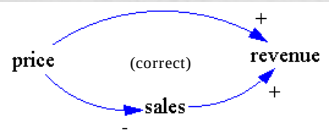
- 다른 모든 것들이 같다면 X가 증가(감소)하면 Y도 증가(감소)하는 관계 (변화의 방향이 같음)

- 다른 모든 것들이 같다면 X가 증가(감소)하면 Y는 감소(증가)하는 관계 (변화의 방향이 반대)

- 모든 극성은 분명해야 한다.



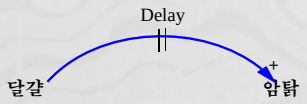
- 가격이 수입에 영향을 주는 것은 분명하나 가격탄력성에 따라서 어떤 것은 positive, 어떤 것은 negative의 관계 일 수 있다.

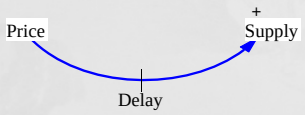


- 분명하게 표현할 수 있도록 인과지도를 구성해야 함

❖ 인과지도 작성방법

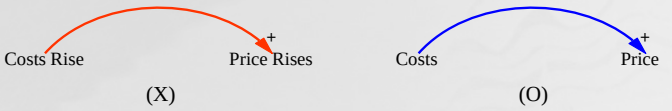
- Loop 이름부여
  - 의사소통을 위해 loop별로 적정한 이름을 부여하는 것이 좋다
- 인과관계연결에서 중요 지연상황 표시
  - 인과지도에서 지연은 매우 주요한 정보이며 의미있는 중요한 지연이 발생하는 연결에는 지연이 발생함을 표시할 것





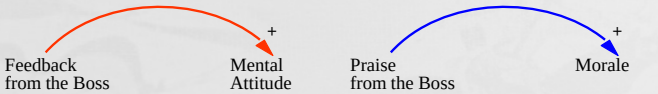
- 변수이름부여
  - 명사나 명사구 사용
  - 방향에 대한 분명한 의미를 갖도록 부여
  - 변수의 방향에 대한 느낌이 긍정적이 되도록 부여

명사 또는 명사구 사용



(X) (O)

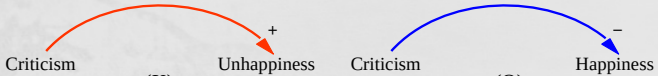
명확한 방향성



(X) (O)

긍정적 표현

(X) (O)



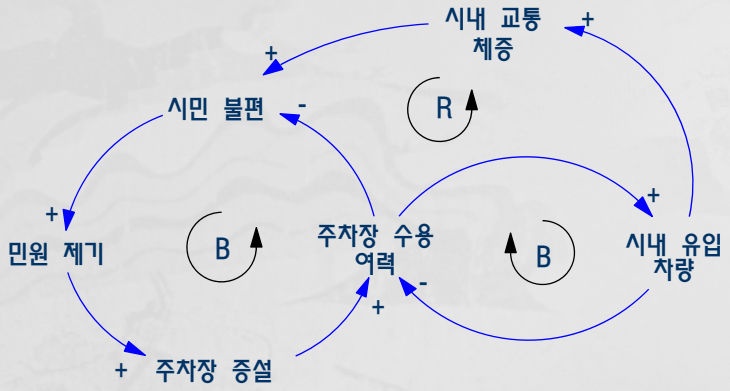
(X) (O)

- Negative loop의 goal을 분명히 하라
  - Negative loop에서 goal의 명확한 표현이 시스템 구조 이해용이
- 상세표현의 적정수준 유지
  - 지나친 단순화나 지나친 세분화는 사용자의 이해가 난해
- 하나의 커다란 인과지도에 모든 loop를 표현하지 마라
  - 하나의 화면에 표시할 항목의 적정한 수는 7±2 (magic number 7)
  - 중요 loop를 중심으로 분리하여 개발
- 실제상황과 인지된 상황을 구별하라
  - 인지된 상황이 실제 상황과는 많은 편차를 보일 경우가 많음
  - 변수들간에 loop에서의 정보를 전달하는데 많은 소음과, 편차, 왜곡현상이 발생하기 때문
  - 현장에서의 품질과 경영자가 인지한 품질간의 차이

- 인과지도 개발에 인터뷰자료를 활용하라
  - 문헌 자료 분석 보다는 해당 시스템을 구성하고 있는 사람들의 인터뷰를 통해 인과지도에 필요한 자료를 얻는 것이 유용
  - 기타 양적, 질적 자료의 보완은 필수적
  - 모델 구축자는 문제상황의 구조와 그 안에서 행동하는 사람들의 의사 결정절차 등에 대한 안목을 위해 필요한 모든 자원을 활용해야 함
- 모델 작성자의 경험과 지식의 활용
  - 인터뷰와 문헌 등의 조사만으로 문제에 대한 모든 변수와 관계를 규명할 수 없음
  - 상당한 부분은 모델 작성자의 경험과 지식이 반영되어야 함

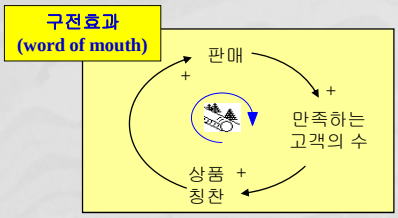
- 기타 지침
  - 곡선을 사용하라
  - 중요 loop는 원형 또는 타원형이 되도록 구성하라
  - 선의 겹침을 최소화하라
  - 변수 주변에 다른 심벌의 표시를 자제하라
  - 되풀이하라
- 주의 사항
  - stock & flow 모델에서 stock의 변화를 알기 위해서는 단 하나의 변수와의 관계를 보고 stock의 변화를 판단해서는 곤란하다.
  - 다른 input요소도 있기 때문에 stock의 변화를 예측하기 위해서는 net flow를 알아야 한다

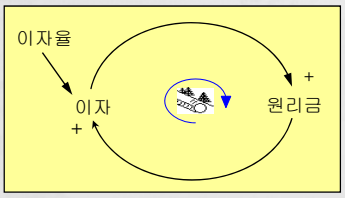
❖ 인과지도 작성 사례

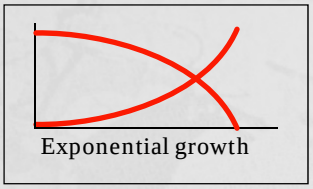


인과지도와 BOT 그래프 행태 : 양의 피드백

양의 피드백 루프는 어느 한쪽의 극단으로 강화시키는 속성을 갖는다.
따라서, 자기 강화적 루프(Self-Reinforcing Loop), 일탈 강화적 피드백(deviation amplifying feedback) 등으로 불린다.

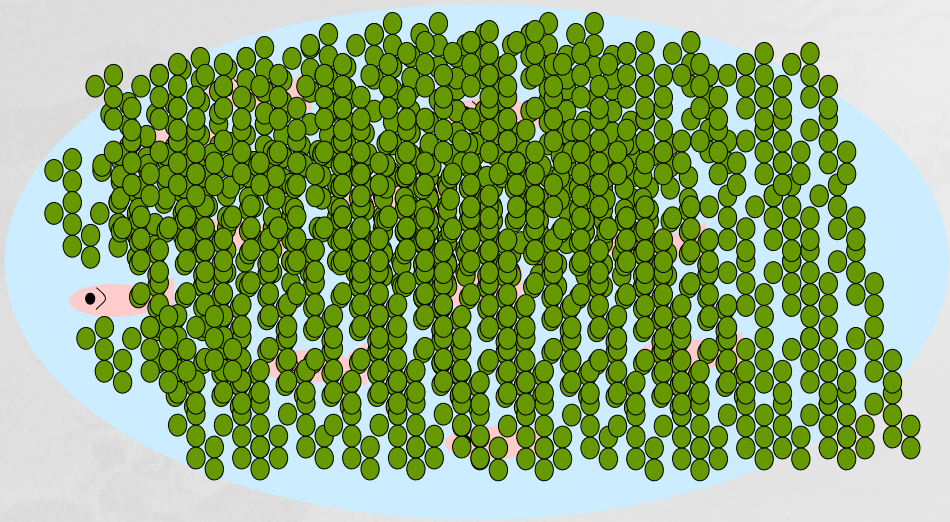






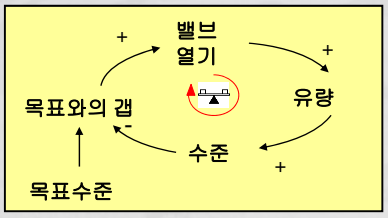
☞ *악순환(vicious circle) 이나 선순환(virtuous circle) 은 양의 피드백 구조*

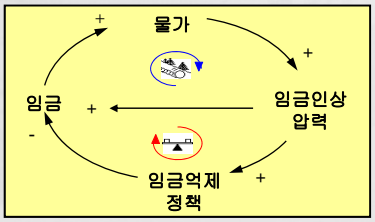
생각해 봅시다

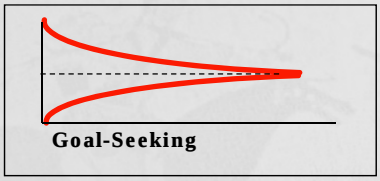


인과지도와 BOT 그래프 행태 : 음의 피드백

음의 피드백루프(negative feedback loop) 스스로 균형 상태를 유지하려는 피드백 구조를 갖는다. 자기균형적 루프(Self-Balancing Loop), 목표지향형 피드백(goal seeking feedback), 안정화 피드백(stabilizing feedback), 자기억제 피드백(self restraining feedback) 등으로 불림



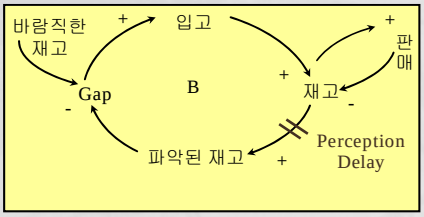


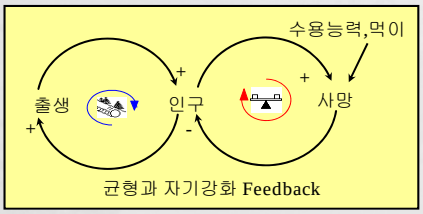


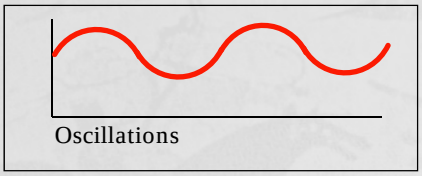
☞ *모든 시스템은 하나 이상의 음의 피드백을 지니고 있다고 볼 수 있음*

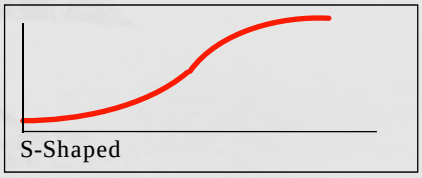
인과지도와 BOT 그래프 행태 : 지연과 제약

시간 지연은 시스템의 행태가 균형점에 수렴하지 못하게 만드는 원인이 되며 수용능력과 같은 시스템 내의 제약 사항은 양과 음의 지배적 루프의 변화속에서 S형 성장의 행태를 나타내게 된다.

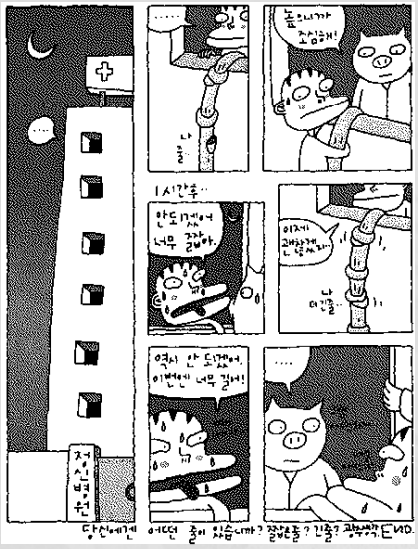








생각해 봅시다



- 모든 의사결정은 정보에 의존한다…. 그러나 정보와 행위간에는 항상 지연이 발생하기 마련이다.
- 정보와 행위간의 지연은 파동을 생성한다.
- 행동을 위한 정보는 얼마나 정확해야 하는가?

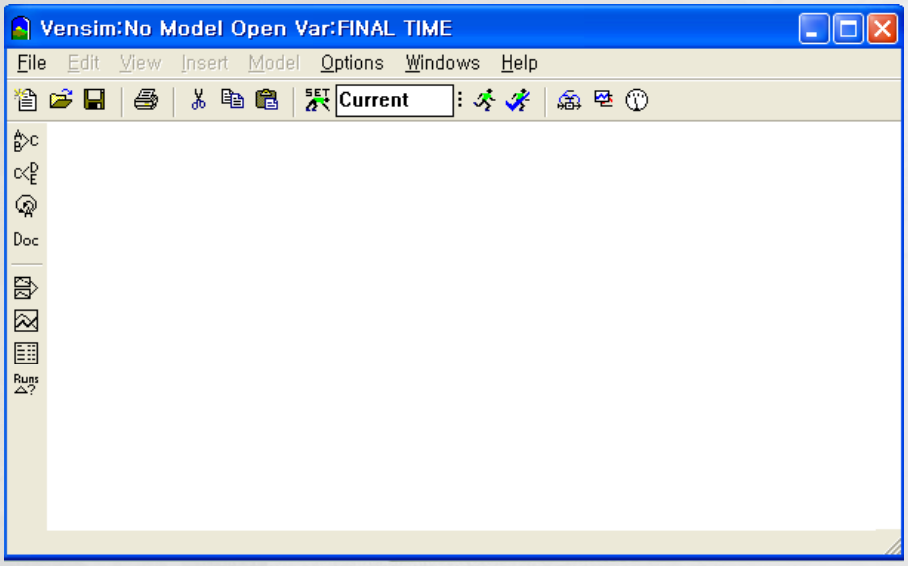
인과지도의 전략적 활용

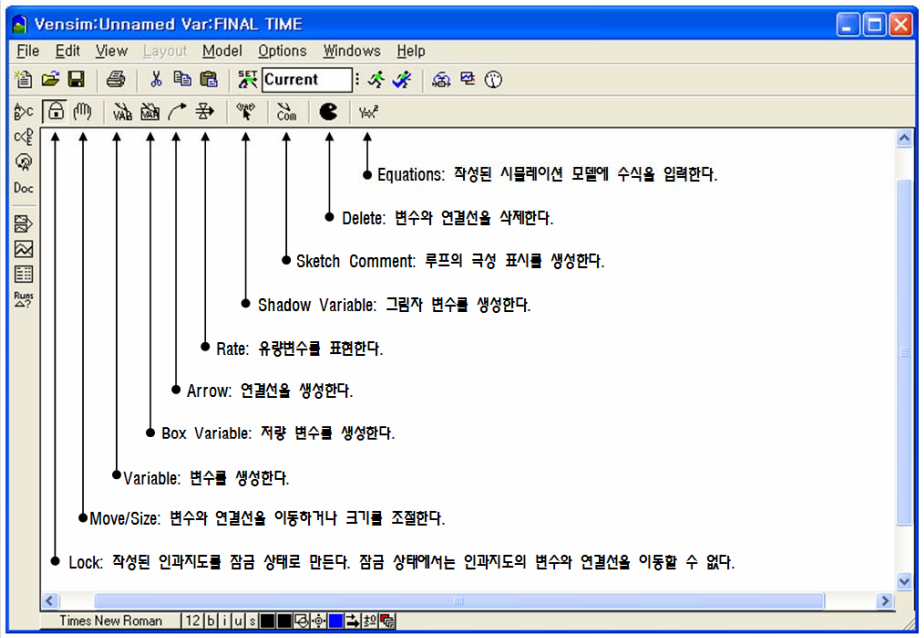
행태	구조	전략
연속적 유형 Continuous Patterns	피드백 루프 Feedback Loops	정책 지렛대 Policy Leverage
Goal seeking 수렴	음의 피드백 루프 (Negative Feedback Loop)	▶목표수정 ▶병목지점 (Bottleneck)
지수적 증가,감소 성장, 쇠퇴	양의 피드백 루프 (Feedback Loop)	▶ 임계지점 (Critical Mass) ▶ 수확체증, 구전효과
S-shaped: 성장한계,용량제약	음의 피드백 루프 + 양의 피드백 루프 (Negative + Positive Feedback Loop	▶ 용량제한 ▶ 회선용량
Oscillations: 파동, 불안정	음의 피드백 루프 + 시간지연 (Negative Feedback Loop + Time Delay)	▶ 완충장치 (Buffer Device) ▶ Timing management

3. Vensim을 활용한 인과지도 작성

인과지도를 작성하기 가장 좋은 소프트웨어로는 미국 VENTANA사에서 개발한 Vensim을 들 수 있다. Vensim은 다양한 버전의 제품들이 출시되어 있으며 이중 Vensim PLE 버전의 경우 교육용에 한하여 무료로 제공되는 버전으로 VENTANA사의 홈페이지(www.vensim.com)를 통해 다운로드 받을 수 있다.

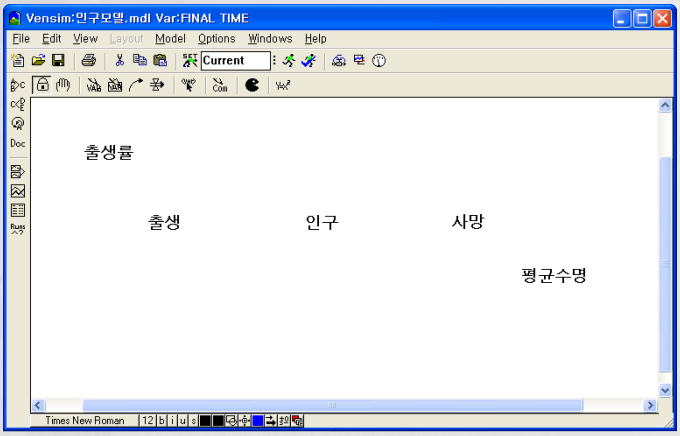
❖ Vensim 초기화면


Vensim:No Model Open Var:FINAL TIME
File Edit View Insert Model Options Windows Help
Current
Doc
Runs


Vensim:Unnamed Var:FINAL TIME
File Edit View Layout Model Options Windows Help
Current
Doc
Runs
Equations: 작성된 시뮬레이션 모델에 수식을 입력한다.
Delete: 변수와 연결선을 삭제한다.
Sketch Comment: 루프의 극성 표시를 생성한다.
Shadow Variable: 그림자 변수를 생성한다.
Rate: 유량변수를 표현한다.
Arrow: 연결선을 생성한다.
Box Variable: 저량 변수를 생성한다.
Variable: 변수를 생성한다.
Move/Size: 변수와 연결선을 이동하거나 크기를 조절한다.
Lock: 작성된 인과지도를 잠금 상태로 만든다. 잠금 상태에서는 인과지도의 변수와 연결선을 이동할 수 없다.
Times New Roman 12

❖ 변수입력

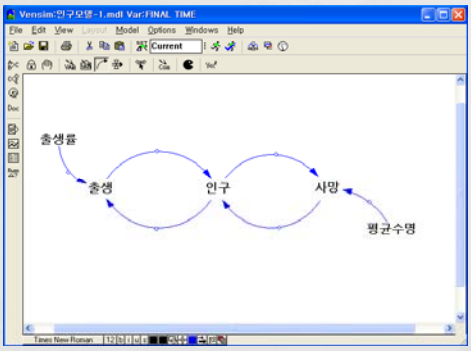
변수의 입력은 Variable 변수를 한번 클릭한 후 작업창에서 변수를 그릴 위치를 정하여 다시 한번 클릭하면 변수 입력 창이 나타난다. 변수 입력창에 변수명 "인구" 를 입력하고 엔터를 치면 작업창에 "인구" 변수가 입력된다. 반복하여 출생, 사망, 출생률, 평균 수명을 입력한다.



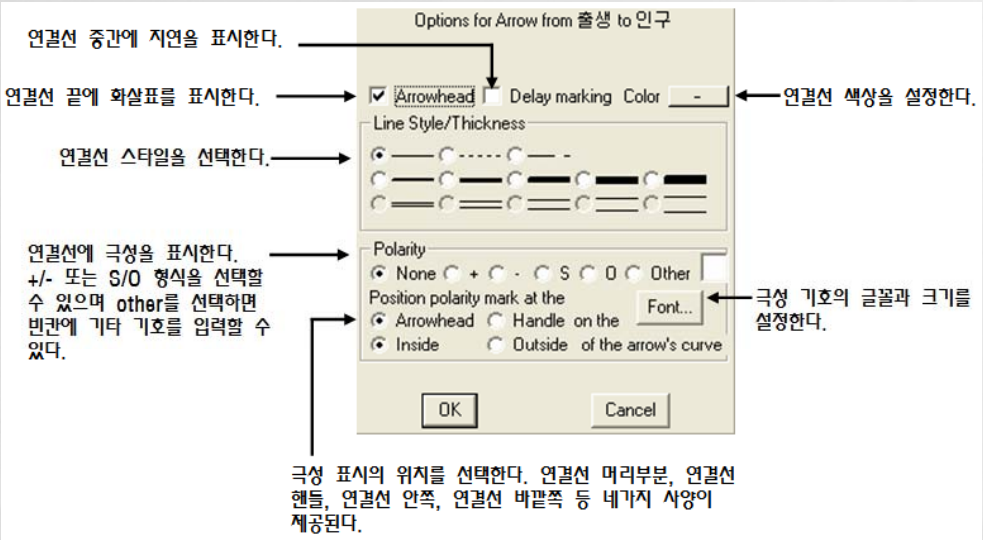
❖ 변수 연결

변수와 변수를 연결선을 연결한다. 연결선을 그리기 위하여 먼저 연결선 도구 버튼을 클릭한 후 영향을 주는 변수를 먼저 클릭한다. 그러면 선택된 변수에서 출발하는 연결선이 나타나며 마우스를 드래그하여 연결할 방향을 정할 수 있는 상태가 된다

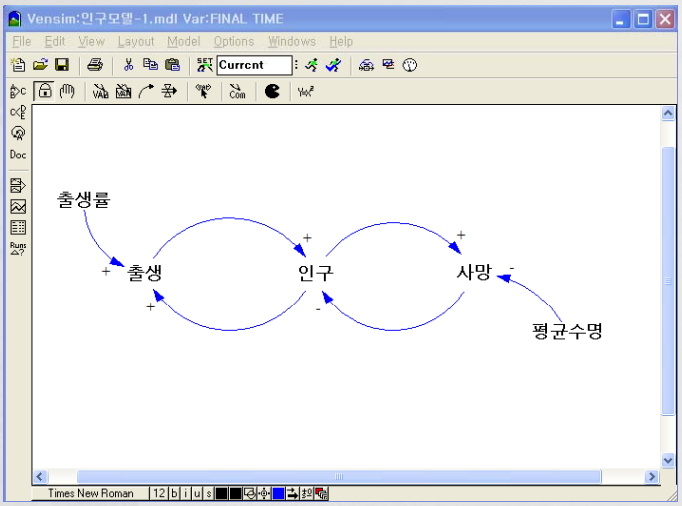
이 상태에서 영향을 받는 변수 쪽으로 연결선을 연결하기 위해서 두 변수 사이 한 지점을 클릭한 후 최종적으로 영향을 받는 변수를 다시 한번 클릭하여야 한다. 연결선을 이으면 중간에 동그랗게 생긴 핸들(Handle)이 나타나며 여기에 커서를 두고 마우스의 왼쪽 버튼을 누른 상태에서 드래그하면 연결선의 모양을 조절할 있다. 연결선 중간의 매듭은 *Esc* 버튼을 누르면 사라지며 *Arrow* 도구나 *Move/Size* 도구를 선택하면 다시 나타난다. 반복하여 출생, 사망, 출생률, 평균 수명 변수에 연결선을 입력한다.



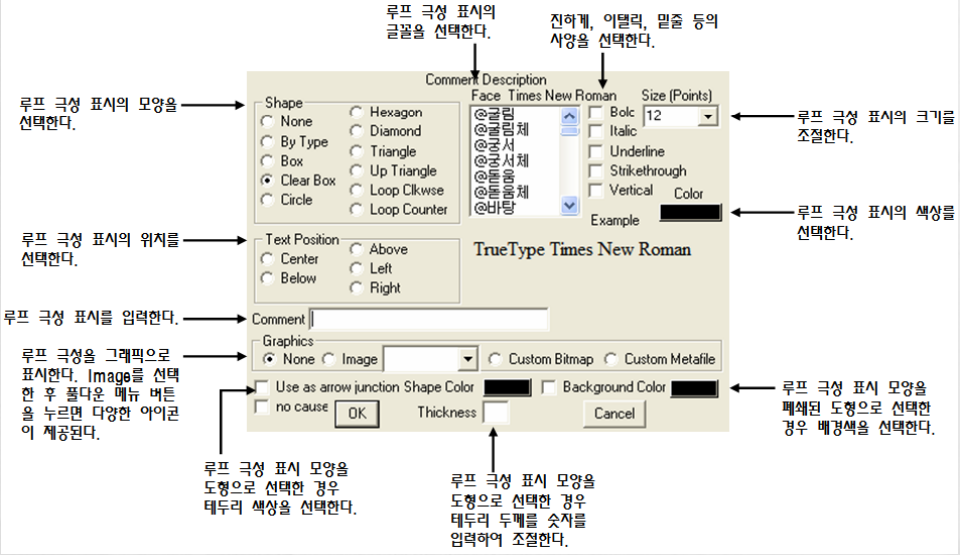
❖ 연결선 대화상자



연결된 두 변수의 인과관계에 따라 극성을 표시한다. 극성표시는 앞서 설명한 대화상자를 열어 조작한다,



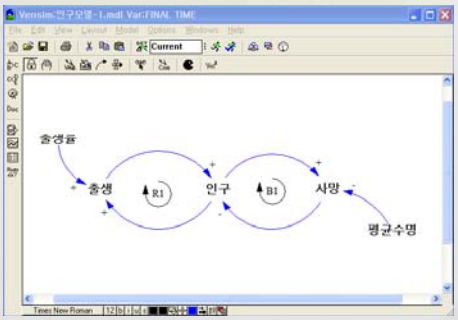
❖ 스케치 대화상자



변수들의 연결로 만들어진 두 개의 루프에 극성을 표시한다. 루프의 극성을 표시하는 기능은 *sketch comment* 도구에서 지원한다. *sketch comment*를 클릭하여 선택한 후 루프 극성을 표시하고자 하는 위치에서 다시 한번 클릭한다.

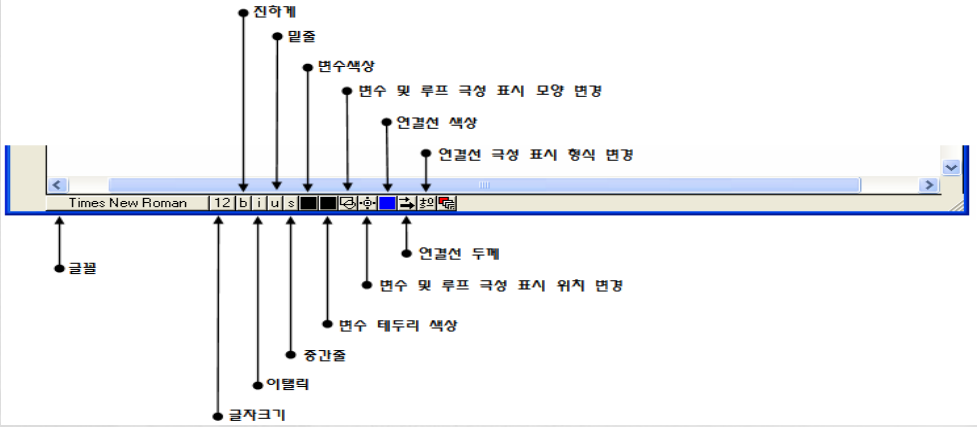
먼저 *comment* 입력창에 +/- 또는 R/B를 입력한다. 다른 표시방법을 사용하여도 무방하나 예제에서와 같이 양의 피드백 루프에는 R1, 음의 피드백 루프에는 B1을 입력하여 보자.

그 다음 루프 극성 표시 모양을 *Loop Clkwse*로, 위치를 *center*로 선택한다. *Loop Clkwse*을 선택하면 시계방향으로 도는 모양의 원형 화살표가 루프 극성과 함께 나타나며 *Loop Counter*를 선택하면 시계 반대방향으로 도는 모양의 원형 화살표가 루프 극성과 함께 나타난다. 원형 화살표의 방향은 연결선의 순환 방향을 의미하는 것이므로 연결선의 순환 방향과 일치시킨다.



❖ 인과지도 편집 및 수정

완성된 인과지도는 작업창 하단에 보이는 편집도구들을 이용하여 편집 및 수정이 가능하다.
인과지도 편집은 전체 변수 및 연결선을 선택하여 할 수도 있고 개별 변수 및 연결선을 선택하여 개별적으로 상이한 편집 사양을 적용시킬 수 도 있다.



❖ 인과지도 작성 10계명

1. 연구 대상을 모델링 하지 말고 대상이 지닌 문제를 모델링 하라. 우리가 해결하고자 하는 것은 결국 연구 대상이 지닌 문제이다. 이를 위해서는 대상이 지닌 문제에 대한 깊은 이해가 선행되어야 하며 현업 종사자와의 인터뷰는 문제를 이해하는 좋은 방법이 될 수 있다.

2. 인과지도의 변수들을 증가하거나 감소하는, 성장하거나 쇠퇴하는, 오르거나 내리는 등의 수치적인 값을 가진 변수로 생각하라. 변수가 증가한다거나 감소한다는 말의 의미를 분명히 하는 것이 중요하다.

3. 인과지도를 작성할 때 변수의 이름으로 동사를 사용하지 말고 명사를 사용하라. 가능한 한 변수들은 긍정적인 방향으로 설정하는 것이 바람직하다.

4. 인과지도의 변수에 대해서 가능한 한 그 측정 단위를 밝혀라. 심리적인 변수에 관해서는 작성자가 '스트레스 단위' 나 '입력 단위' 와 같이 새로운 단위를 창안해 낼 수 도 있다.

5. 만약 연결고리에 대해서 부차적인 설명을 해야 한다면, 그 연결고리를 두 개로 쪼개 보아라. 중요 루프를 중심으로 쪼개어 만들어 보자.

6. 지나친 단순화나 복잡한 모델은 설득력을 떨어뜨릴 수 있다. 적정한 수준의 상세함을 지닌 모델 개발이 중요하다. 의사소통을 위하여 루프별로 적정한 이름을 부여하는 것이 좋다. '강화루프 (1)', '균형루프 (2)'와 같은 형식을 이용하는 것이 복잡한 모델을 단순하게 설명할 수 있는 한 방법이 될 수 있다.

7. 개방된 연결 관계를 피드백 루프로 해석하는 것을 조심하라. 순환 구조를 가지지 않은 연결 관계는 피드백 루프가 아니라 개방된 루프이다.

8. 모델 안에 중요한 지연을 표시하라. 지연은 시스템의 성질을 설명하기 위해 중요한 정보가 될 수 있다. 지연은 중요한 정책 포인트로 작용될 수 있으며 정책 지렛대가 작용되어질 필요가 있는 중요한 병목일 가능성이 높다.

9. 음의 피드백 루프를 설계할 경우 목표를 명확히 제시하라. 목표가 명확히 표현되어질 때 모델의 구조가 보다 명확해 지고 설명도 쉬워진다.

10. 수정 또 수정하라. 최초로 작성된 인과지도는 분명 많은 부분이 간과되어졌을 가능성이 높다. 좀 더 설명력 있는 모델이 될 수 있도록 반복적인 개선 작업이 필요하다.

인과지도 원형(Archetype)을 활용한 시스템 분석

연승준
(한국전자통신연구원, sjyeon@etri.re.kr)

2011년 2월 9일 (수)

1. 인과지도 원형의 개요

- 인과지도는 정답이 없다?
  - 시스템 다이내믹스는 시스템 요소들간의 상호의존성을 설명해 주기때문에 어떤 질문에 대해 유일한 정답이란 없다.
- 인과지도의 원형은 유용한 도구?
  - 가장 보편적으로 나타나는 행동들의 유형
  - 우리의 사고 속에 있는 격차를 줄이고 더 완전한 이야기들을 서술하는데 도움
  - 피드백의 순환 관계들을 통해 우리가 사는 세상의 상호 연계성을 가시적으로 전달
  - 일관된 가설들을 보다 빨리 설정하도록 도와주는 도구
  - 유사성을 바탕으로 사고의 틀을 제시
- 인과지도 원형의 단점?
  - 정형화된 틀로 간주한 나머지 틀에 끼워 맞추려는 것으로 전락하는 것이 가장 큰 위험

2-1. Fixes that fail

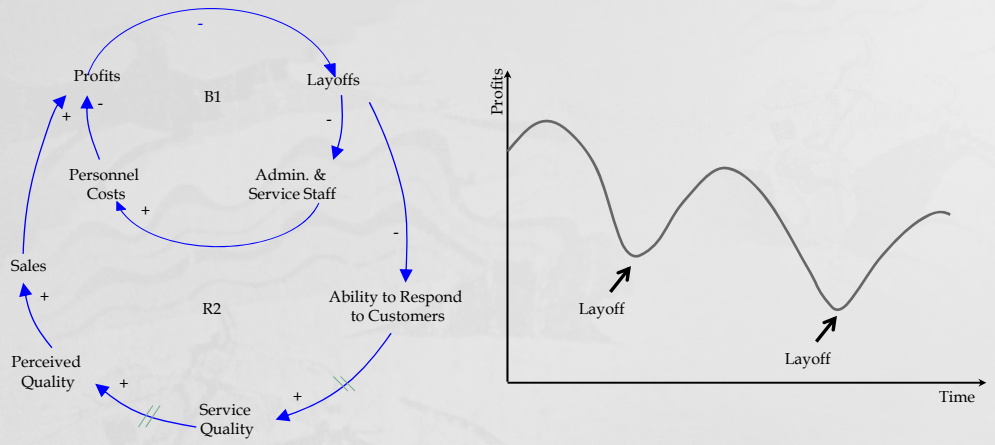
Future Tech 사례

- 특화된 틈새시장을 가진 하이테크 회사로 재정적 압박이 발생해 수익이 떨어지고, 순이익 역시 감소.
- 회사 경영진은 근로자 해고를 통한 생산 원가 감소가 재정적으로 도움이 될 것이라는 결론에 도달
- 서비스와 경영지원파트 사원의 감소는 초과한 인건비를 줄일 수 있을 것이며 이는 이익으로 전환될 것이라고 생각
- 해고를 시작한 첫 번째 분기에서는 비용 감소로 인해 이익이 증가하였으나 다음 분기의 이익은 또 다른 문제에 직면
- 최고경영진은 추가로 다른 직원들의 해고를 지시
- Future Tech는 그 결과로 잠시 이익이 상승하였으나 다시 이윤 감소 현상에 직면

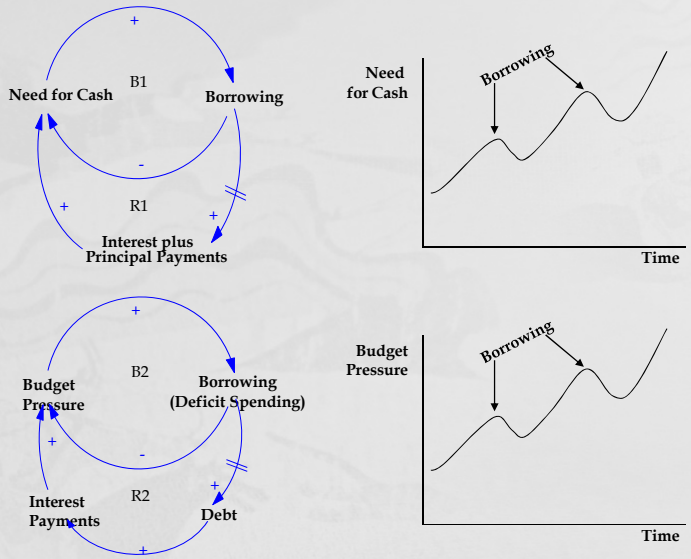
경영진의 조사 착수

- 소수의 서비스 및 경영지원 직원들로 인해 고객들의 요구와 비용징수, 그리고 그 밖의 업무 수행이 매우 느려지고 있음을 확인
- 결과적으로 서비스의 질이 감소하였고 이와 함께 회사 제품의 품질에 대한 소비자의 전반적인 인식 역시 감소
- 결국 판매와 수익이 감소

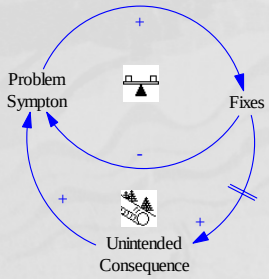
2-2. Fixes that fail



2-3. Fixes that fail



2-4. Fixes that fail



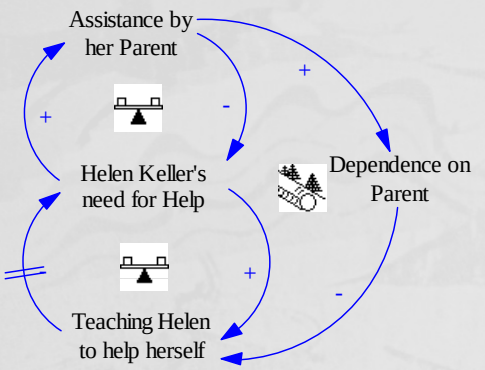
- **Fixes that fail**
  - 문제가 발생하면 이를 즉각 해결하려는 처방을 시행하게 되고 그 결과 단기적으로 문제는 완화된다(B1).
  - 그러나 장기적으로는 그 처방이 예상치 못한 결과를 낳으면서 문제의 증상을 악화시킨다(R2).
  - 문제에 대한 즉각적인 해결책을 실시했을 때 문제가 해결될 것 같지만, 시간이 지나면 문제가 원상태로 다시 일어나거나 보다 더 심각해지는 것이 미봉책 원형의 특징.

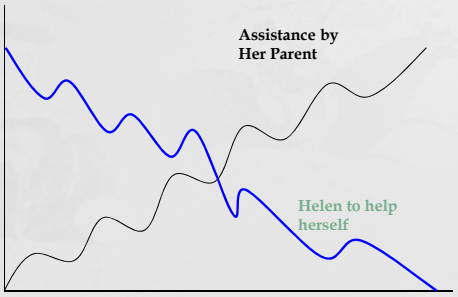
3-1. Shifting the burden

핼렌켈러 사례

- 헬렌켈러와 부모, 그리고 설리번 선생님과의 관계를 인과지도 측면에서 고려.
- 헬렌켈러가 장애를 극복하기까지는 많은 시간과 노력이 필요.
- 그렇다고 부모가 모든 것을 도와준다면 결국 헬렌켈러는 이에 익숙해져 스스로 행동하여 장애를 극복하려는 노력을 하지 않을 것.
- 설리번 선생님은 모든 것을 대신해주던 부모와 달리, 서툴더라도 헬렌켈러가 모든 일을 스스로 하게끔 가르쳐 줌
- 손바닥에 글자를 써가면서 글씨를 알게 하고, 직접 사물을 만지게 함으로써 감각을 익히고 경험하게 함
- 헬렌켈러는 장애를 극복한 위대한 사람으로 성장

3-2. Shifting the burden



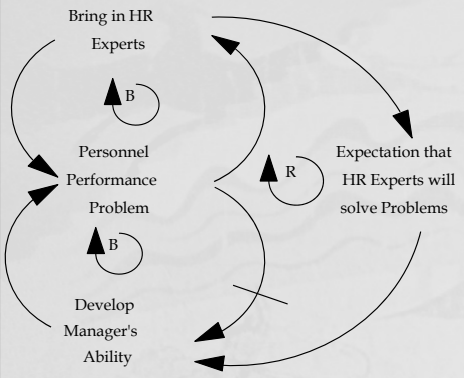


3-3. Shifting the burden

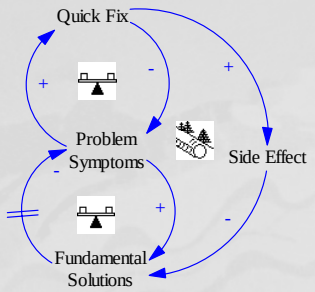
아웃소싱 사례

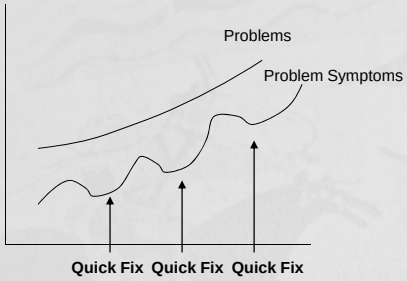
- A 회사에서 인적자원관리 문제가 다수 발생하는 사례를 인과지도 측면에서 고려.
- 인적자원관리문제를 외부 전문가를 통해 해결하고자 함
- 외부의 전문가에 의존하여 문제를 해결하는 경우는 결국 심각한 결과를 초래.
- 외부 전문가에 의존에 문제를 해결할 경우 내부 조직원들이 문제에 대처하려고 하지 않기 때문에 내부 조직원들이 문제에 대처할 수 있는 능력을 상실.
- 반복적으로 문제는 발생하고 조직원의 능력은 상실되며, 외부에만 의존하게 되는 악순환이 발생

3-4. Shifting the burden



3-5. Shifting the burden





Shifting the burden

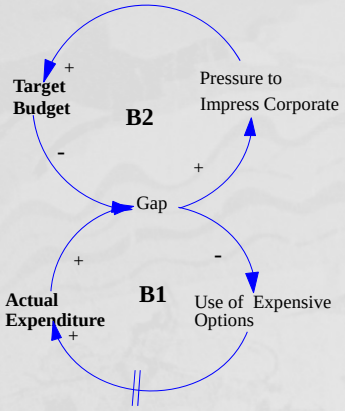
- 단기적 처방으로 문제를 해결했을 경우 이에 익숙해져 의존하게 되고 근본적 해결 방안은 뒤로 밀리게 되어 시간이 지남에 따라 근본적인 문제 해결 능력을 상실
- 또한 계속적인 단기 처방은 Side Effect(부작용)을 야기시켜 근본적인 해결 방안이 어려워져 더욱 심각한 문제를 야기.
- 시험을 앞두고 벼락치기로 단기간에 마스터할 수 있는 과목만 집중적으로 공부한 뒤 영어나 수학 같이 장기간 공부해야 하는 과목의 시험을 포기하는 경우, 이에 익숙해지면 점점 더 수학이나 영어에 대한 능력이 사라지게 되고 이를 만회할 수 없어 전체적인 성적이 떨어지게 되는 사례

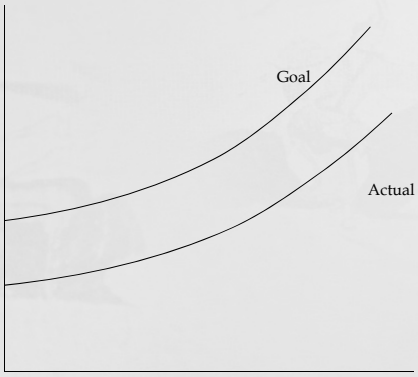
4-1. Drifting Goals

Nature unlimited 사례

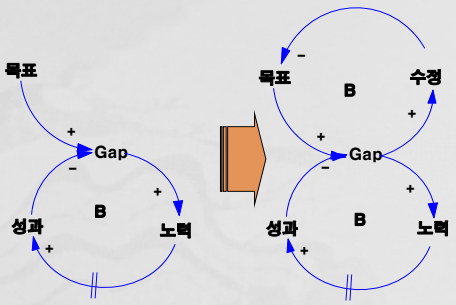
- 제작자인 마리아, 생산부서 관리자인 프랑코, 설비 관계자인 록산느는 마라톤 회의 끝에 예산과 진행일정을 확정.
- 새 시리즈 물 제작과정에서 사전에 마련된 점검사항들을 잘만 지킨다면 제작 비용과 진행이 계획대로 이루어질 것이며 경영진의 자금 제공 협조를 얻어냈기 때문에 모든 것이 순조로울 것으로 생각.
- 마리아는 좋은 각본이 제작을 원활하게 할 것이란 생각에서 프랑코에게 유능한 작가를 물색할 것을 지시.
- 마리아는 아름다운 장소와 적절한 해설가를 찾는데 온 집중. 회사는 마리아가 선정한 장소의 스틸사진과 캐스팅 테이프에 흡족.
- 마리아는 촬영지 물색, 제작 시설과 내레이션 장비 조달, 스텝진의 급여 및 숙식 등 그 과정 속에서 소요되는 경비는 상당히 소요될 것이 뻔했지만 마리아와 프랑코는 회사가 원하는 작품을 만들기 위해서는 불가피하다는 결론.
- 회사는 편집되지 않은 필름에도 아주 흡족해 했으며 초기 자막과 장면 전환 시의 매우 매끈한 효과에 관심을 보이는 등 작품 성과에 만족감을 표시.
- 그러나 6주가 지난 어느 날, 록산느는 영수증더미와 구매부서에서 출력된 문서들을 가리키며 한탄. “도대체 영화를 어떻게 만들었길래 예산을 턱 없이 초과했는가? 이 한 필름때문에 우리는 파산하게 생겼다!”

4-2. Drifting Goals





4-3. Drifting Goals



Gap between desired performance and current reality can be resolved either by taking corrective action to achieve the goal or by lowering the goal

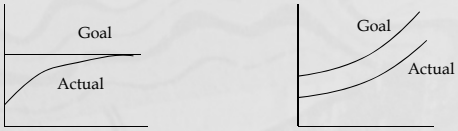
The gap is often resolved by lowering the goal. Over time, the performance level also drifts downward. This drift may happen very gradually, even without deliberate action, so that the organization is not even aware of its impact.

Boiled Frog Syndrome : it describes a scenario in which performance or expectation degrade imperceptibly over a long period of time.

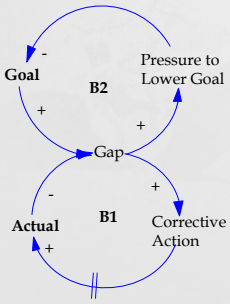
4-4. Drifting Goals

The lower goal loop (B2) is dominant

The corrective action loop (B1) is dominant



Dominance can shift back and forth between the two

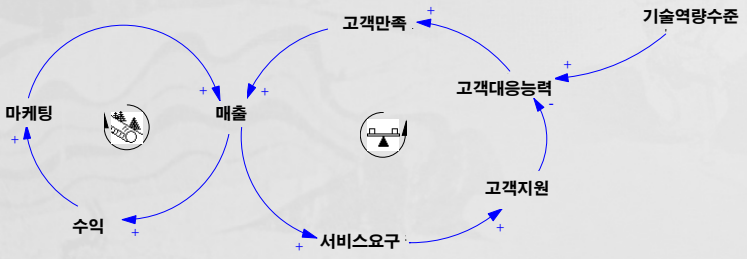


5-1. Limits to Growth

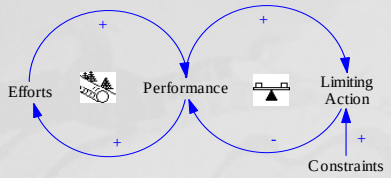
레이저 프린터 생산 업체인 OCP 사례

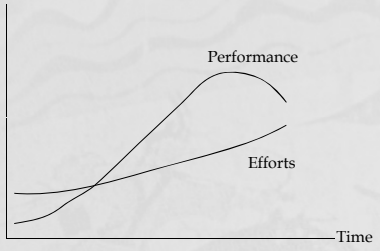
- 현재의 성장 전략에 대해 논의 중에 운영 책임자는 마케팅 부서에서 제출된 새로운 마케팅 캠페인 전략을 시험해 볼 필요가 있다고 제안.
- 경영진에서는 마케팅에 지속적으로 집중을 하는 것이 좋은 결과를 나타낼 것이라고 믿음
- 마케팅 강화와 새로운 프로그램을 시도하는데 투자하는 것은 얼마간의 소득을 증가시킬 것이므로 판매와 마케팅 담당자는 소비자 기반의 판매가 증가하는 것에 대한 전망에 거의 만족.
- 그러나 전략회의 중 기술지원 매니저가 질문이 그들을 자극.
- 전 지역에서 기술 지원이 요구될 경우에는 어떻게 하실 것입니까? 우리는 그 경우 침몰되지 않을까요?
- "사람들이 가장 빨리 등을 돌릴 때는 적시에 그들을 돕지 못했을 경우입니다. 그들은 해당 지역에 있는 일반 레이저 프린터 서비스 가게에 가게 될 것이고 우리 회사는 잊을 것입니다. 그 후에는 그들이 다음부터 프린터를 살 경우 다른 회사의 제품을 사겠지요."

5-2. Limits to Growth



5-3. Limits to Growth





성장의 한계(Limits to Success)

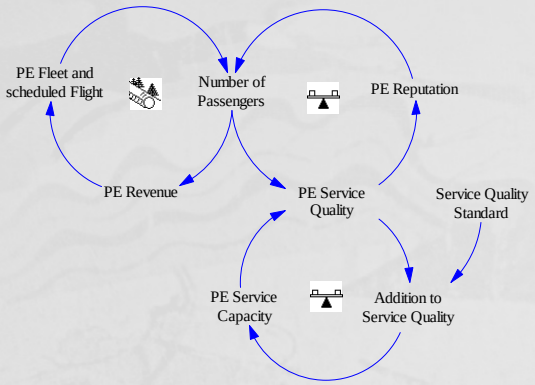
- 시스템에서는 일반적으로 지속적인 성장이 불가능하게 하는 피드백 구조가 존재.
- 성장하고자 하는 행위가 성공에 이르게 하고(왼쪽 강화루프에 의한 성장), 성장은 서서히 멈추게 됨(오른쪽의 자기억제루프에 의한 균형)
- 억제되는 원인에는 여러 가지가 있으나 자원의 제약이 대표적이며, 성장으로 인해 다른 부문에서 손해가 발생하는 경우도 존재

6-1. Growth and Underinvestment

People Express의 사례

- 미국의 유명한 저가항공사인 People Express는 원가절감을 통해 타 항공사보다 저렴한 가격에 항공편을 제공
- 고객 증가로 수익이 증가해 People Express는 성장가도를 달림
- 더 많은 고객 유치를 위해 '보잉 747'과 같은 새로운 여객기를 사들이고, 비행노선도 늘림
- 그러나 새로운 직원고용이나 초과 근무 수당 등에 투자할 여력이 부족해지면서 직원의 이탈이 발생
- 직원 이탈과 더불어 고객서비스의 질이 급격히 감소함에 따라 평판이 나빠져 People Express의 수요는 곤두박질 침
- 결국, 파산하여 텍사스항공사에 회사를 매각

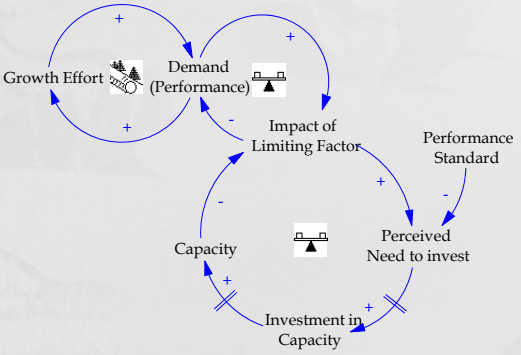
6-2. Growth and Underinvestment



6-3. Growth and Underinvestment

성장과 투자부족(Growth and Underinvestment)

- 시스템내의 지속적 성장을 불가능하게 하는 제약적 조건을 해결하기 위한 투자가 필요
- 성장하고자 하는 행위가 수요를 증가하게 하지만(왼쪽 강화루프에 의한 성장), 제약조건으로 인해 한계에 도달하게 되어 (오른쪽의 자기억제루프에 의한 균형) 이를 해결하기 위한 투자가 요구됨
- 제약조건을 해소시키는 데는 어느 정도의 시간이 소요
- 사전에 이루어지지 않으면 성장의 쇠퇴로 인해 개선여력이 악화되고 나중에는 개선할 여력이 더 없어질 수 있다는 점을 명심해야 함

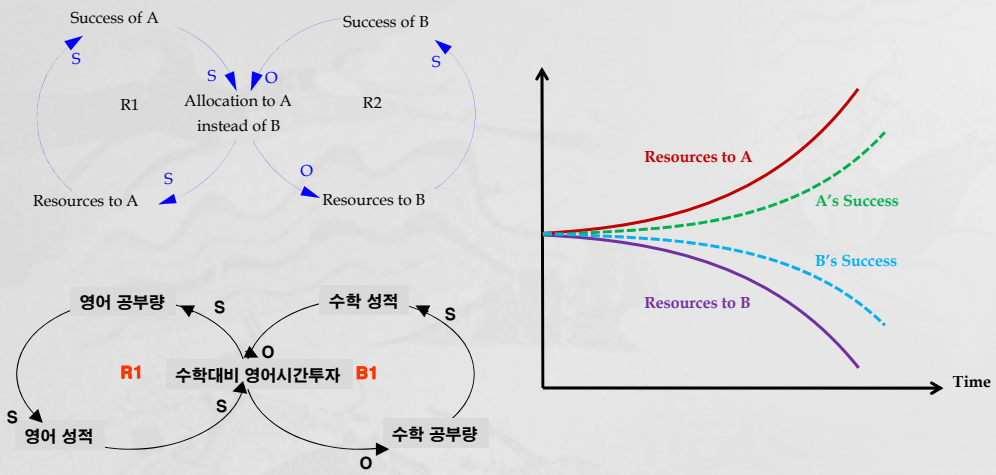


7-1. Success to the Successful

신입사원 알렉스와 테리의 사례

- 크리스(Chris)는 상호신용금고 회사인 "MutualLife" 의 부장이다. 최근 크리스는 무한한 잠재력을 지닌 알렉스(Alex)와 테리(Terry)를 신임 인턴쉽 사원으로 뽑는 것을 결재
- 크리스는 곧장 두 인턴사원들을 프로젝트에 직접적으로 참여시켰고, 두 인턴사원은 적극적으로 프로젝트에 참여했으나, 2주째에 접어들었을때 테리는 장염성 감기에 걸렸고 그 주 내내 병원 신세.
- 그러는 동안 알렉스가 프로젝트를 독자적으로 운용했고, 크리스는 그런 알렉스를 온 힘을 다해 지도.
- 병에서 회복된 테리는 재교육을 통해 다시 업무에 투입되었지만, 알렉스는 이미 또 다른 프로젝트에 투입.
- 크리스는 병상에서 돌아온 테리를 환영했으며, 그를 교육하는데 많은 시간을 투자. 그러면서, 알렉스에게도 많은 지도를 했으며 그의 능력이 일취월장 성장하는 것을 지켜보며 흐뭇.
- 시간이 지날수록 크리스는 테리보다는 알렉스를 지도하는 시간이 더 길어졌으며, 알렉스보다 업무능력이 점차 떨어지는 테리를 알렉스와 비교해가며 그의 업무능력에 불만족.
- 결국 인턴쉽 기간이 끝나갈때쯤 크리스는 정규직 충원의 자리를 알렉스에게만 제공할 것으로 결정.
- 크리스의 최종 결정이 옳았을까?

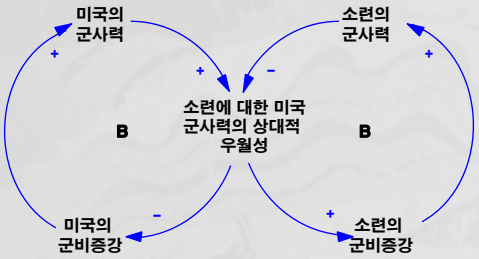
7-2. Success to the Successful

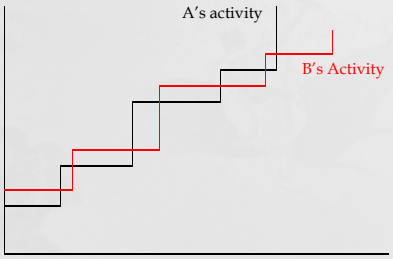


8-1. Escalation

- 냉전시대의 무기경쟁 사례
  - 20세기 중반부터 미국과 소련은 오랫동안 냉전체제를 유지
  - 양국은 상대방을 위협할 수 있는 무기 개발 경쟁
  - 미국의 군사력이 소련에 비해 열등하다고 생각되면 미국은 무기개발에 박차를 가하고,
  - 그 결과 미국의 무기비축은 급격히 증대
  - 그에 대응하여 소련이 군비 증강에 나섬으로써 상대적 우위를 만회하고자 경쟁
  - 이러한 군비 경쟁은 끝없이 진행되었고 결국 소련은 그 부담으로 붕괴.

8-2. Escalation



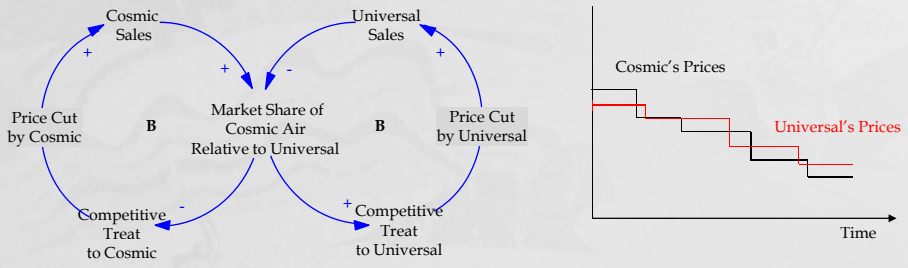


8-3. Escalation

Cosmic 항공사 사례

- Cosmic 항공사가 고객을 더 끌어오기 위해 요금을 인하
- 경쟁사인 Universal 항공사도 요금을 인하
- Cosmic 항공사가 "two for the price of one" 이라는 special 프로모션 실시
- 가격전쟁을 하게 되면 단기적으로 고객은 싼가격에 비행기를 타고 항공사는 수익이 생겨서 좋지만
- 장기적으로 볼 때 회사입장에서는 장비, 인력, 유지보수, 교육 등에 투자한 것에 대한 수익이 생기지 않고
- 고객입장에서는 비용절감으로 항공사의 서비스 질이 저하되어 불편을 겪게 되므로 모든 이해관계자가 손해

8-2. Escalation



인과지도 작성의 다양한 방법과 인지지도 분석

김동환
(중앙대, sddhkim@cau.ac.kr)

2011년 2월 9일 (수)

1. 인과지도 작성의 다양한 방법

인과지도를 작성하는데에는 다양한 접근방법이 있다.

1) 전통적인 방법: 문제 => 변수 추출 => 피드백 발견 => 인과지도 구축

2) 저량과 유량을 활용한 인과지도 구축: 저량과 유량의 발견 => 저량과 유량을 연결하여 피드백 루프 발견

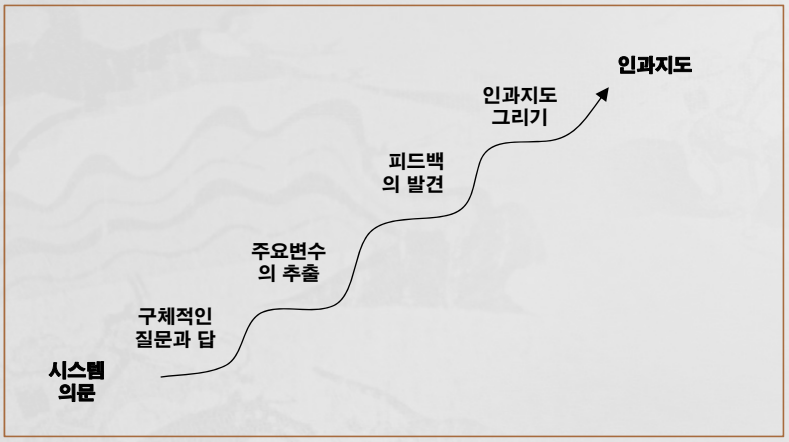
3) 피드백 루프의 원형을 활용하는 방법: 시스템의 행태 => 시스템의 원형적 구조로써의 피드백 루프

4) 의사결정 지점을 활용하는 방법: 의사결정 지점의 발견 => 정보의 흐름에 따른 피드백 루프

5) 인지지도 구축의 방법: 어록 분석 => 인지지도 구축 => 피드백 루프 발견

2. 인과지도 작성의 전통적인 절차

인과지도는 다음과 같은 단계에 따라서 구축된다.



3. 인과지도 작성을 위한 준비: 구체적인 질문과 답

전염병은 왜 확산될까?

↓

전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나기 때문에…

↓

그러면 전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나는 횟수는 무엇이 결정하는가?

↓

전염병에 걸린 사람이 많을수록…..

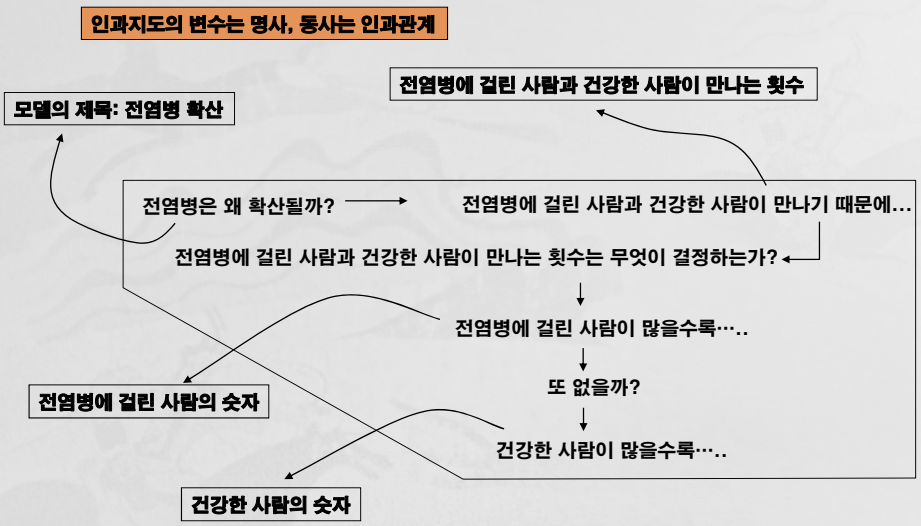
↓

또 없을까?

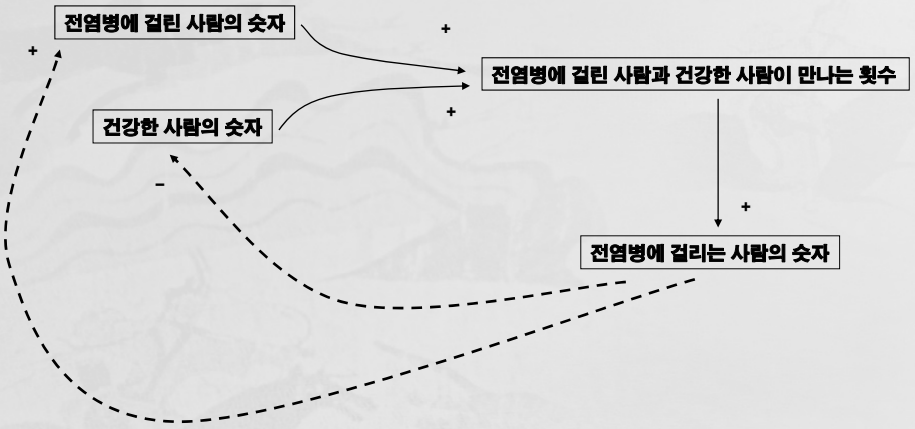
↓

건강한 사람이 많을수록…..

4. 인과지도의 구체화: 주요 변수의 추출



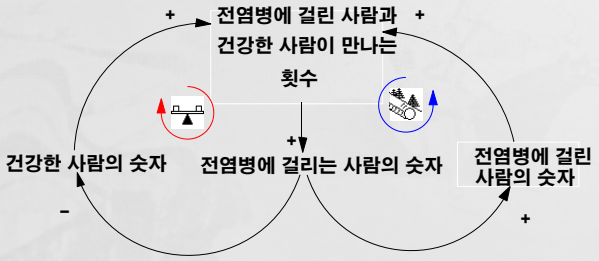
5. 인과지도의 핵심: 피드백의 발견



6. 인과지도의 작성: Vensim에서 그리기

1. File메뉴에서 New Model을 누른다.
2. 시뮬레이션 시간설정에 관한 질문 박스가 나오면 그냥 OK를 누른다.
   (인과지도는 시뮬레이션 할 것이 아니다. 그런데 Cancel을 누르면 하단의 아이콘들이 사라진다.)
3. 이제 앞서 그린 인과지도를 다음과 같이 그려서 피드백 루프가 명확하게 드러나도록 해 보자.

1) 보조변수,상수 아이콘 선택
   => 변수 입력
2) 화살표 아이콘 선택
   => 원인 변수 위에서 마우스 왼쪽 버튼 클릭
   => 중간에 적당한 위치에서 한번 더 클릭
   => 결과 변수 위에서 마지막으로 클릭
3) 설명첨가 아이콘 선택
   => 원의 가운데에서 클릭
   => 적당히 선택



질문 & 답

1. 어떻게 변수이름을 여러 줄에 쓰는가? → 변수이름 위에서 마우스 오른쪽 버튼 누름, Shape에서 clear box 선택, OK, 이름 오른쪽 하단의 동그라미로 크기 조절

2. 화살표 끝에 어떻게 +, - 기호를 붙이는가? → 화살표의 중간 동그라미에서 마우스 오른쪽 버튼 누름, polarity에서 + 또는 - 선택.

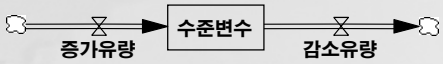
7. 저량과 유량을 활용한 인과지도

실제 세계
- 저량(Stock): 축적되는 변수
- 유량(Flow): 흘러 다니는 변수

→ 사진을 찍어서 선명하게 보이면 저량, 흐릿하거나 안보이면 유량

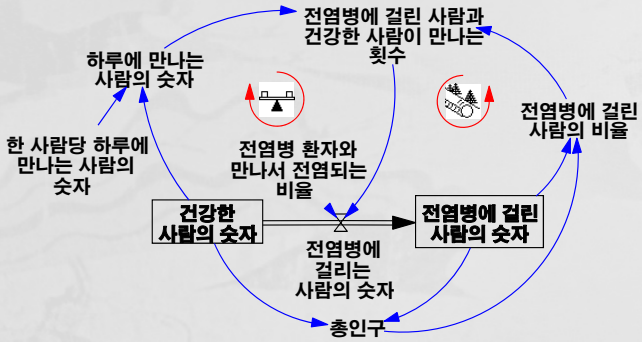
장점
- 구체적인 실제 세계에 먼저 초점을 둠으로써, 인과지도를 보다 명료하게 구성해 나갈 수 있음.
- 시스템 다이내믹스 모델링과 직접 연결될 수 있음.

8. 저량을 중심으로 하는 증가유량과 감소유량



증가 유량 (변화율변수)	저 량 (수준변수)	감소 유량 (변화율변수)
빗물의 양	강물 수위	흘러 나가는 양
출생	인구	사망
생산율	재고	출하율
주문	주문재고	판매
적금과 이자율	은행 잔고	출금
채용	종업원 수	해고
학습	지식	망각
건축	빌딩	파괴
매연배출	공해수준	정화

9. 전염병 확산의 사례



10. 시스템 원형을 활용한 인과지도 작성: 기본형

시스템이 안정적이라면?
시스템이 잘 변화하지 않는다면?
시스템이 변화에 저항한다면?

→ 음의 피드백 루프

시스템이 계속해서 쇠퇴한다면?

시스템이 급격하게 성장한다면?

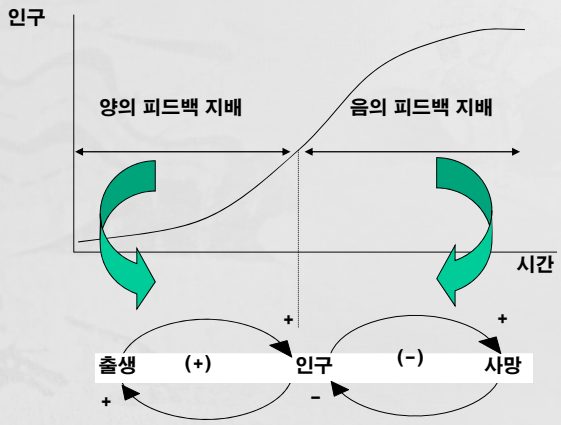
→ 선순환 또는 악순환을 가져오는 양의 피드백 루프

11. 시그모이드 성장곡선의 원형

S 커브를 그리는 시스템의 행태는 양의 피드백 루프와 음의 피드백 루프의 결합

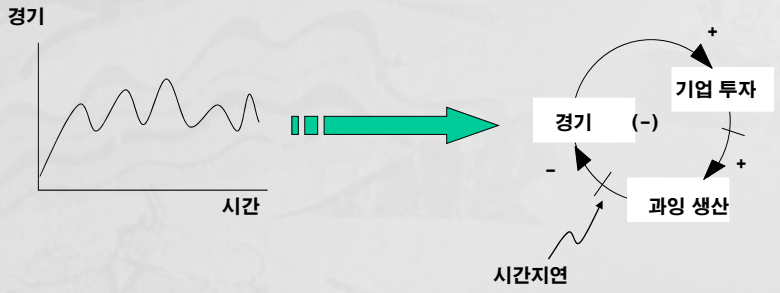
전형적인 성장 곡선

- 신체 성장
- 도시 성장
- 경제 성장
- 신기술 확산
- 성장의 제약 (자원, 토지, 시장)



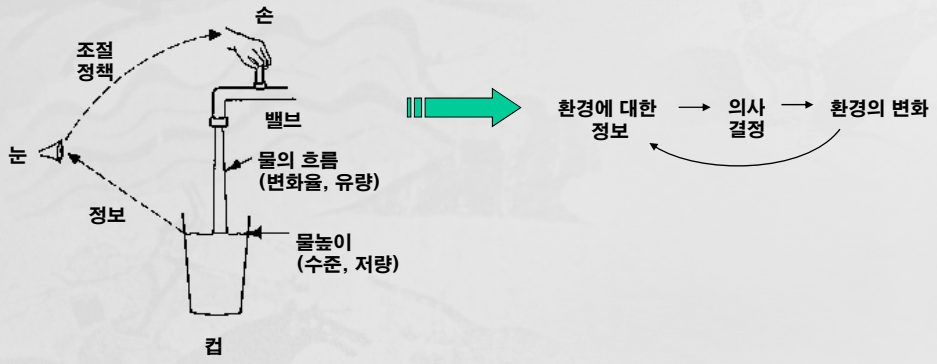
12. 시스템의 파동을 가져오는 원형

시스템이 파동을 보이면, 음의 피드백 루프에 시간지연의 개입 추론

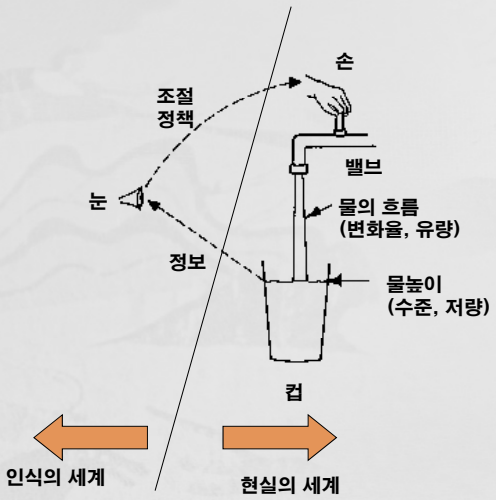


13. 의사결정 지점에 착목하여 인과지도 그리기

시스템의 기본 원리: 모든 의사결정 지점(decision point)은 피드백 루프를 형성한다.

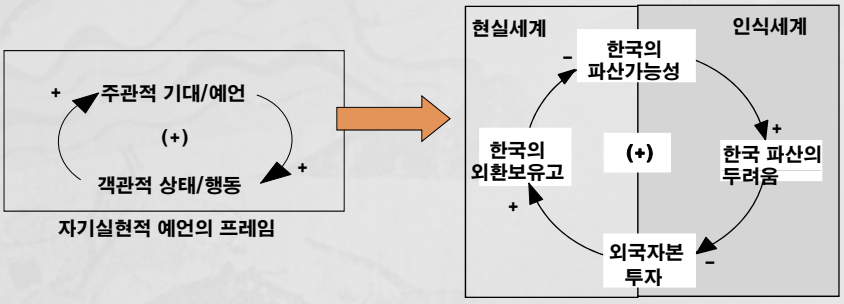


14. 현실과 인식의 연결핀: 정보



15. 자기실현적 예언

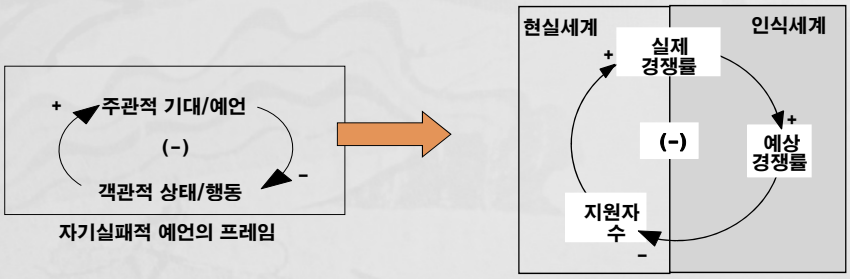
"자기실현적 예언(self-fullfilling prophecy)" 이란
시스템에 대한 예언이 스스로 또는 저절로 성취된다는 말이다.



자기실현적 예언의 프레임

16. 자기실패적 예언

"자기실패적 예언(self-failing prophecy)" 이란
시스템이 예언과는 반대로 이루어진다는 점을 의미한다.



자기실패적 예언의 프레임

17. 인지지도 분석을 통하여 인과지도를 구축하는 방법

- 기본 절차
  리더의 연설문 분석 => 인과관계의 추출 => 인지 지도(cognitive map) => 피드백 루프의 발견

- 대통령 또는 장관의 어록을 자료로 활용하기 때문에 객관성을 확보할 수 있으며,
  동시에 정치적 또는 정책적인 현실에 기초하기 때문에 현실적합성을 확보할 수 있다.

- 다만, 어록을 수집하고 분석하는데 많은 시간이 소요된다는 점
  그리고 어록 분석에 있어서 어느 정도의 주관성을 허용할 수 밖에 없다는 점을 한계로 인식할 필요가 있다.

- 기존의 인지지도 분석
  1. 2000년 김대중 대통령의 금융위기 극복에 관한 인지지도 분석
  2. 2007년 노무현 정부의 부동산 정책 및 비판에 대한 인지지도 분석
  3. 2009년 이명박 대통령의 녹색성장에 대한 인지지도 분석

18. 인지지도 구성의 예

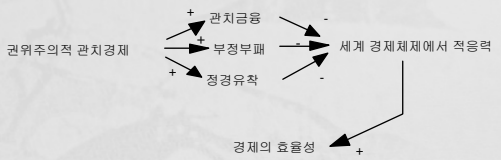
연설문

'권위주의적 官治經濟' 라고도 할 수 있는 그 동안의 성장전략은 결국 政經癒着과 官治金融으로 하여금 나라와 경제를 지배하게 했으며, 不正腐敗가 사회 곳곳에 깊게 뿌리 내릴 수 있는 토양을 제공했습니다. 이러한 과정에서 경제적으로는 경제의 質的 高度化와 國境이 없어진 세계 경제체제에 적응하지 못한 채, 한국 경제는 마침내 自身의 비효율과 비능률을 스스로 드러낼 수 밖에 없었던 것입니다. (1998년 4월 23일, 서울 경제국제회의)

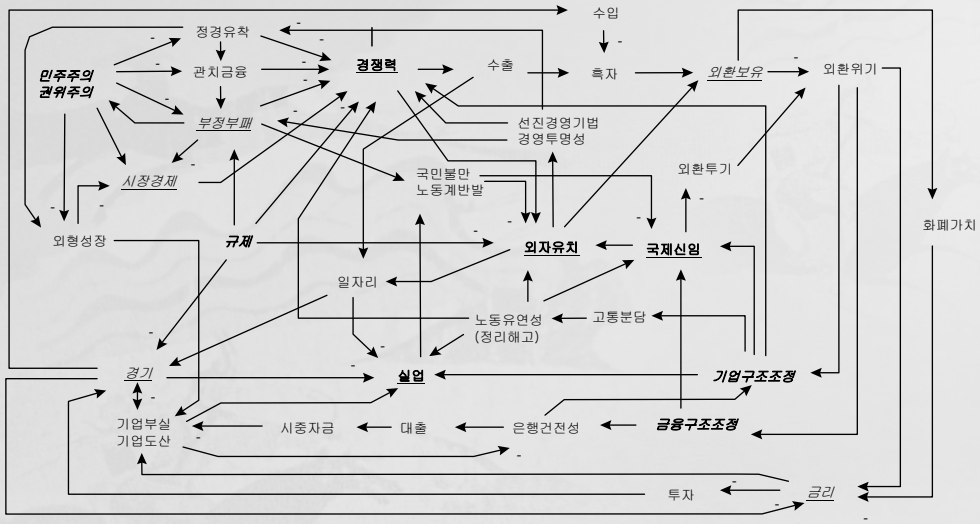
인과관계의 추출

권위주의적 관치경제 => 정경유착 (+)
권위주의적 관치경제 => 관치금융 (+)
권위주의적 관치경제 => 부정부패 (+)
정경유착, 관치금융, 부정부패 => 세계 경제체제에서의 적응력 (-)
경제의 경제체에서의 적응력 => 경제의 효율성 (+)

인과지도의 작성

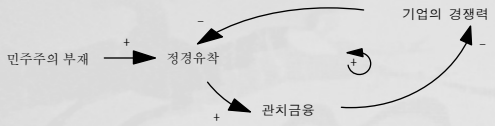


19. 김대중 대통령의 종합적 인지지도

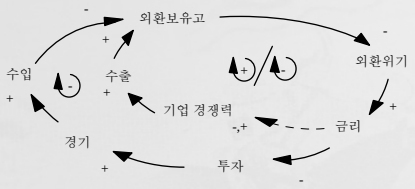


20. 김대중 대통령의 인지지도에서 발견된 주요 피드백 루프들

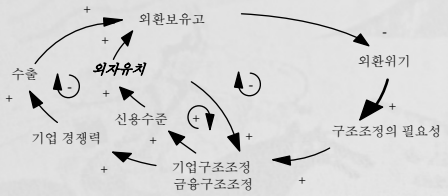
금융위기의 원인: 정경유착의 악순환



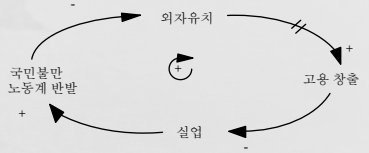
금융위기의 영향



금융위기의 극복: 구조조정과 외자유치



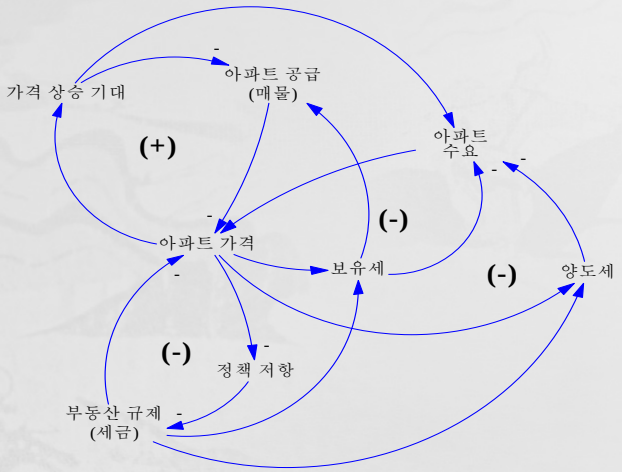
금융위기 극복의 장애: 실업의 악순환



21. 노무현 정부의 부동산 정책에 대한 인지지도 분석

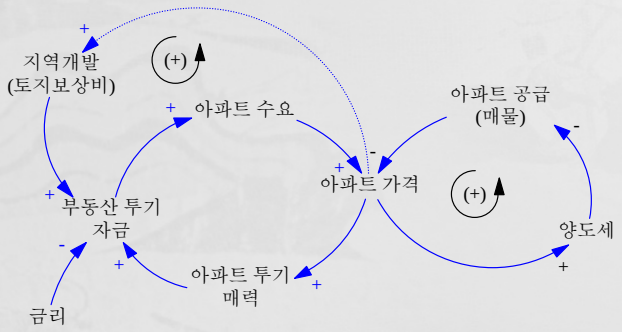
현실 문제 진단
= 투기적 수요의 악순환

정책 처방
= 보유세와 양도세를 통한
부동산 가격의 억제 가능성



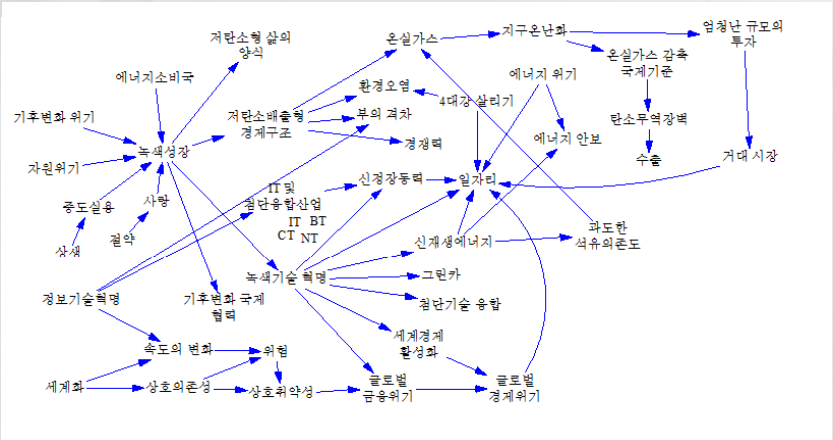
22. 노무현 정부의 정책에 대한 비판

노무현 정부의 부동산 정책에 비판적인 사설들을 분석하여 인과지도를 추출하였음.



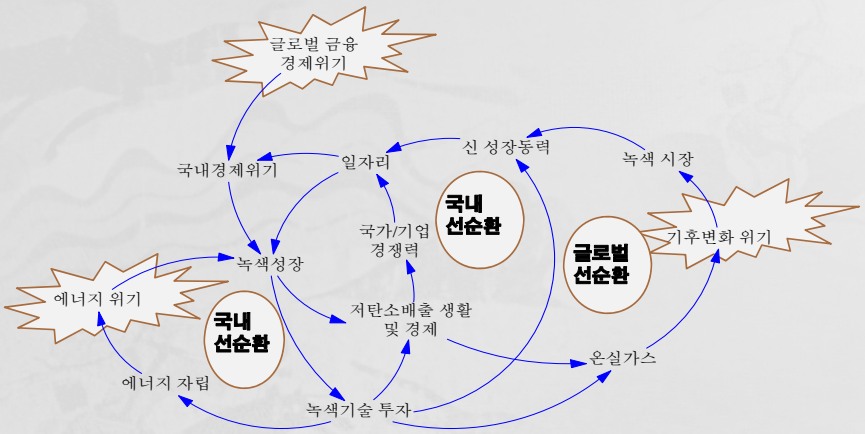
23. 이명박 대통령의 녹색성장에 관한 인지지도 분석

다중 위기 → 녹색성장 → 일자리 창출



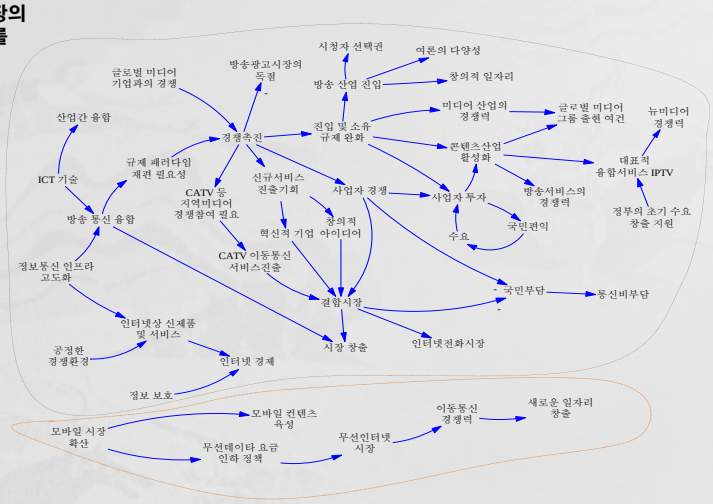
24. 이명박 대통령 인지지도의 확장

- 인지지도 + 위기와 기회의 선순환 메커니즘



25. 인지지도 분석을 통한 문제 상황의 발견

최시중 방송통신위원회 위원장의 연설문을 분석하여 인지지도를 구축한 결과 방송부문과 통신부문간의 연결지점이 존재하지 않는 상황 발견



제4강 Stock-Flow Diagram 개념 및 모델링 방법

박경배
(상지대학교, kbpark@sangji.ac.kr)

2011년 2월 10일

주) 3강 강의와의 연속성 확보와 User Guide 형태를 요하는 4강 강의자료의 특성,
자료작성의 시간한계를 감안하여 대부분 김동환 교수님의 2000년 Vensim simulation 특강자료를 차용하여
목차 및 구성, 용어의 재정의, 슬라이드 제목개선 등 세부사항을 손질하였음을 유의하여 주시기 바랍니다 - 강의자

목 차 (Contents) - 1

I. Stock-Flow Diagram의 기초 개념
1. Stock-Flow Diagram의 정의와 기본 개념
2. Stock & Flow의 사례
3. 인과지도에서 Stock-Flow Diagram까지
4. 모형 구축의 두가지 접근 방법 : Top-down & Bottom-up modeling

II. Stock-Flow Diagram의 구성
5. 구체적 SFD 구성사례 : 3강의 전염병 확산 모형(CLD)
6. Stock ? Flow ? Or, Else ?
7. 보조변수(aux), 상수(constant) 추가로 모형 구체화
8. SFD 그리기 : 보조변수, 상수를 추가해 SFD 전환!!

III. 수식입력을 통한 SFD 완성
9. SFD 수식 입력을 통한 완성 : Constants
10. SFD 수식 입력을 통한 완성 : Stock variables
11. SFD 수식 입력을 통한 완성 : Flow variables
12. SFD 수식 입력을 통한 완성 : 그외의 변수들

목 차 (Contents) - 2

IV. 완성된 SFD Simulation 및 결과 보기
13. Simulation : Time Bound & Data Set 설정
14. Simulation 결과보기 : Workbench 변수 활용
15. Simulation 결과보기 : Control Panel 활용
16. Simulation 결과보기 : Control Panel을 활용해 그래프 보기
17. Simulation 결과보기 : 시뮬레이션 결과 구분을 위한 표식
18. Simulation 결과보기 : 다양한 형태의 결과 그래프 설정과 검토
19. 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

V. 부록 – Vensim의 기본적인 함수
20. Delay 함수
21. Smooth 함수
22. Pulse 함수
23. Step 함수
24. Ramp 함수

1. Stock-Flow Diagram 정의와 기본 개념 (1)

- Stock-Flow Diagram
  : 인과지도(CLD: Causal Loop Diagram)가 구축된 뒤에는 이를 바탕으로 실제 Simulation 할 수 있는 저량-유량 흐름도(Stock-Flow Diagram)를 구축한다.

- 시스템에 존재하는 여러 변수들을 저량 변수(수준 변수, stock variable)와 유량 변수(변화율 변수, flow variables), 보조 변수(auxiliary variables)로 나누어 파악함으로써 시스템의 구조를 좀 더 명확히 파악하고, 더욱 정교한 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

- 세가지 주요 변수 타입(3 types of variables)

  1. Stock variables or, Level variables : 저량 변수 혹은, 수준 변수

  2. Flow variables or, Rate variables : 유량 변수 혹은, 변화율 변수

  3. Auxiliary variables and Constants : 보조 변수와 상수

1. Stock-Flow Diagram 정의와 기본 개념 (2)

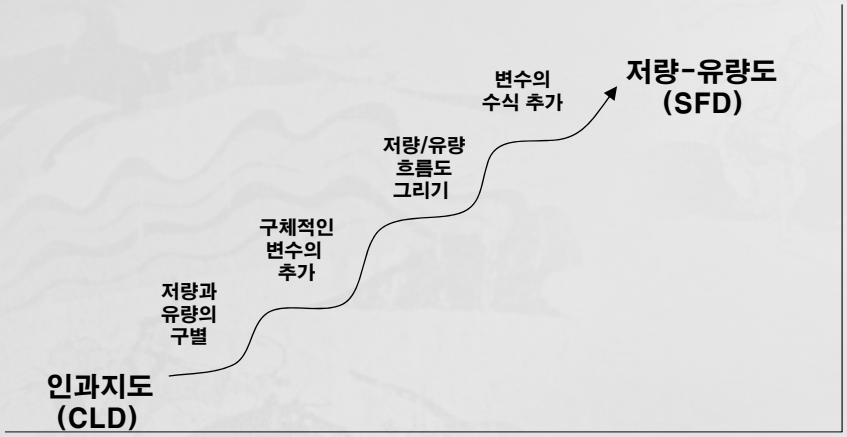
❖ 변수의 형태와 특징 ➔ 좀 더 자세히~!!

- Stock variables(수준 변수) : 축적(stock)되어 생성, 변화율변수(flow variable)에 의해 증가하거나 감소, 시스템을 특정시점에서 갑자기 멈추어도 그 값이 존재 (cross sectional snapshot이 가능~!)
- Flow variables(변화율 변수) : 수준변수(stock)에 변화를 일으키는 존재로, 시스템이 동태적으로 존재할 수 있게 함. 변화율 변수이므로 순간적으로 멈추었을 때는 그 값이 존재하지 않으며, 값을 가지기 위해서는 반드시 단위 기간(period)이 필요
- Auxiliary variables/Constants(보조 변수/상수) : 변화율변수 또는 수준변수의 계산을 쉽게 하기 위하여 보조적으로 사용. 직접 저량에 변화를 일으키지는 않으며 관계식을 통해 영향을 준다.

2. Stock & Flow 의 사례

In flow(유입량)	Stock(수준변수)	Out flow(유출량)
기업 수익(income)	기업 자산(asset)	기업 손실(loss)
출생률(birth)	인 구(population)	사망률(death)
물 유입(water inflow)	물탱크 수위(water level)	물 사용(water usage)
고용율(hire rate)	종업원 수(employee)	해고율(fire rate)
학습(learning)	지식(knowledge)	망각(forget)
생산(production)	재고(inventory)	판매(sales)

3. 인과지도(CLD)에서 Stock-Flow Diagram까지...



4. 모형 구축의 두가지 접근방법 : Top-Down & Bottom-Up Modeling

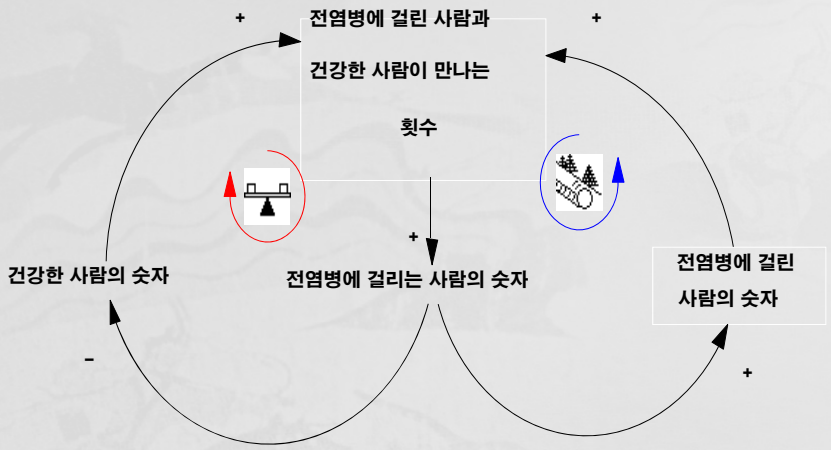
❖ Top-down modeling (전체우선 모델링) :

시스템에 대한 인과지도(CLD)를 먼저 그려서 중요한 피드백 루프를 확인하고, 시스템의 전체 구조를 이해한 다음 (Top) ➔ 이를 바탕으로 구체적인 저량-유량도 (SFD)를 구축 (Down) ➔ Vensim, 전통적 방법 (Here we go~~!! ^^)

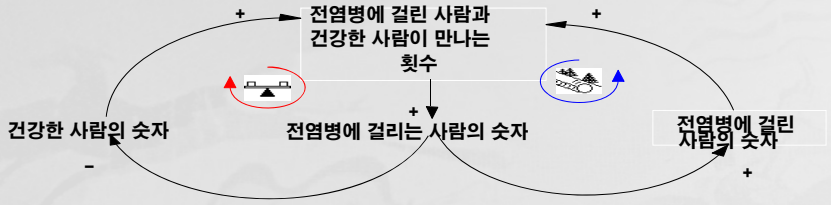
❖ Bottom-up modeling (개체우선 모델링) :

눈에 띄는 수준 변수(stock)와 변화율 변수(flow)를 구성단위(building-block)으로 하여 저량-유량도(SFD)를 구축한 다음 (Bottom) ➔ 건물을 건축하듯이 구체적 SFD를 바탕으로 전체적 인과지도를 구성 (UP) ➔ Stella

5. 구체적 저량-유량도(SFD)의 구성 사례 : 3강의 전염병 확산 모형(CLD)



6. Stock ? Flow ? or, Else ?



<STOCK>

1. 건강한 사람의 숫자, 2. 전염병에 걸린 사람의 숫자

<FLOW>

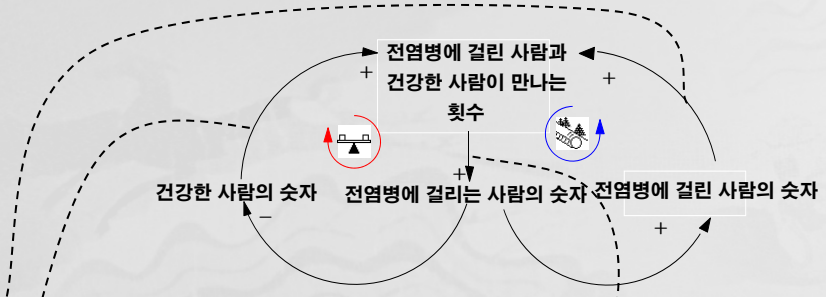
1. 전염병에 걸리는 사람의 숫자

<ELSE?> ➔ 구체적 관계식을 위해서는 Stock, Flow 뿐만 아니라 수식적 관계를 나타낼 수 있는 보조변수(aux)와 상수(constant)가 필요~!!

1. 전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나는 횟수

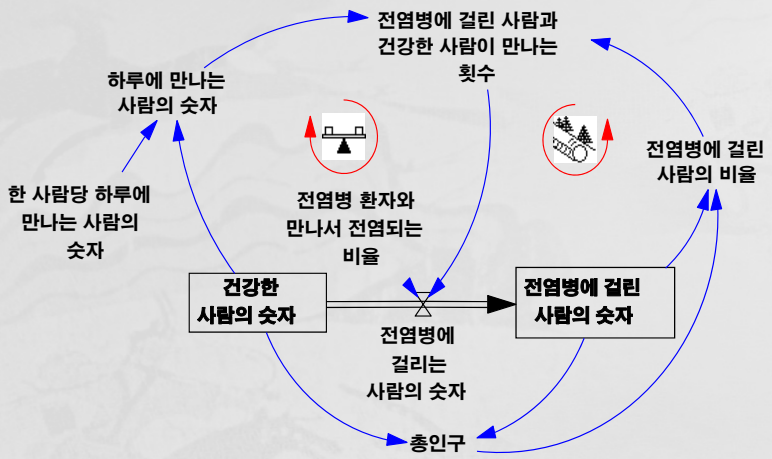
➔ 두개의 Stock 변수의 값과 함께 그들의 관계를 규정짓는 보조변수 혹은 상수가 추가로 필요~!! (CLD에 추가해 SFD 구성)

7. 보조변수(aux), 상수(constant) 추가로 모형 구체화



- ❖ 건강한 사람이 사람을 만나는 총 횟수는?
  (➔ 건강한 사람 한명당 만나는 사람숫자 * 건강한 사람수)
  - 한 사람당 하루에 만나는 사람의 숫자
  - 건강한 사람의 숫자
- ❖ 건강한 사람이 만나는 사람들 중에 전염병에 걸린 사람은?
  (➔ 건강한 사람이 사람을 만나는 총 횟수 * 전염병 걸린 사람 비율)
  - 전염병에 걸린 사람의 비율
  - 총인구 (건강한 사람 + 전염병 환자)
- ❖ 건강한 사람이 전염병에 걸린 사람을 만났을 경우 전염되는 비율은?
  - 전염병 환자와 만나서 전염되는 비율

8. Stock-Flow Diagram 그리기 : 보조변수, 상수를 추가해 SFD 전환!!



9. SFD내 수식 입력을 통한 완성 : Constants

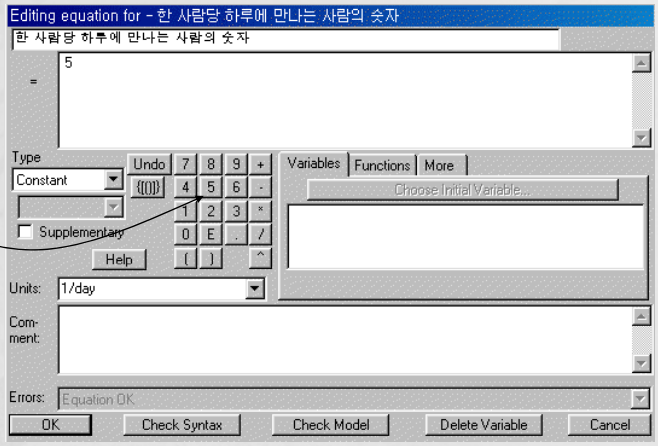
1. '수식정의' 아이콘을 누른다. (아직 정의되지 않은 변수들이 검게 나타남)

2. 정의하고자 하는 변수를 클릭하면 수식정의 윈도우가 나타난다.

3. 마우스를 클릭하여 수식을 정의한다.

4. 상수이기 때문에 5를 클릭한다.

5. 동일한 방식으로 '전염병환자와 만나서 감염되는 비율' 을 0.1로 정의한다.



10. SFD내 수식 입력을 통한 완성 : Stock Variables

5. 이 수식의 의미는 '전염병에 걸리는 사람의 숫자' 라는 변화율변수를 계속해서 뺀다는 의미이다. 이 수식은 Vensim PLE에서 자동으로 설정해 준다.

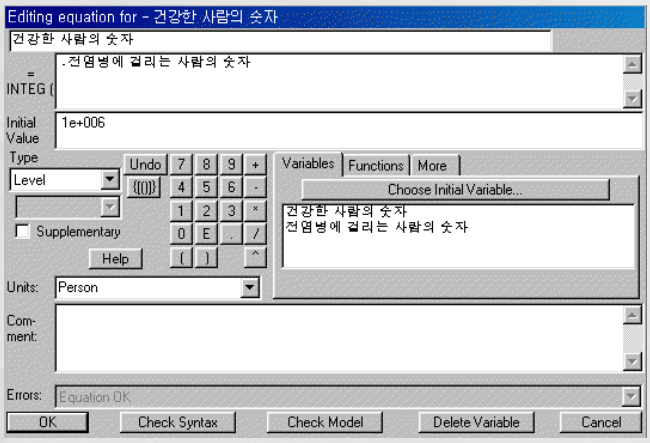
1. '건강한 사람의 숫자' 라는 수준변수를 클릭해 보자.

2. 수준변수의 수식은 따로 정의할 필요가 없다.

3. 다만, 초기값(Initial Value)만을 정의해 주면 된다. 여기에서는 1,000,000 명으로 정의하였다.

4. 수준변수에서는 나머지에 대해서는 신경 쓸 필요가 없다.

6. 마찬가지로 '전염병에 걸린 사람의 숫자' 의 초기값을 10명으로 정의하자.



11. SFD내 수식 입력을 통한 완성 : Flow Variables

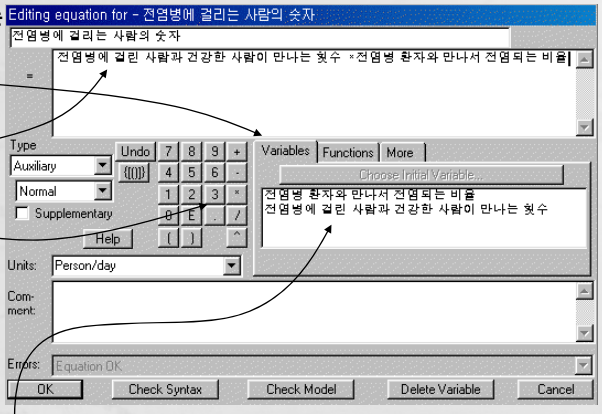
1. '전염병에 걸리는 사람의 숫자' 라는 변화율 변수를 클릭하자.

2. 윈도우의 중간 오른쪽에 Variables 에서 '전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나는 횟수' 라는 변수를 클릭하자. (수식 정의 윈도우에 클릭한 변수 이름이 나타날 것이다.)

3. 계산기에서 * 를 클릭하자.

4. 다시 Variables에서 '전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나는 횟수' 를 클릭하자.

5. OK를 눌러 변화율 변수의 수식정의를 끝낸다.



★ Variables 윈도우에는 인과관계 화살표로 연결되어 이 변수에 영향을 주는 변수 이름들이 나타난다.

12. SFD내 수식 입력을 통한 완성 : 그외의 변수들

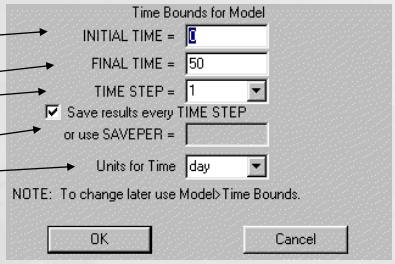
나머지 변수들에 대해서도 다음과 같이 수식들을 설정

(01) 건강한 사람의 숫자= INTEG (- 전염병에 걸리는 사람의 숫자, 1e+006)
(02) 총인구 = 건강한 사람의 숫자 + 전염병에 걸린 사람의 숫자
(03) 전염병 환자와 만나서 전염되는 비율 = 0.1
(04) 전염병에 걸리는 사람의 숫자 = 전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나는 횟수 * 전염병 환자와 만나서 전염되는 비율
(05) 전염병에 걸린 사람과 건강한 사람이 만나는 횟수 = 하루에 만나는 사람의 숫자 * 전염병에 걸린 사람의 비율
(06) 전염병에 걸린 사람의 비율 = 전염병에 걸린 사람의 숫자 / 총인구
(07) 전염병에 걸린 사람의 숫자= INTEG (전염병에 걸리는 사람의 숫자, 10)
(08) 하루에 만나는 사람의 숫자 = 건강한 사람의 숫자 * 한 사람당 하루에 만나는 사람의 숫자
(09) 한 사람당 하루에 만나는 사람의 숫자= 5

13. Simulation : Time Bound와 & Data Set 설정

1. Model 메뉴를 누르고, 다시 Time Bounds라는 메뉴를 누르면, 오른쪽과 같은 시뮬레이션 시간을 설정하는 윈도우가 나타난다.

2. - 시뮬레이션을 시작하는 시각 (시뮬레이션 결과의 그래프에 나타남)
   - 시뮬레이션 종료 시간
   - 시뮬레이션 진행 단위시간 (여기에서는 하루마다 시뮬레이션 수행)
   - 시뮬레이션 결과를 저장하는 간격
   - 시간의 단위 (여기에서는 하루)



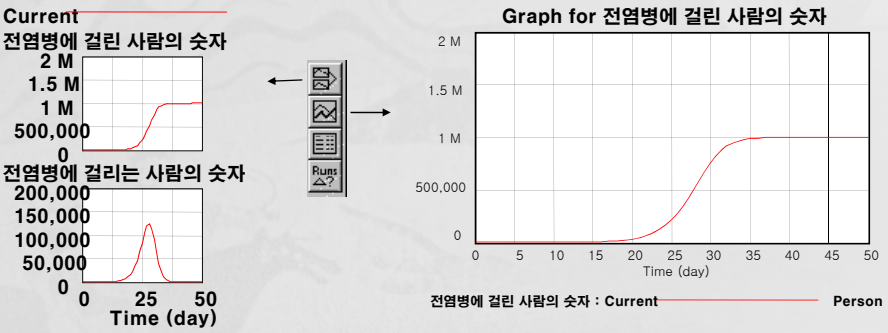
3. '시뮬레이션 시작' 이라는 아이콘을 누른다

Data Set이란

시뮬레이션 시작이라는 아이콘을 누르면,
Data Set이 Current로 되어 있는데, 덮어 쓸 것인지를 물어볼 것이다.
Data Set이란 시뮬레이션 결과를 저장하는 파일을 의미한다.
Vensim에서는 하나의 모델을 이리 저리 변화시켜 보면서 상이한 시뮬레이션 결과를 다른 파일에 저장하도록 허용하고 있다.
이러한 파일을 Data Set이라고 한다.

14. Simulation 결과 보기 : Workbench 변수 활용

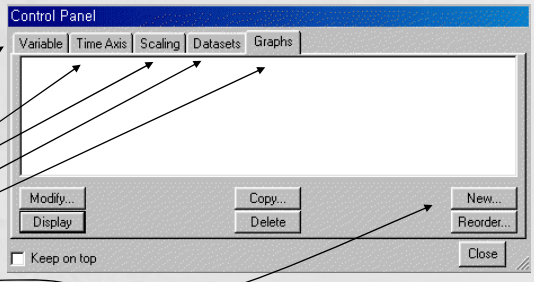
- Vensim 의 모델링은 '작업대(workbench)의 비유체계를 가지고 있다.
- Vensim의 아이콘들은 일종의 '**도구**' 이고,
  모델에 포함된 변수들은 도구가 적용될 수 있는 '**재료**' 라고 생각할 수 있다.
- '작업변수(Workbench variable)' 란 '도구가 계속해서 적용되는 재료' 이다.
- 즉, Vensim의 도구들은 (원인변수 추적, 결과변수 추적, 피드백 루프, 작업변수와 그 원인변수들의 변화 그래프, 작업변수의 변화 그래프, 작업 변수의 변화 테이블) 워크벤치 변수에 계속 적용된다.
- 모델의 변수들을 작업변수로 만들려면, 변수선택 아이콘하에서 특정 변수를 더블 클릭한다.
- 여기에서는 '전염병에 걸린 사람의 숫자' 를 작업변수로 설정한다.
- Vensim 화면의 맨 윗부분에 작업하는 파일의 이름과 함께 작업변수의 이름이 나타난다.



15. Simulation 결과 보기 : Control Panel 활용

- 작업변수는 시뮬레이션을 수행하면서 즉각 즉각 확인하는 변수이다.
  다른 여타의 변수들의 결과를 확인하고, 또 주요 변수들의 동태적 변화를 비교하려면 시뮬레이션 결과를 보여주는 방식을 설정할 필요가 있다.
  이를 수행하기 위해서는 Control Panel이라는 메뉴를 살펴볼 필요가 있다.
  Control Panel은 Window라는 메뉴의 하위 메뉴이며, 상단의 오른쪽 끝 아이콘을 선택하여 부를 수도 있다.

- Control Panel을 열고, Graph를 누르면, 오른쪽 화면이 보인다.

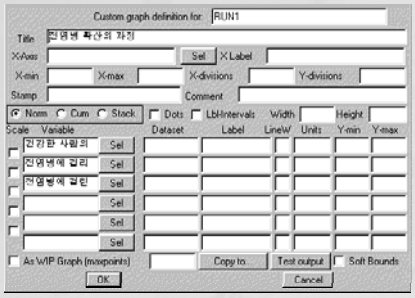


작업변수를 설정하는 메뉴
시뮬레이션 결과 그래프에서 시간표식을 설정
시뮬레이션 결과 그래프의 세로축 숫자 단위 설정
사용할 Data Set들을 지정
시뮬레이션 결과 그래프에 포함시킬 변수 지정

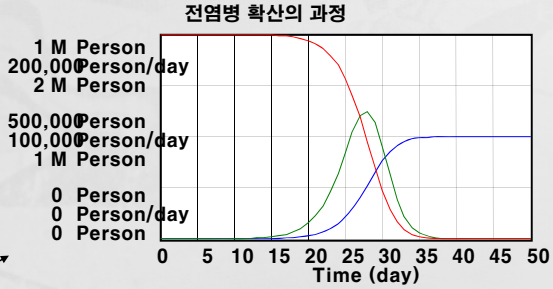
- 이제 New라는 아이콘을 누른다.
  그러면 다음의 페이지와 같은 윈도우가 나타날 것이다.

16. Simulation 결과 보기 : Control Panel을 활용해 그래프 보기

- 앞에서 New 아이콘을 누르면 다음과 같은 화면이 나타난다.
  여기에서 시뮬레이션 결과에 포함될 변수들과 사용할 Dataset, 그리고 그래프의 특성 등을 설정한다.



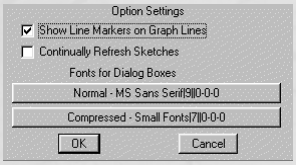
- OK를 누르면 앞의 Control Panel로 돌아간다. 이때 Display를 누른다.



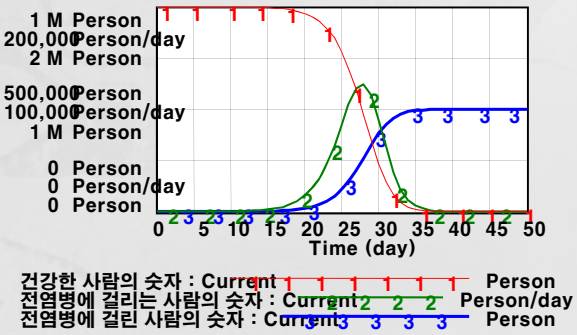
건강한 사람의 숫자 : Current — Person
전염병에 걸리는 사람의 숫자 : Current — Person/day
전염병에 걸린 사람의 숫자 : Current — Person

17. Simulation 결과 보기 : 시뮬레이션 결과 구분을 위한 표식

- 앞의 시뮬레이션 결과에서 각 변수의 변화가 다른 색으로 표시되었다. 그런데 이를 흑백 프린터로 프린트하면 알아볼 수가 없다. 이를 식별하기 위하여 다음과 같은 두가지 방법을 사용한다.
  1. 앞의 Graph 설정에서 각 변수의 선의 굵기를 조정한다.
     LineW라는 칸에 1,2,3… 등의 값을 설정하면, 선의 굵기가 달라진다..
  2. 각 변수의 선에 번호를 부여하는 방법이 있다.
     이는 Option이라는 메뉴에서 설정한다.
  3. 그리고 나서 Control Panel에서 Display를 눌러 보라.



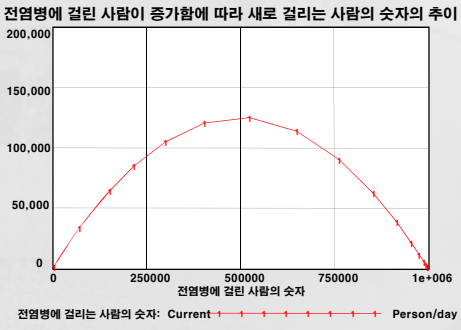
선의 굵기와 번호 표식



18. Simulation 결과 보기 : 다양한 형태의 결과 그래프 설정과 검토

- 종종 시간의 추이에 따른 변수 값의 변화가 아니라 다른 변수 값의 추이에 따른 변화를 확인할 필요가 있다. 예를 들어서 전염병에 걸린 사람(수준변수)이 증가할 수록 새로이 전염병에 걸리는 사람(변화율 변수)의 값이 어떻게 변화하는지를 검토해 보려 한다고 하자.

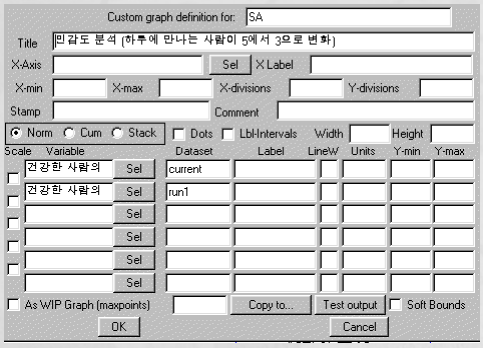
- 이때에는 Control Panel에서 X-축에 '전염병에 걸린 사람의 숫자' 라는 변수를 설정한다.



19. 민감도 분석(Sensitivity analysis)

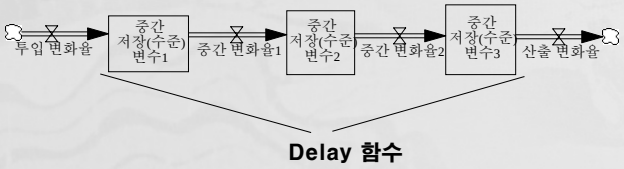
1. 변수 값이 다양하게 변화할 때, 시뮬레이션 결과가 어떻게 변화하는지를 알아보는 것을 민감도 분석이라고 한다.
2. Vensim PLE에서는 Data Set을 활용하여 민감도 분석을 한다.
3. 먼저 '시뮬레이션 시작' 아이콘 옆의 '시뮬레이션 준비' 아이콘을 누른다.
4. 그러면 상수 변수들이 파란색으로 나타난다.
5. '한 사람당 하루에 만나는 사람의 숫자'를 3명으로 바꾸고, 시뮬레이션 시작 아이콘을 누른다. (이 값은 일시적이
6. 새로운 시뮬레이션 결과를 current에 덮어 쓸지 물어볼 것이다. 아니라고 하고, 새로 Data Set를 run1으로 설정한
7. 이제 Graph 설정 패널을 아래와 같이 조절하고 Display를 누른다.

(작업변수의 그래프를 나타내는 왼쪽의 Graph 아이콘을 누르면 곧장 작업변수에 대한 민감도 분석 그래프가 나타난다)

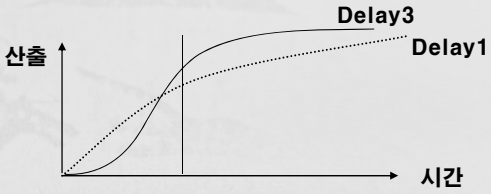


20. (부록) Vensim 함수 : Delay 함수

- 물질적인 시간지연이 존재할 때에는 Delay함수를 사용한다.
- 사실상 Delay함수는 여러개의 변화율 변수와 수준 변수를 압축한 것이라고 할 수 있다.
  따라서 Delay함수 자체에 수준변수와 변화율 변수를 내장한 것이라고 할 수 있다.



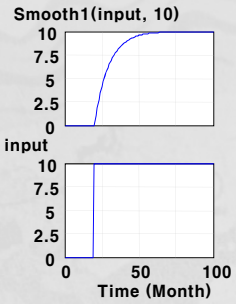
- 얼마나 많은 수준변수를 내장하고 있는가에 따라서 Delay함수의 차수가 결정된다.
  보통 1차 Delay함수와 3차 Delay함수가 사용된다.

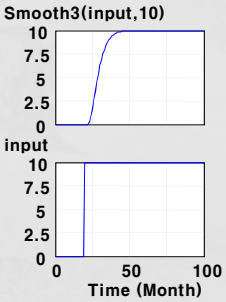


21. (부록) Vensim 함수 : Smooth 함수

- 물질 지연은 중간의 수준변수로 표현하지만, 정보의 지연은 특정 변수값이 갑자기 변화하더라도 이를 서서히 인식하도록 하는 Smooth 함수를 사용한다. 이는 흔히 말하는 이동평균과 같은 개념이라고 할 수 있다.

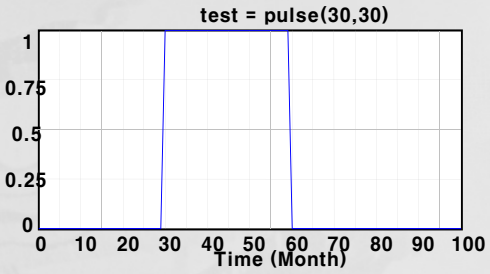
- 다음은 갑자기 변수값이 변화할 때 Smooth1 함수와 Smooth3 함수가 어떻게 변화하는지를 보여준다. Smooth3 역시 함수의 내부에 몇개의 수준변수가 도입되었는가를 의미한다.





22. (부록) Vensim 함수 : Pulse 함수

- Pulse 함수는 일정한 기간 동안에 1의 값을 유지하도록 하는 함수이다.
  이외의 기간에는 0의 값을 갖는다.

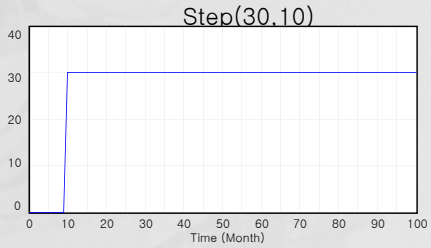


- Pulse 함수는 다음과 같이 다양하게 사용될 수 있다.

  예 1) test = 0.7*pulse(30,30)
  => 30시간 이후 30시간 동안 0.7의 값을 유지
  예 2) test = other_variable*pulse(30,30)
  => 30시간 이후 30시간 동안 다른 변수의 값을 유지, 이외에는 제로

23. (부록) Vensim 함수 : Step 함수

- Step 함수는 일정한 시간 이후 일정한 값을 유지하도록 하는 기능을 한다.



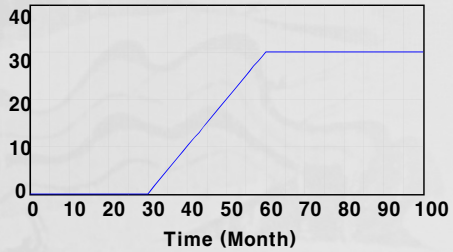
- Step 함수는 다음과 같이 사용될 수 있다.

예 1) test = step(30,10) - step(20,15)
=> 10시간에서 15시간까지는 30, 그 이후는 10의 값 유지

24. (부록) Vensim 함수 : Ramp 함수

- Ramp 함수는 시간에 따라 일정하게 증가하는 함수를 의미한다.

Ramp(기울기, 시작 시각, 끝 시각) = Ramp(1,30,30)



- Ramp 함수는 시간에 의해 그 값이 결정된다는 특성이 있다. 따라서 SD에서는 잘 사용되지 않는 함수이다. 다만, 시간에 따라 직선적인 변화(성장,쇠퇴)가 있는 경우에는 이 함수를 사용한다.

예) 일정한 시점부터 소비자의 주문량이 서서히(직선적으로) 증가하여 일정한 규모를 유지하는 경우

Delay와 Graph함수의 활용

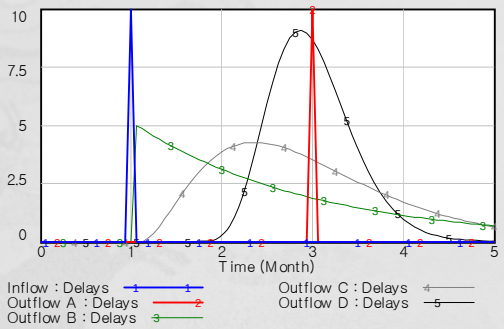
김창욱
(삼성경제연구소, cwkim@seri.org)

2011년 2월 11일

Material Delay의 사례

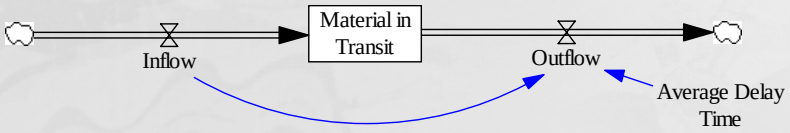
- 자동차 조립라인을 거쳐 생산하기
- 쇼핑몰 계산대 통과하기
- 수조에서 배수구로 물빼기

Pulse Input에 대한 여러가지 Delay의 반응



Pipeline Delay

- **Pipeline Delay의 구조**



- **수식**

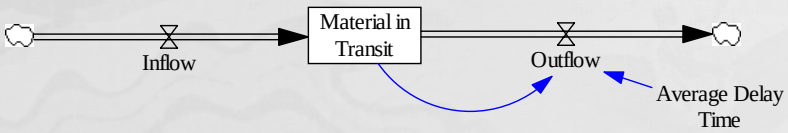
Outflow(t) = Inflow(t - Average Delay Time)

- **Vensim 함수**

Outflow = DELAY FIXED(Inflow, Average Delay Time , initial value)

First Order Material Delay

- **First Order Material Delay의 구조**
  - **예: 수조에서 배수구로 물빼기**



- **수식**

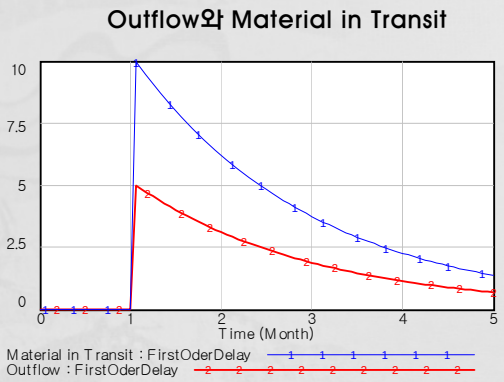
Outflow(t) = Material in Transit(t)/Average Delay Time

- **Vensim 함수**

Outflow = DELAY1I(Inflow, Average Delay Time , initial value)

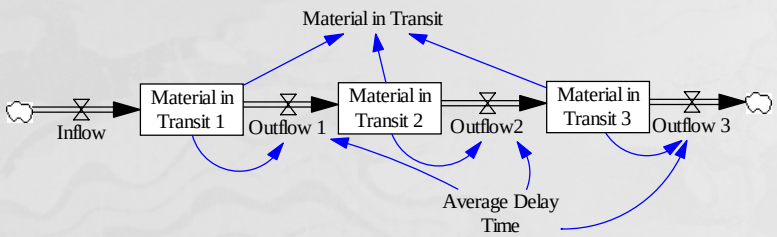
First Order Material Delay

- **First Order Material Delay의 그래프**



Higher-Order Material Delay

- **Higher-Order Material Delay의 구조**



- **수식**

  Outflow 1 = Material in Transit 1/(Average Delay Time/Order)
  Outflow 2 = Material in Transit 2/(Average Delay Time/Order)
  Outflow = Material in Transit 3/(Average Delay Time/Order)

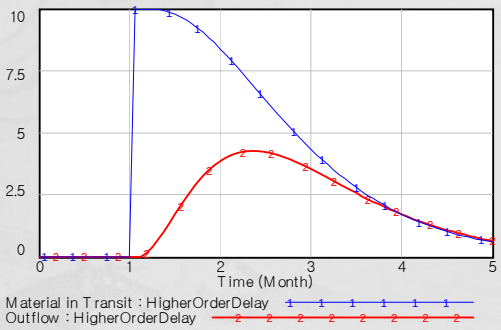
- **Vensim 함수**

  Outflow = DELAY3I(Inflow, Average Delay Time , initial value)
  Outflow = DELAY N(Inflow, Average Delay Time , initial value , Order)

Higher-Order Material Delay

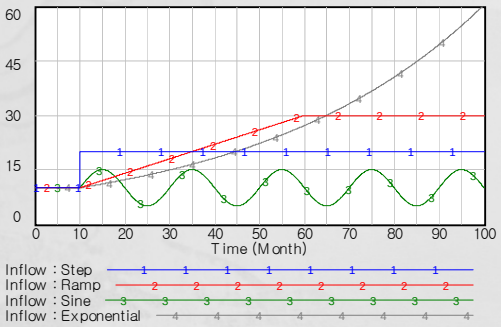
- Higher(3rd)-Order Material Delay의 그래프

Outflow와 Material in Transit



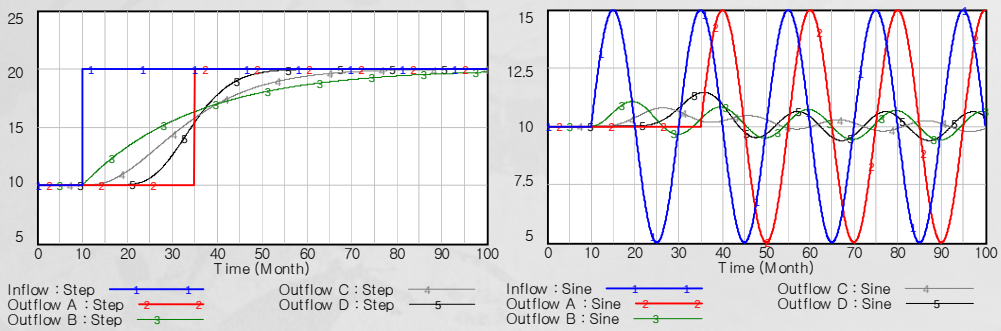
여러 가지 input에 대한 Delay함수의 반응

- Step
- Ramp
- Fluctuation
- Exponential growth



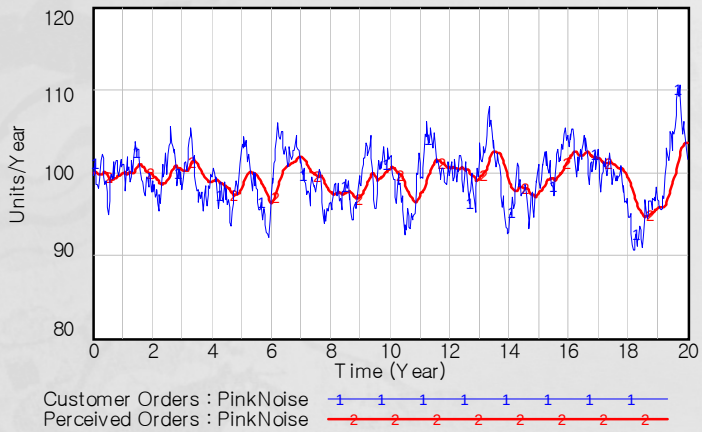
여러 가지 input에 대한 Delay함수의 반응

- Outflow A: Pipeline Delay
- Outflow B: First Order Delay
- Outflow C: 3rd Order Delay
- Outflow D: 12th Order Delay



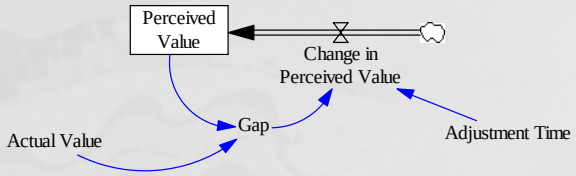
Information Delay란

- 실제값(actual value) vs 인지값(perceived value) or 기대값(expected value)



First Order Information Delay

- 구조(Adaptive Expectation, Exponential Smoothing)



- 수식

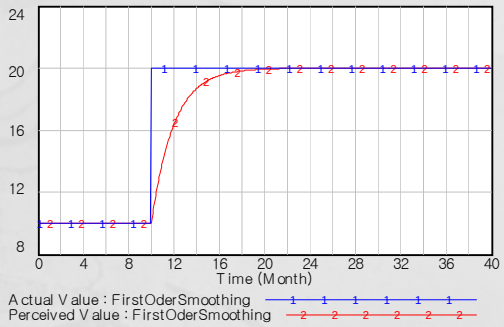
  Perceived Value = INTEGRAL(Change in Perceived Value, initial perceived value)
  Change in Perceived Value = (Actual Value - Perceived Value)/Adjustment Time

- Vensim 함수

  Perceived Value =SMOOTHI(Actual Value, Adjustment Time , initial perceived value)

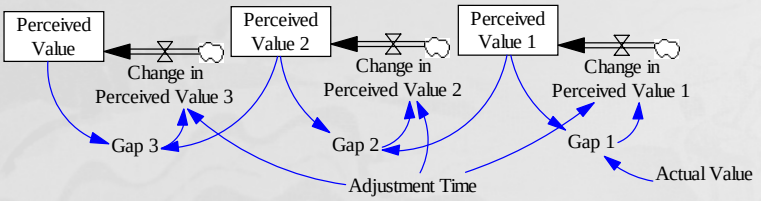
First Order Information Delay

- First Order Information Delay(First Order Smoothing)의 반응 그래프



Higher-order Information Delay

- **구조**



- **수식**

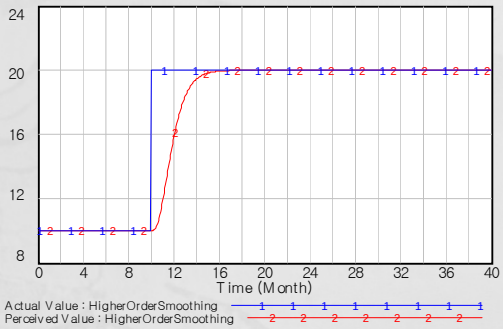
Perceived Value = INTEGRAL(Change in Perceived Value 3, initial perceived value)
Change in Perceived Value 3 = (Perceived Value 2 - Perceived Value)/(Adjustment Time/Order)

- **Vensim 함수**

Perceived Value =SMOOTH3I(Actual Value, Adjustment Time, initial perceived value)
Perceived Value =SMOOTH N(Actual Value, Adjustment Time, initial perceived value, Order)

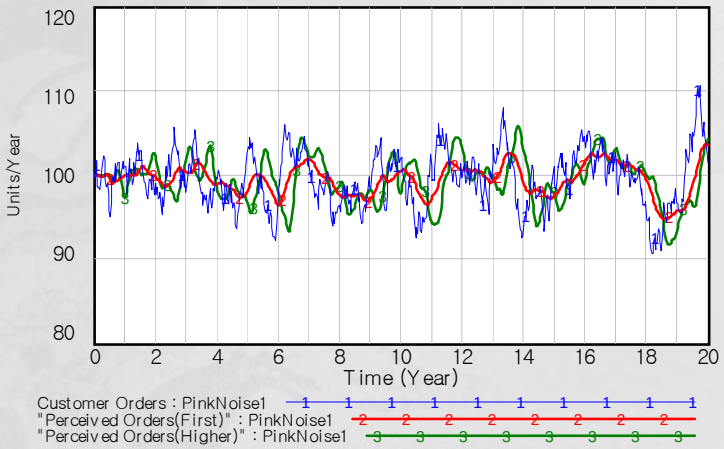
Higher-order Information Delay

- **Higher(3rd)-Order Smoothing의 반응 그래프**



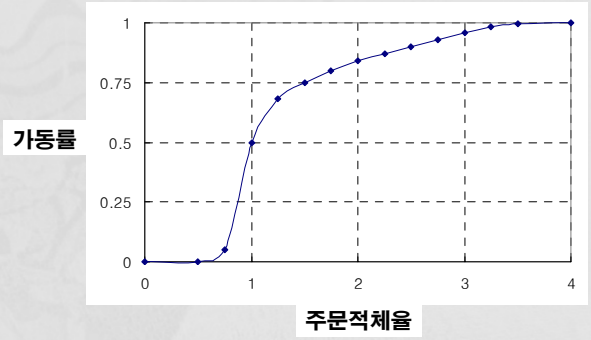
First Order Smoothing vs. Higher-Order Smoothing

- 1st Order vs. 12th Order(Adjustment Time = 0.5)



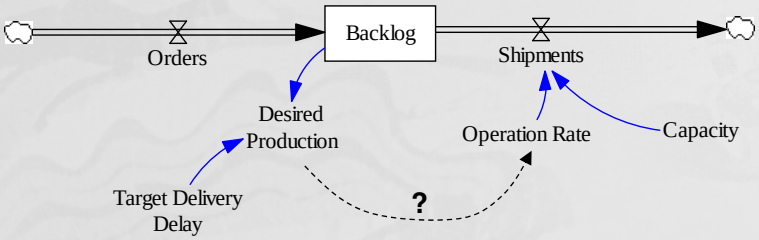
Graph 함수의 필요성

- 수식으로 표현하기 어려운 관계가 존재
  - Maxium 혹은 Minimum이 존재하는 경우
  - 예1: 주문량과 가동률
  - 예2: 근무시간과 피로도



가동률 조정 문제

- 구조



Desired Production = Backlog / Target Delivery Delay

- Desired Production과 Operation Rate 사이의 관계는?

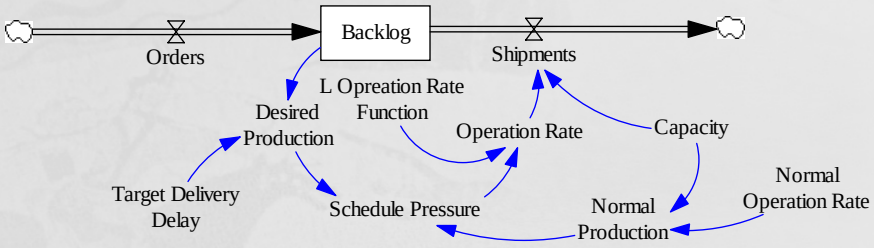
Normalization

- 함수의 X와 Y에 해당하는 변수를 기준값 대비 비율(단위를 제거한 값)로 표시
  - 기준값은 해당 변수의 최대값이나 정상값 중에서 필요에 따라 선택

    Schedule Pressure = Desired Production/Normal Production
    Operation Rate 은 이미 normalize된 변수

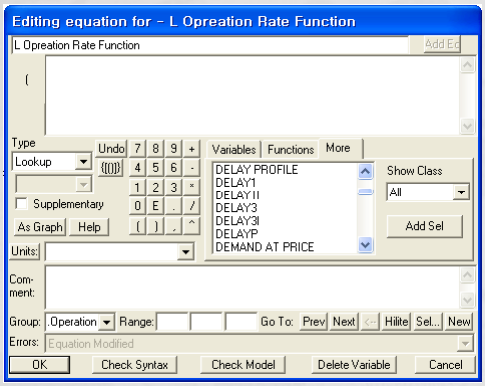
- 정규화(normalized)된 변수 사이의 관계가 그래프 함수 설정의 대상

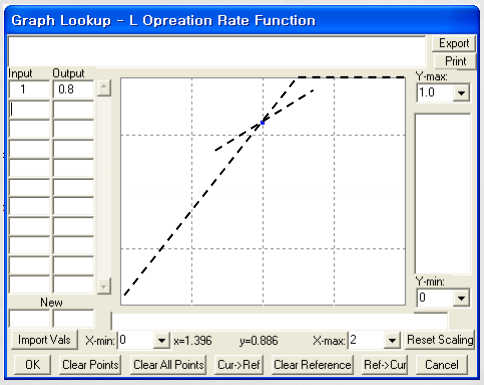
  Operation Rate = f(Schedule Pressure)



Reference Points, Reference Policy

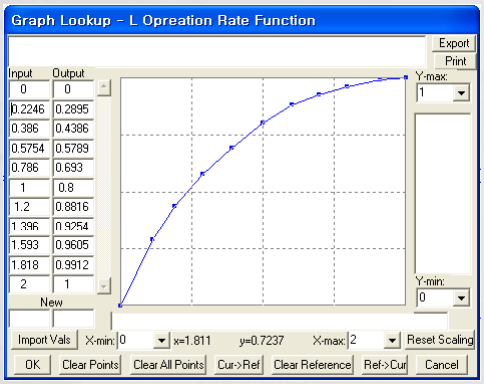
- Graph 함수 생성 도구를 활성화
  - Vensim의 경우: 변수 Type에서 Lookup을 선택하고 As Graph 모드로 전환
- X, Y의 범위(최대, 최소)를 지정
- Reference Points(기준점) 표시 및 Reference Policy(기준선)을 추정





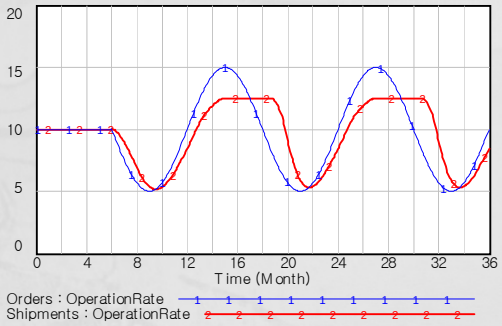
그래프 그리기

- 기준점과 기준선을 고려하면서 점들을 표시하여 관계 그래프를 작성



시뮬레이션 결과

- 주문량의 변화에 대한 출하량의 변화 추이

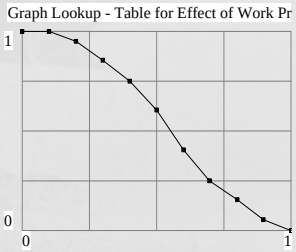


Soft Variables과 관련된 관계식 설정이 가장 큰 난제

Soft variables의 유형:
- Attribute(상품의 효용)
- State of Mind(직원 사기, 고객 충성도)
- Capability(제품개발능력)

정량화 방법:
- 기존의 측정 가능 변수로 대체(품질->불량률)
- Normalize(0과 1 사이); 최대값(=1)의 기준은 best rival, best in your own business, absolute maximum

관계식 설정: Graph 함수를 활용

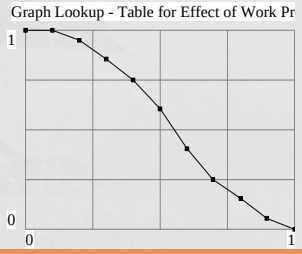


Soft Variables과 관련된 관계식 설정이 가장 큰 난제

- Soft variables의 유형
  - Attribute(상품의 효용)
  - State of Mind(직원 사기, 고객 충성도)
  - Capability(제품개발능력)

- 정량화 방법
  - 기존의 측정 가능 변수로 대체(품질->불량률)
  - Normalize(0과 1 사이); 최대값(=1)의 기준은
    best rival, best in your own business, absolute maximum 등

- 관계식 설정은 Graph 함수를 활용



System Dynamics
시뮬레이션 결과분석

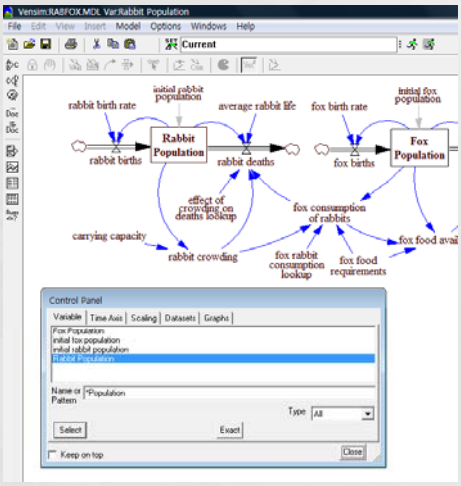
전대욱
(한국지방행정연구원, dujeon@krila.re.kr)

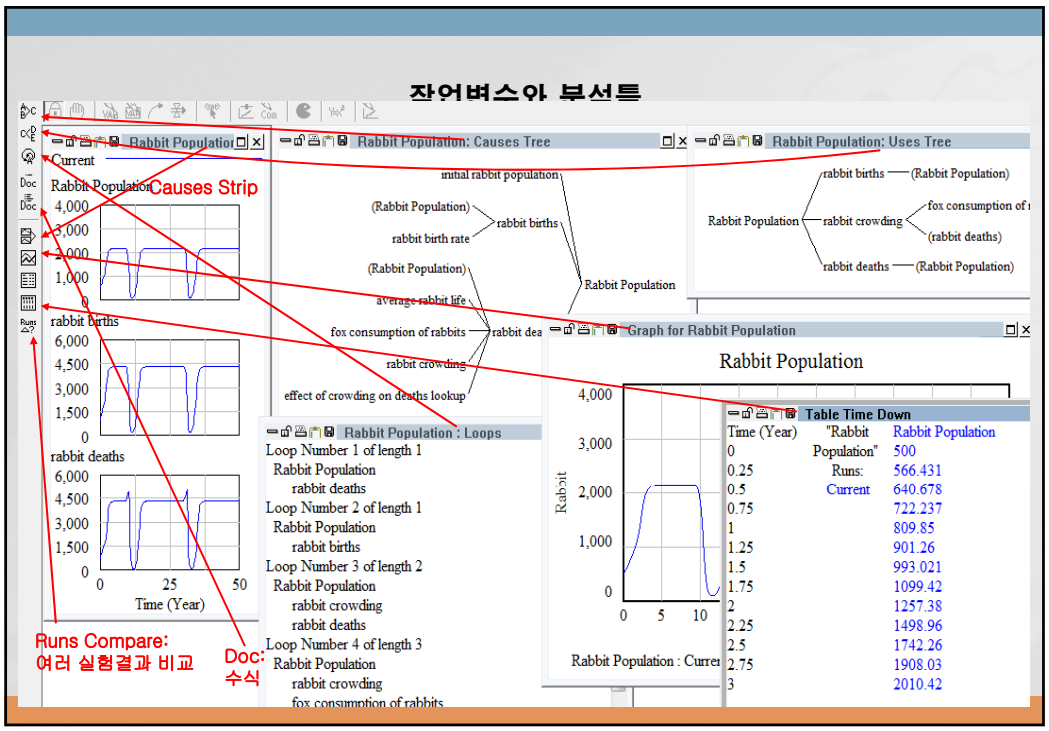
2011년 2월 11일

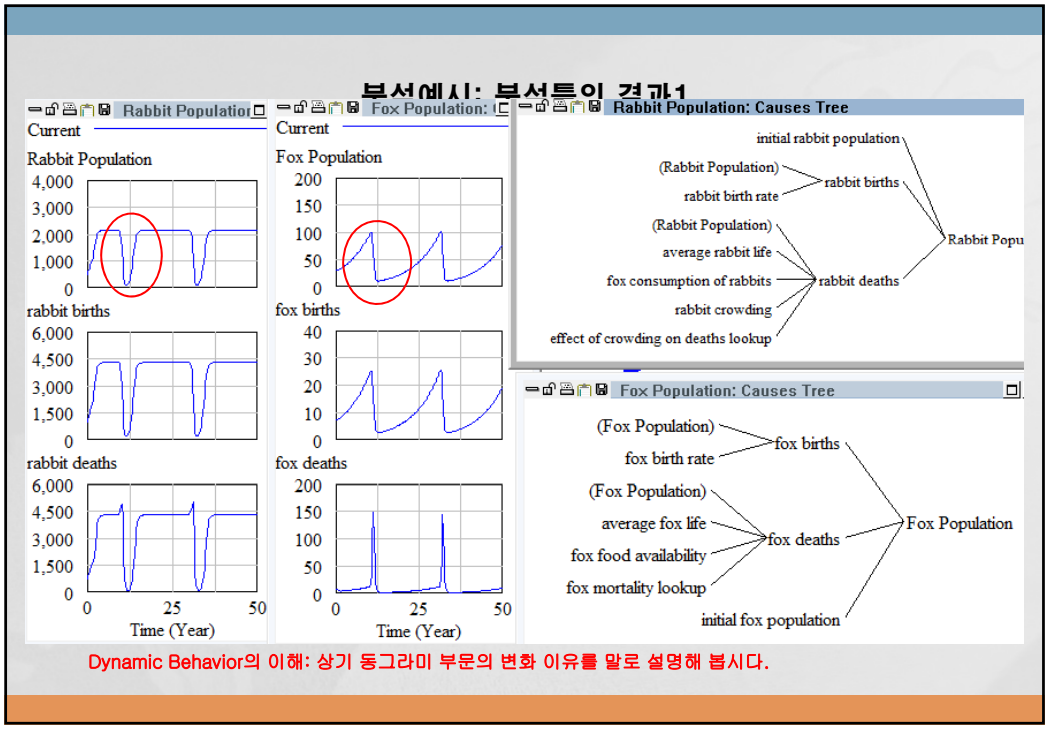
(본 자료는 Vensim PLE를 대상으로 하며 PLE Plus, Professional, DSS 등에서 제공하는 기능들은 설명하지 않았습니다)

작업변수의 개념

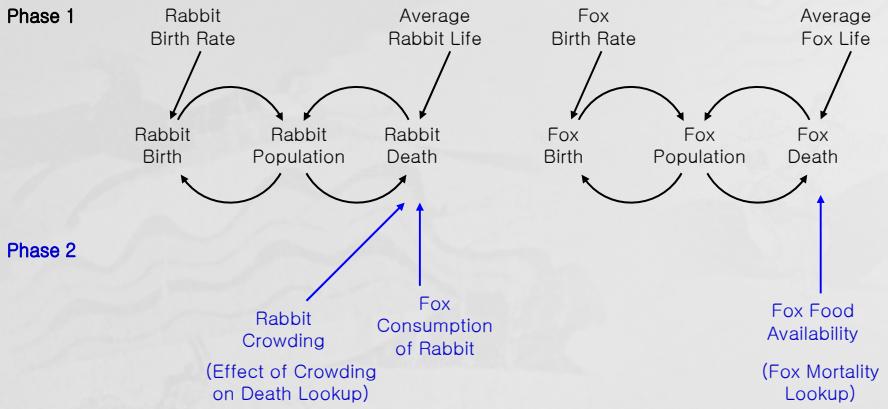
- Vensim의 작업변수(Workbench Variable)
  - 작업변수(Workbench Variable)은 모델의 시뮬레이션 분석에 있어서 현재 실험자가 관심있게 보는 변수
  - Vensim에서 왼쪽메뉴 Analysis Tools의 대부분은 작업변수를 중심으로 작동
  - 작업변수 선택방법: Main Toolbar에 있는 Control Panel을 클릭하거나, 또는 Windows>Control Panel 항목을 선택하여 Variable Tab에서 선택
  - 작업변수 선택의 또다른 방법: Output 혹은 Sketch 창에서 변수를 더블클릭
  - 현재의 작업변수는 Title Bar의 "Var:" 뒤에 표시(작업변수가 Subscripts인 경우 모든 변수가 표시)
  - 샘플모델: rabfox.mdl




잔여변수와 부선트
Causes Strip
Runs Compare:
여러 실험결과 비교
Doc:
수식
Rabbit Population: Causes Tree
Rabbit Population: Uses Tree
Graph for Rabbit Population
Rabbit Population : Loops
Table Time Down
Time (Year)
"Rabbit Population"
Rabbit Population
Runs:
Current
rabbit births
rabbit deaths
Time (Year)


부선예시: 부선트의 결과1
Rabbit Population: Causes Tree
Fox Population: Causes Tree
Current
Rabbit Population
rabbit births
rabbit deaths
fox births
fox deaths
Time (Year)
initial rabbit population
(Rabbit Population)
rabbit birth rate
average rabbit life
fox consumption of rabbits
rabbit crowding
effect of crowding on deaths lookup
(Fox Population)
fox birth rate
average fox life
fox food availability
fox mortality lookup
initial fox population
Fox Population
Dynamic Behavior의 이해: 상기 동그라미 부문의 변화 이유를 말로 설명해 봅시다.

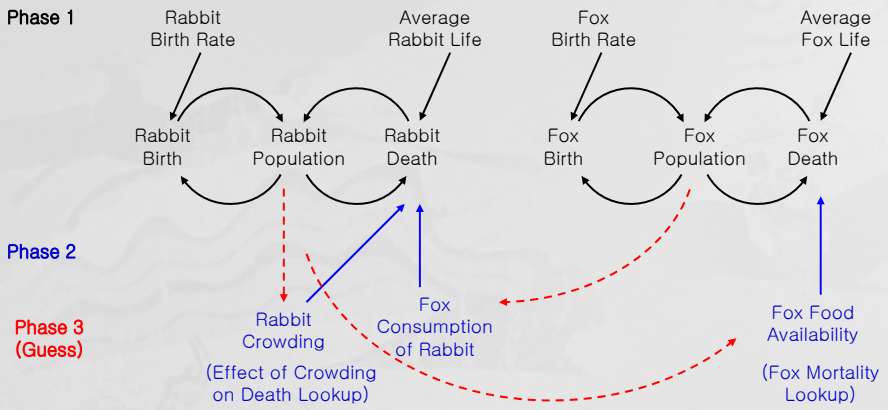
분석예시: 시스템 행태와 구조의 이해1



Dynamic Hypothesis

1) 여우와 토끼는 모두 자연상태에서 일정한 출생률, 사망률을 가짐
2) 출생률은 성숙한 1개체 대비 새끼를 낳아서 다음세대의 성숙개체수의 평균비율을 의미
3) 사망률은 전체 개체수를 따졌을 때 평균수명의 역수로 볼 수 있음
4) 여우는 토끼를 포식

분석예시: 시스템 행태와 구조의 이해1

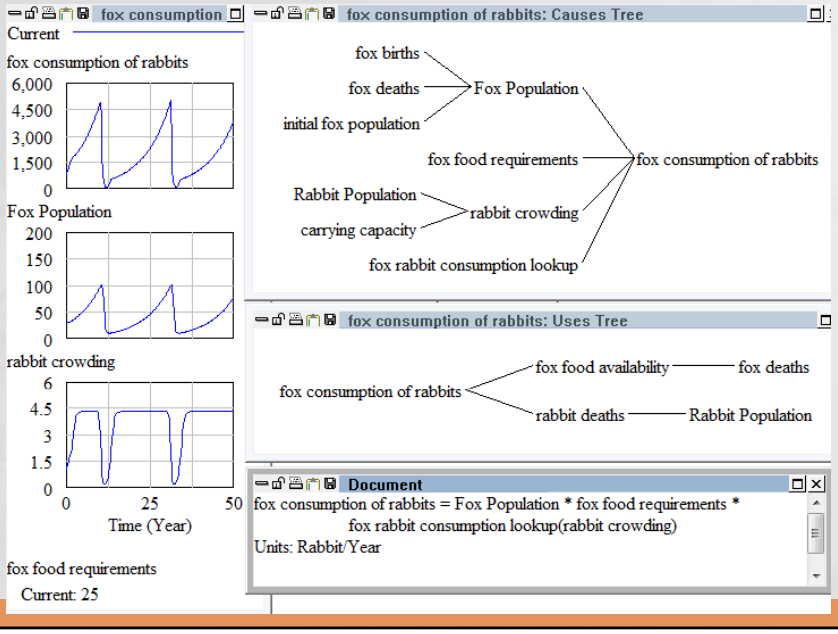


Dynamic Hypothesis

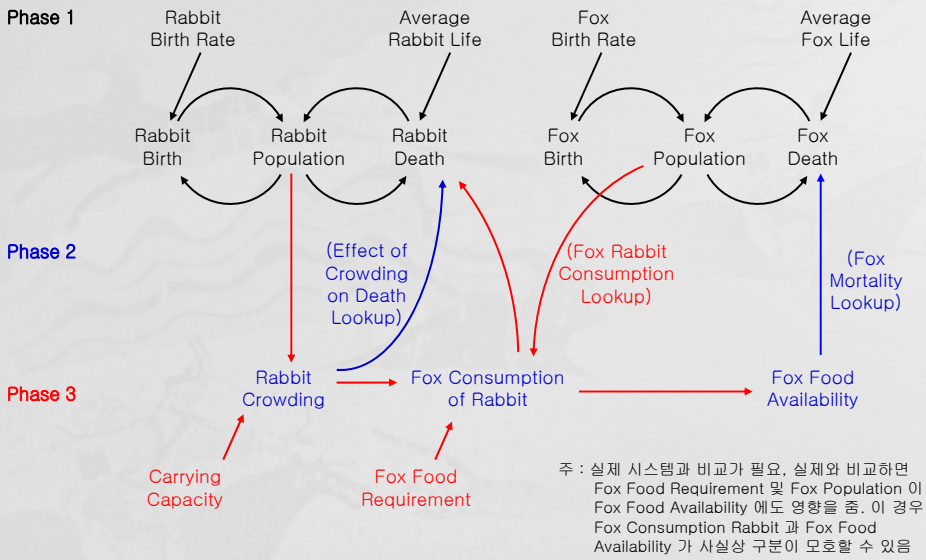
1) 여우가 토끼를 잡아먹는 것이 여우의 생존가능성(사망가능성)을 높임(낮춤)
2) 잡아먹히는 토끼의 양은 토끼와 여우의 개체수에 비례
3) 잡아먹힌 만큼 토끼의 개체수는 줄어들고, 잡아먹힌 만큼은 여우의 사망률을 낮춤

분석예시: 분석틀의 결과2

작업변수 (Workbench Variable) : Fox Consumption of Rabbits 로 바꿈



분석예시: 시스템 행태와 구조의 이해2



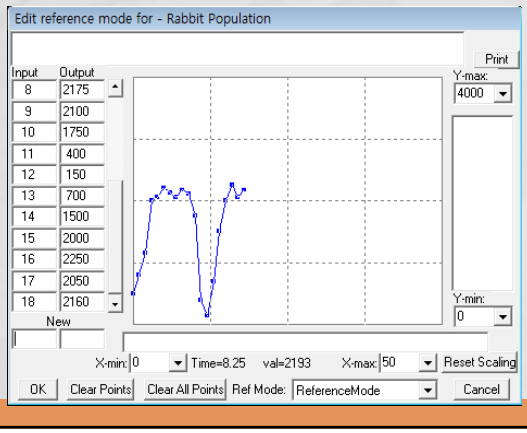
주 : 실제 시스템과 비교가 필요, 실제와 비교하면 Fox Food Requirement 및 Fox Population 이 Fox Food Availability 에도 영향을 줌. 이 경우 Fox Consumption Rabbit 과 Fox Food Availability 가 사실상 구분이 모호할 수 있음

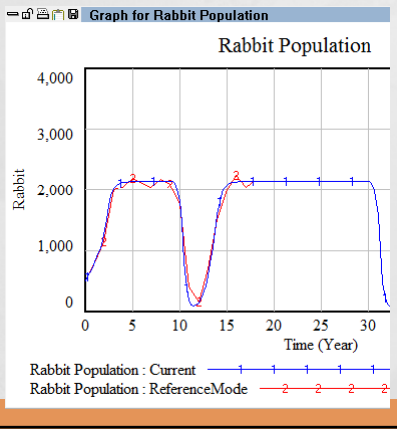
시뮬레이션 결과와 Referece Mode와의 비교

- Reference Mode
  - 참조동태는 시뮬레이션에 있어서 주요 참고자료를 의미
    - 즉 시스템에서 핵심적인 변수(거의 대부분의 경우에 state variable)들의 경우, 시뮬레이션 결과가 과연 잘 나왔는지 안 나왔는지를 비교할 대상이 필요한데, 이 비교대상이 참조동태임
    - 예컨대 인구추이 등 특정 시계열 통계자료를 놓고 이 "Actual Data"에 fitting시키는 것을 종종 simulation의 목표로 설정하는 경우가 많은데 이러한 원자료를 참조동태라고 함
  - 참조동태는 historical data가 흔한 경우이나, 반드시 과거의 정량적 수치(시계열 데이터)만을 의미하는 것은 아니며, 때로 시점을 초월한 정성적인 behavior가 될 수도 있음
    - 따라서 "actual" 대신 "reference", "data"대신 "mode"라는 표현을 씀
    - 종종 actual data의 fitness를 시뮬레이션 모델 및 결과에 대한 validity의 척도로 생각하는 경우가 많지만, 실데이터와의 적합도는 SD에서는 타당성의 한 요인에 불과(자세한 것은 8강 참조)
- Vensim에서의 Reference Mode와 시뮬레이션 결과의 비교
  - 대다수 SD모델 특히 Hard SD model(정량적 엄밀성 추구, soft는 행태적 설명력을 강조)의 경우 종종 주요 변수들의 historical data가 제시되고 실험도중 빈번히 활용
    - 이 참조동태는 시스템 구조를 도출하기 위한 dynamic hypothesis의 설정부터 모델구조 및 실험결과값의 타당성, 파라메터 추정 및 최적화 등 분석전반에 걸쳐서 활용
  - Vensim에서는 실험결과와 참조동태의 비교를 위해 Sketch Tool Bar의 맨 오른쪽에 참조동태를 그래프함수(lookup 함수)로 표현하는 기능을 제공

시뮬레이션 결과와 Referece Mode와의 비교

- Reference Mode 입력 및 비교 예제
  - Sketch Tool Bar의 맨 오른쪽의 "Reference Mode" 버튼을 클릭한 후, Sketch(Build) Area에서 historical data를 입력할 핵심변수를 클릭
  - 아래 왼쪽의 그림과 같은 입력창이 나오면 Lookup 함수와 같이 직접 입력하거나 혹은 그림에서 직접 마우스 포인터로 플로팅한 후 OK 버튼을 누름 (ReferenceMode.vdf 로 데이터파일 저장)
  - 그래프를 클릭하면 아래 오른쪽과 같은 그림이 나옴





정책대안 비교분석: 가정

- 정책에 대한 상황의 가정: 기존에는 여우에 대한 사냥이 금지되어 있었으나, 어느날 여우에 대한 사냥이 허용됨
  - Base-Run Case : 정책실험을 하기 전 현재의 상황을 가정하고 구축한 초기 시뮬레이션 모델의 경우를 일컫으며, 약어로 BR Case 혹은 BAU (Business-As-Usual) Case라 칭함. 본 예제에서는 여우에 대한 사냥이 금지되어 있던 상태를 가정
  - Alternative/Experimental Case : 새로운 정책의 효과를 실험할 때, BR Case와는 달리 새로운 정책이 시행되는 경우를 가정. 본 예제에서는 여우사냥을 허용
  - 새로운 정책에 대한 실험변수 및 결과에 대한 예측(시스템사고)

    [대안1] 사냥가능 최대개체수를 정하고, 최대개체수 이내에서 사냥하는 경우:
    - 매년 최대허용량만큼 사냥된다면 Fox Deaths에 Constant를 더함
    - 여우의 개체수가 일정량을 넘지 않도록 (현재 개체수 - 관리목표량)만큼 허용하는 경우
    - Otherwise, 허용개체수를 넘지 않도록 확률변수 사용도 가능(Vensim Random함수 참조)

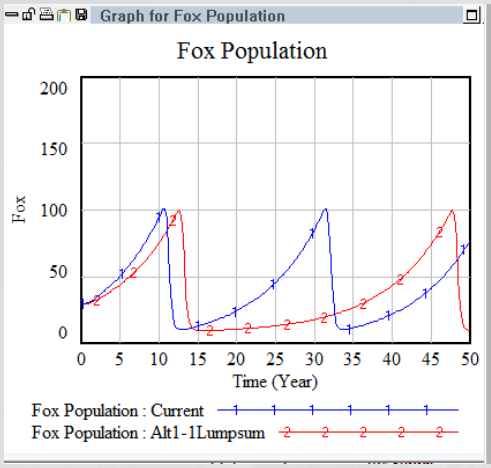
    [대안2] 현재(혹은 직전년도) 여우 개체수의 일정비율까지 허용하는 경우
    - Fox Deaths = BR의 Fox Deaths + (Fox Population * Policy Rate of Hunting)

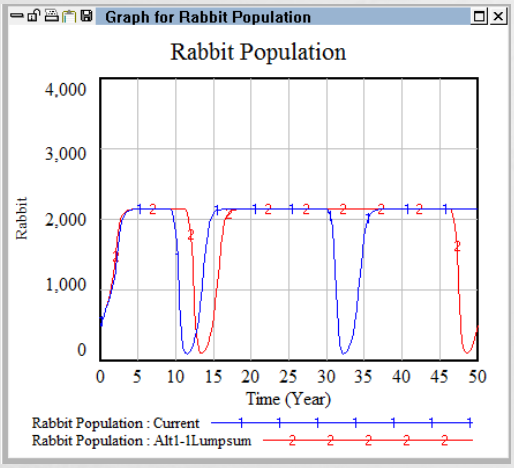
    [예측]
    - 허용량이 많지 않다면 근본적인 시스템 행태는 변화가 없으나 개체수, 진폭 등은 변화
    - 허용량이 많다면 …

정책대안 비교분석: 대안1-1

- 대안1-1: 매년 정해진 개체수만큼 사냥이 허용됨(Lump-sum Quota)
  - 샘플모델인 rabfox.mdl 를 다른 이름(rabfox2.mdl)으로 저장
  - Fox Population 에 새로운 Outflow인 Fox Hunted 를 추가시킨 후, 값에 0을 대입
    -> 값 입력시 Unit을 무엇으로 해야 하나요?
  - Main Tool Bar 의 "SET(Set Up a Simulation)" 버튼을 클릭한 후 "Run a Simulation" 버튼을 클릭 (현재 SET버튼 오른쪽 창에 "Current"로 되어 있으므로 실험결과는 Current.vdf 에 저장됨)
    -> 벤심에서는 이렇게 개별 실험결과를 저장: 여러 번의 실험시 실험마다 별도의 이름으로 저장해야 과거 결과의 참조가 가능하며, Output Window의 결과가 몇번째 실험결과인지 주의 필요
  - 다시 "SET" 버튼을 클릭한 후 Fox Hunted 를 클릭한 후, 값에 1을 대입
  - "SET" 버튼의 오른쪽 텍스트 박스(Run Name Box)에 "Alt1-1Lumpsum"을 타이핑한 후, "Run a Simulation" 버튼을 클릭 및 (실험결과는 Alt1-1Lumpsum.vdf으로 저장)
  - Analysis Tool 의 "Runs Compare" 클릭
  - 작업변수(Workbench Variable)를 Fox Population 및 Rabbit Population 으로 각각 설정한 후, Analysis Tool 의 "Graph"를 클릭하여 다음페이지와 같은 그래프를 출력
  - 그래프에는 두 실험결과가 1번 및 2번의 커브로 제시되어 있는데, 이를 위해서는 메뉴의 Options>Options…를 클릭, 체크박스의 "Show Line Markers on Graph Lines" 선택

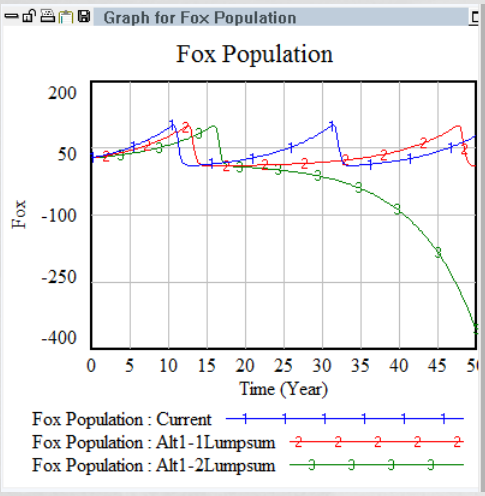
정책대안 비교분석: 대안1-1

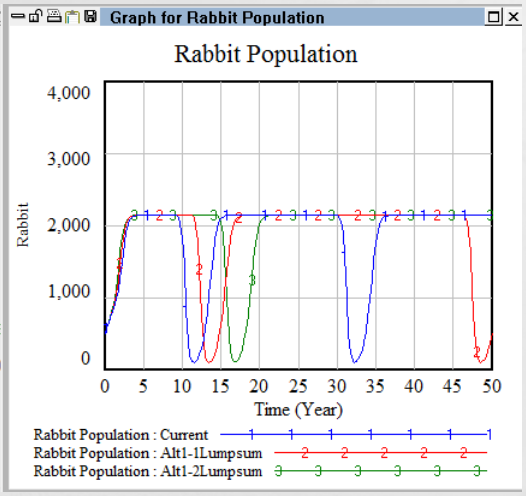




정책대안 비교분석: 대안1-2

- 대안1-2: Fox Death 를 1 (대안1-1) 대신 2로 증가시키면 어떤 결과가?

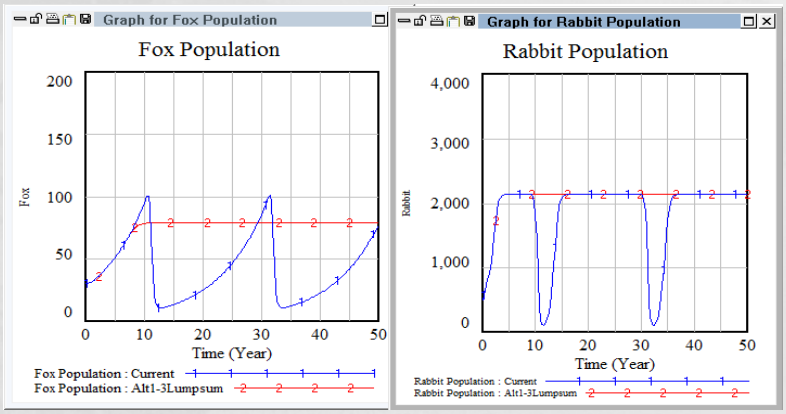




주: 실험시 Fox Population의 Lower Bound (vensim에서는 below로 표시) 에 대한 Warning Window 가 pop-up됨

정책대안 비교분석: 대안1-3

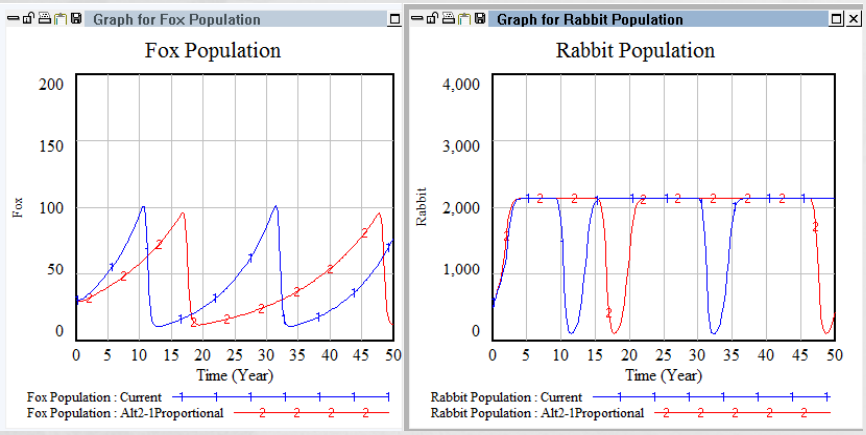
- 대안1-3: 현재 개체수에 일정비율만큼만 사냥이 허용됨(Lump-sum Quota)
  - Sketch(build) window에서 Policy Variable 이라는 보조변수 생성 후 값으로 70 입력
  - 생성된 보조변수 및 Fox Population 으로부터 Fox Hunted 에 화살표 연결
  - 값 대신 다음의 수식 입력: MAX (Fox Population - Policy Variable, 0)



주: 완벽한 개체수 관리가 가능하나 정보의 부정확성 및 딜레이 등으로 비현실적

정책대안 비교분석: 대안2-1

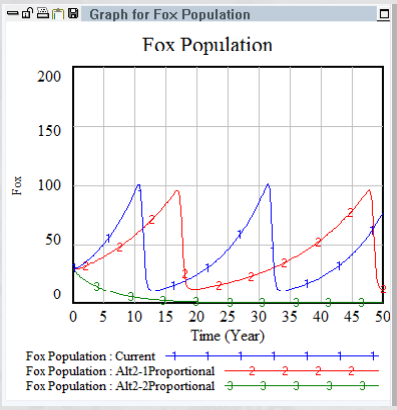
- 대안2-1: 현재 개체수에 일정비율만큼만 사냥이 허용됨(Proportional Quota)
  - Sketch(build) window에서 Policy Variable 0.05 입력
  - 값 대신 다음의 수식 입력: Fox Population * Policy Variable

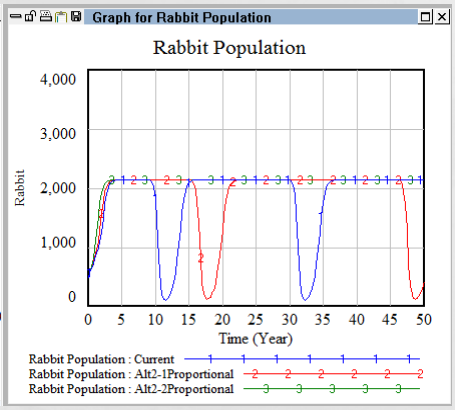


주: 이 경우 사망률을 높이는 결과와 같고, outflow를 discount함으로써 delay 증가효과 발생

정책대안 비교분석: 대안2-2

- 대안2-1: 현재 개체수에 일정비율만큼만 사냥이 허용됨(Proportional Quota)
  - Sketch(build) window에서 Policy Variable 0.15 입력

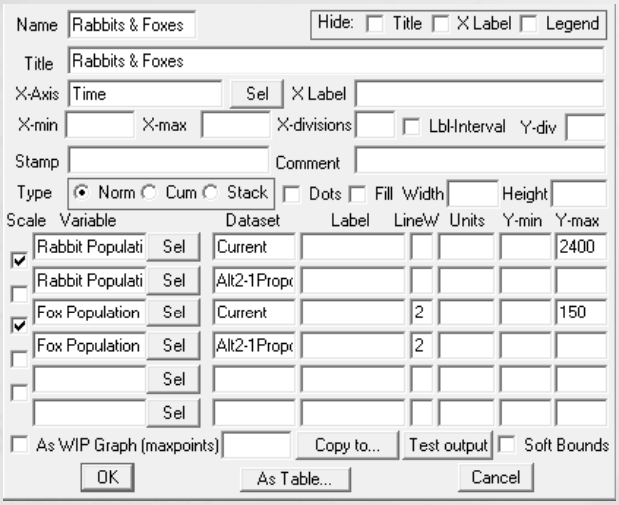




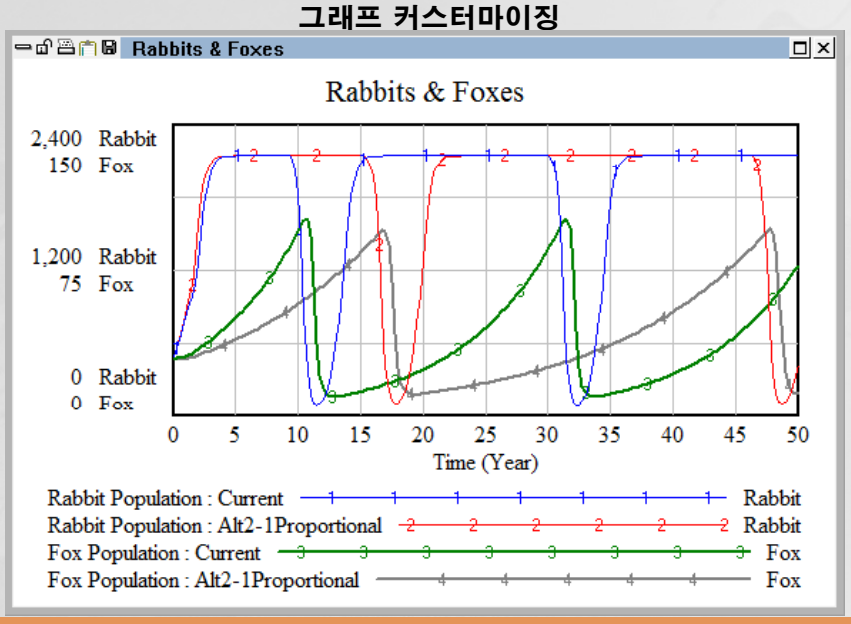
주: 대안1-2와 마찬가지로 과대한 사냥이 멸종을 야기, 만약 2번 커브와 3번 커브의 중간정도인 초기수준을 유지시키는 적정사냥 허용량은 과연 존재하는가? 존재하며 동적 안정상태 분석(steady-state analysis)을 통해 가능. 자세한 것은 생태계 모델에서 다룸

그래프 커스터마이징

- Custom Graph
  - Analysis Tool의 "Graph"는 축의 범위설정, 두 변수를 한 그래프로 표시 등이 불가능
  - 커스텀 그래프는 이러한 문제점들을 해결하기 위한 도구
- Custom Graph의 생성
  - 메뉴의 Windows>Control Panel 선택 혹은 Main Tool Bar의 맨 오른쪽 계기판 모양의 아이콘 클릭
  - Control Panel 윈도우의 맨 오른쪽 "Graph" 탭 클릭
  - 동 탭에서 New 버튼을 클릭하면 새로운 윈도우(Custom Graph Editor)가 팝업,
  - 다음과 같은 내용을 기입하면 새로운 그래프가 생성

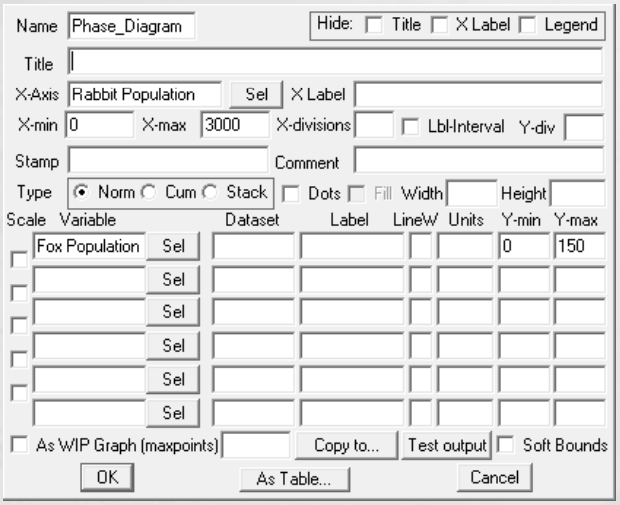


그래프 커스터마이징



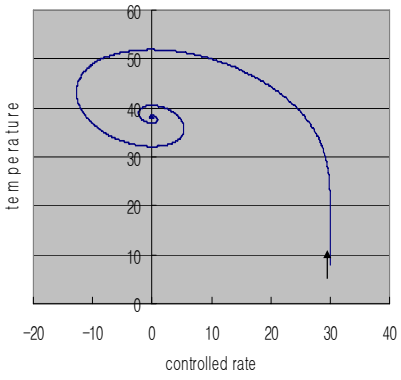
그래프 커스터마이징 연습

- Phase Portrait
  - 주요 state variable을 x, y축으로 설정, 시스템 경로 추적
  - 위상궤적은 미분방정식론 혹은 최적제어이론(Optimal Control Theory)에서 어떤 시스템이 동적 안정상태(steady-state solution, 혹은 attractors)를 갖는지 등을 보기 위한 도구로 종종 활용
  - 복잡한 연립미방의 SD분야에서는 끌개를 손으로 풀어서 구할 수 없는 경우가 많아 활용빈도가 낮음
  - 하지만 토끼 및 여우 예제와 같은 경우 개체수가 0이 아닌 끌개가 존재하는지 등 관심
  - 오른쪽과 같이 기입 후 생성되는 그래프 확인

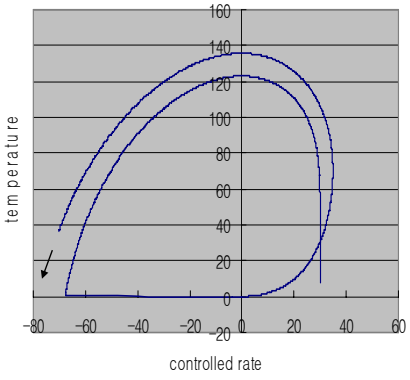


참고: Oscillation Mode의 Phase Portrait

Damping Oscillation (Delay가 적은 경우)
* attractor

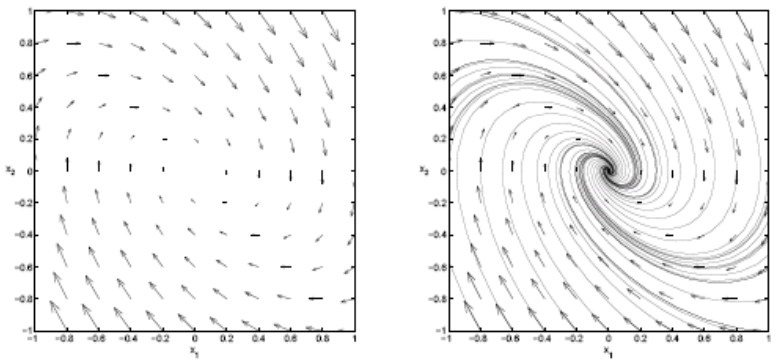


Expanding Oscillation (Delay가 큰 경우)
* Limit cycle



주: cyclic or expanding oscillations 과 같은 행태를 Limit Cycles 이라 칭함. 여기서 limit은 위와 같은 state space 에서 oscillation 이 특정 영역에 제한된다는 의미로서, 초기변동과정(initial perturbation)을 거친 후 제한된 영역에서 주기적인 움직임을 보임을 의미

참고: Oscillation Mode의 Phase Portrait



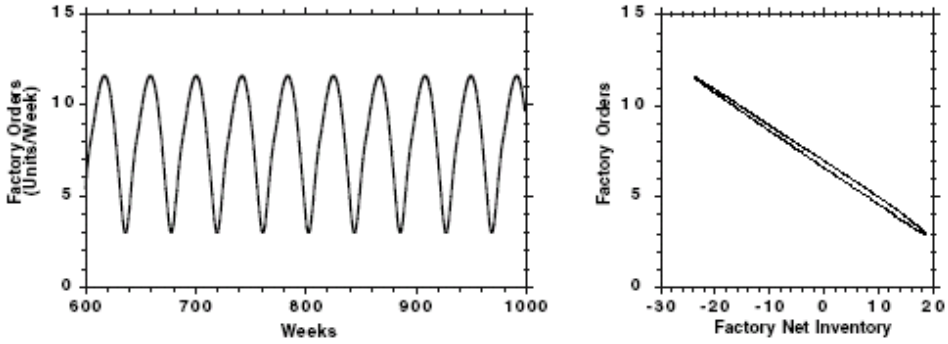
(a) (b)

Figure 3.2: Vector field plot (a) and phase portrait (b) for a damped oscillator. This plots were produced using the `phaseplot` command in MATLAB.

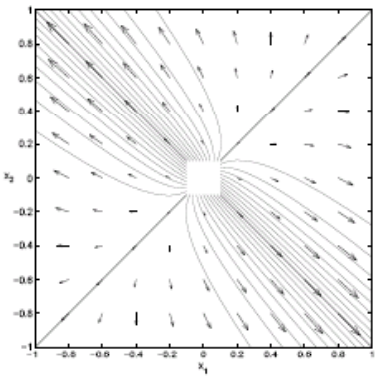
참고: Oscillation Mode의 Phase Portrait

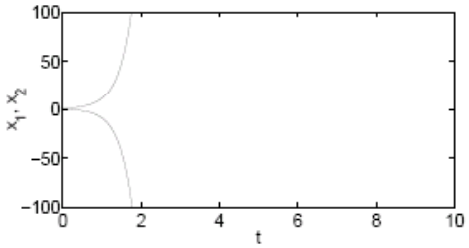
FIGURE 4-16 A limit cycle generated in the Beer Distribution Game

Left: Time series of factory orders. The cycle repeats indefinitely without any external variation. *Right:* The orbit of the system is a closed curve, shown here with factory orders plotted against net factory inventory (inventory less backlog).



참고: Instable Mode와 Phase Portrait



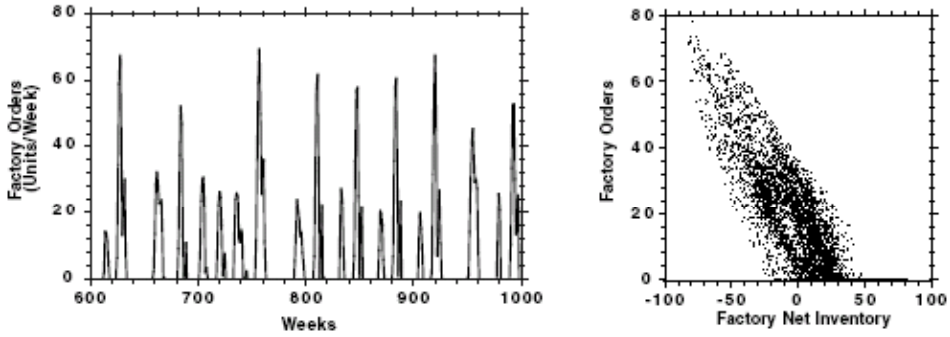


$$\dot{x}_1 = 2x_1 - x_2$$
$$\dot{x}_2 = -x_1 + 2x_2$$

Figure 3.6: Phase portrait and time domain simulation for a system with a single unstable equilibrium point.

참고: Chaotic Mode와 Phase Portrait

FIGURE 4-17 Chaos in the Beer Distribution Game
Left: Time series showing factory orders. *Right:* Phase plot showing orders vs. net factory inventory (inventory less backlog).



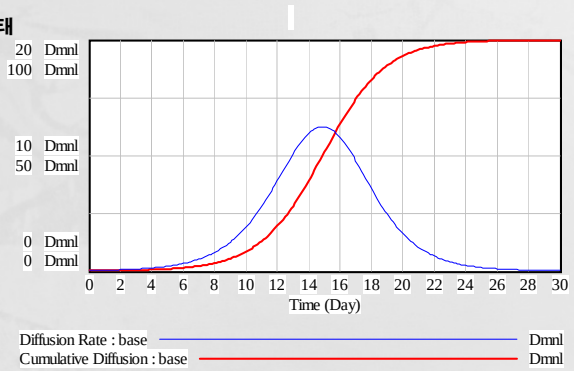
확산 모형 (Diffusion Model)

전재호
(충주대, jhjuhn@cjnu.ac.kr)

2011년 2월 14일

1. 확산 모형 개요

- 새로운 제품, 전염병, Idea(정책이슈) 등이 사회에 확산되는 과정을 설명하는 모형
  - (예) : 스마트폰 사용 확산, 구제역 확산
- 일반적으로 이러한 확산은 시간의 경과에 따라서
  - 확산율은 종형(Bell-Shaped) Curve
  - 누적 확산량은 S형(Sigmoid) Curve 형태
- 누적 확산량의 S형 성장
  - 확산의 잠재적 대상자가 유한함 → Carrying Capacity
  - 누적 확산량이 System의 Carrying Capacity에 비해 매우 적은 초기에는 양의 Feedback Loop가 시스템을 지배하다가,
  - Carrying Capacity에 도달해 감에 따라 음의 Feedback Loop가 시스템 지배하는 형태로 전이가 발생함으로써 S형 성장



2. 분석적(Analytic) S형 성장 모형

- 로지스틱 모형 (Logistic Model)
  - 벨기에 수학자 Verhulst가 1838년 발표
  - 분석이 간편하다는 장점 → 이후에 개발되는 다수 분석적 모형의 토대
- 로지스틱 모형의 한계
  - (h, C/2)를 중심으로 대칭형 그래프 → 현실의 성장행태는 대칭형이 아닌 경우가 일반적임
  - 현실의 인과관계를 모델에 반영하지 못함 (Operational Thinking 불가능)
- 기타 분석적 모형
  - Richards Model
  - Gompertz Model
  - Weibull Model
  - Bass Model

Logistic Model

$$P(t) = \frac{C}{1+\exp[-g(t-h)]}$$

$g = 1, h = 0$

$$\frac{P(t)}{C} = \frac{1}{1+\exp[-t]}$$

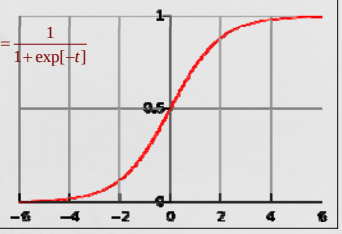
여기서, t : 임의 시점

$P(t)$: 시점 t 에서의 Population Size

C : Carrying Capacity

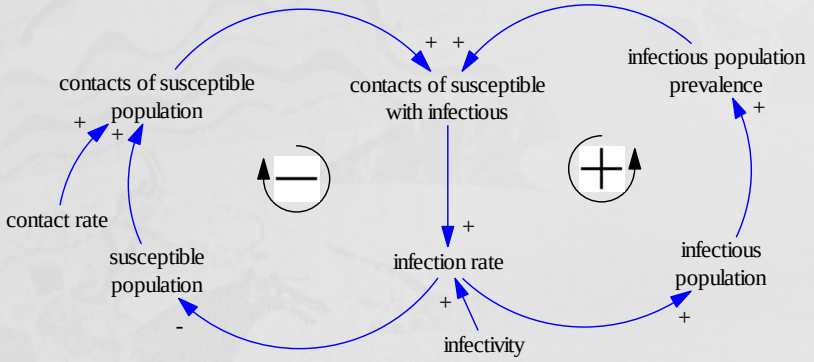
g : 최대 단위당 성장(확산)율

h : $P(h) = 0.5C$를 만족하는 시점



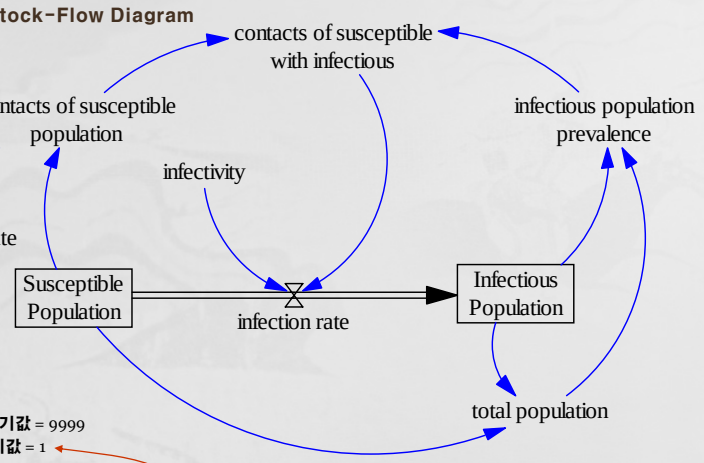
3. 단순 전염병 확산 모형 (1)

- 단순 전염병 확산 모형의 가정
  - 집단내 전체 인구 규모가 일정하다. → 출생, 사망, 이주가 없는 것으로 가정
  - 한번 감염되면 회복되지 않는다. → 사망에 이르지는 않지만, 회복되지 않는 고질병(Chronic Disease) 가정
  - 감염자들을 격리시키지 않는다.
  - 비감염자(감염가능자)들의 사회적 접촉율은 일정하다.
  - 전염성(Infectivity)은 평균적으로 일정하다.



3. 단순 전염병 확산 모형 (2)

- **단순 전염병 확산 모형의 Stock-Flow Diagram**



- **주요 Parameter 설정**
  - Initial time = 0
  - Final time = 30
  - Time Step = 0.125
  - Units for time = Day
  - Susceptible Population **초기값** = 9999
  - Infectious Population **초기값** = 1
  - contact rate = 3
  - infectivity = 0.25

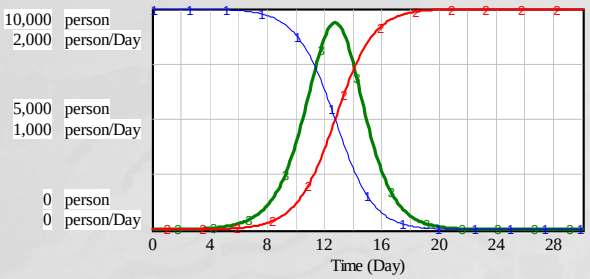
Infectious Population의 초기값이 1이상이어야 감염 발생

3. 단순 전염병 확산 모형 (3)

- **단순 전염병 확산 모형의 전체 수식**
  - contact rate=3, Units: 1/Day
  - contacts of susceptible population=Susceptible Population*contact rate, Units: person/Day
  - contacts of susceptible with infectious=contacts of susceptible population*infectious population prevalence, Units: person/Day
  - FINAL TIME = 30, Units: Day
  - infection rate=contacts of susceptible with infectious*infectivity, Units: person/Day
  - Infectious Population= INTEG (infection rate, 1), Units: person
  - infectious population prevalence=Infectious Population/total population, Units: Dmnl
  - infectivity=0.25, Units: Dmnl
  - INITIAL TIME = 0, Units: Day
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Day
  - Susceptible Population= INTEG (-infection rate, 9999), Units: person
  - TIME STEP = 0.125, Units: Day
  - total population=Susceptible Population+Infectious Population, Units: person

3. 단순 전염병 확산 모형 (4)

- 단순 전염병 확산 모형의 시뮬레이션 결과



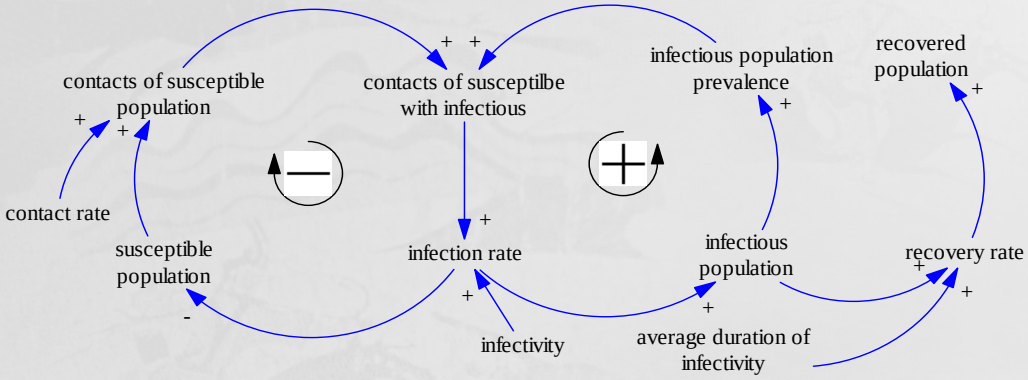
Susceptible Population : SI 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 person
Infectious Population : SI 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 person
infection rate : SI 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 person/Day

Logistic Model과 단순전염병 모형의 동일성

- 로지스틱 모형의 Net Growth Rate
  dP/dt = gP(1 - P/C)로 표기됨
- 단순 전염병 확산 모형의 Infection Rate
  Susceptible Population : S
  Infectious Population : I
  total population : C
  contact rate : c
  infectivity : i
  infection rate : IR로 표기하면,
  직전 slide의 모델수식으로부터
  IR = ciS(I/C), I=C-S이므로
  IR = ciS(1 - S/C)
- 여기서, P=S, g = ci로 보면 두 모형은 동일

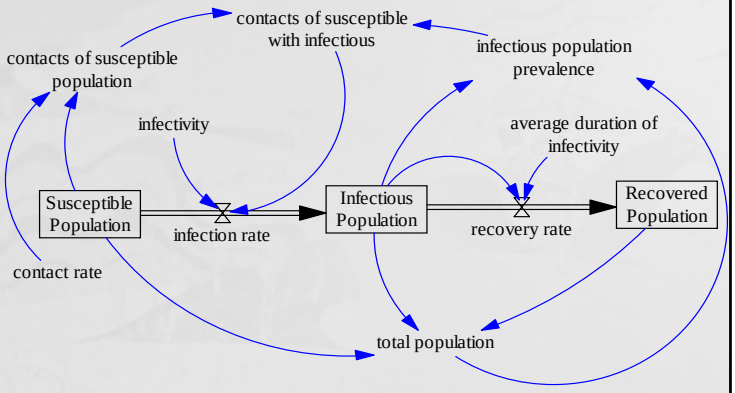
4. 급성 전염병 확산 모형 (1)

- 급성 전염병 확산 모형의 가정
  - 단순 전염병 확산 모형의 가정중에서 "한번 감염되면 회복되지 않는다."는 가정을 "감염 후 일정기간이 경과하는 회복하고, 회복 후에 영구면역을 갖는다"는 가정으로 변경
  - 그 이외의 가정들은 단순 전염병 확산모형과 동일



4. 급성 전염병 확산 모형 (2)

- 급성 전염병 확산 모형의 Stock-Flow Diagram



- 주요 Parameter 설정
  - average duration of infectivity = 2
  - contact rate = 6
  - Recovered Population **초기값**= 0
  - recovery rate = Infectious Population / average duration of infectivity
  - total population**식에** +Recovered Population **추가**
  - **나머지** parameter **설정은 단순전염병 확산 모형과 동일**

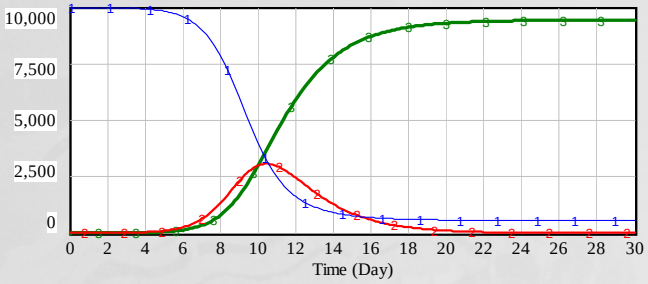
SI_simple epidemic disease.mdl 수정
수정후 SIR_recoverable epidemic disease.mdl로 저장

4. 급성 전염병 확산 모형 (3)

- 급성 전염병 확산 모형의 전체 수식
  - average duration of infectivity=2, Units: Day
  - contact rate=6, Units: 1/Day
  - contacts of susceptible population=Susceptible Population*contact rate, Units: person/Day
  - contacts of susceptible with infectious=contacts of susceptible population*infectious population prevalence, Units: person/Day
  - FINAL TIME = 30, Units: Day
  - infection rate=contacts of susceptible with infectious*infectivity, Units: person/Day
  - Infectious Population= INTEG (infection rate - recovery rate, 1), Units: person
  - infectious population prevalence=Infectious Population/total population, Units: Dmnl
  - infectivity=0.25, Units: Dmnl
  - INITIAL TIME = 0, Units: Day
  - Recovered Population= INTEG (recovery rate, 0), Units: person
  - recovery rate=Infectious Population/average duration of infectivity, Units: person/Day
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Day
  - Susceptible Population= INTEG (-infection rate, 9999), Units: person
  - TIME STEP = 0.125, Units: Day
  - total population=Susceptible Population+Infectious Population+Recovered Population, Units: person

4. 급성 전염병 확산 모형 (4)

- 급성 전염병 확산 모형의 시뮬레이션 결과

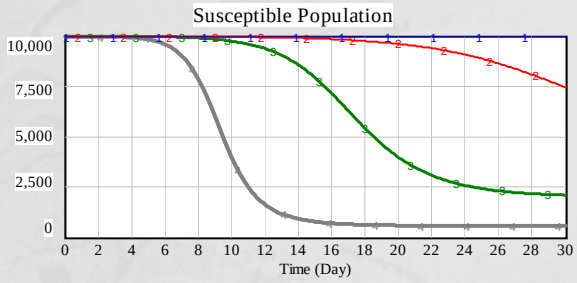


Susceptible Population : sir person
Infectious Population : sir person
Recovered Population : sir person

- Susceptible Population은 대부분이 감염된 후 회복됨
  - 집단내에 전염병 최초 감염자가 발생하기만 하면 항상 전체 집단에 본격적인 감염이 발생하는가?
- 소수이기는 하지만 감염되지 끝까지 감염되지 않는 개체의 존재
  - 끝까지 감염되지 않는 Susceptible Population의 규모는 어떤 요인에 의해 결정되는가?

4. 급성 전염병 확산 모형 (5)

- 급성 전염병 확산모형에서 전체 집단에 본격적인 감염이 발생하기 위해서는 infection rate > recovery rate
  - 편의상 infection rate : IR, recovery rate : RR , contact rate : c, infectivity : i, average duration of infectivity : d, Susceptible Population : S, Infectious Population : I, total population : C라고 하면
  - IR = ciS(I/C), RR = I/d
  - 따라서, IR > RR → ciS(I/C) > I/d → cid(S/C) > 1 일 때 본격적인 감염발생
  - 만일 cid(S/C) ≤ 1 이면 본격적 감염은 발생하지 않음
  - 이와 같이, System이 안정적인 상태(감염이 본격화되지 않은 상태)에서 불안정적인 상태(감염이 본격화되는 상태)로 변화되는 임계값을 Tipping Point라고 지칭

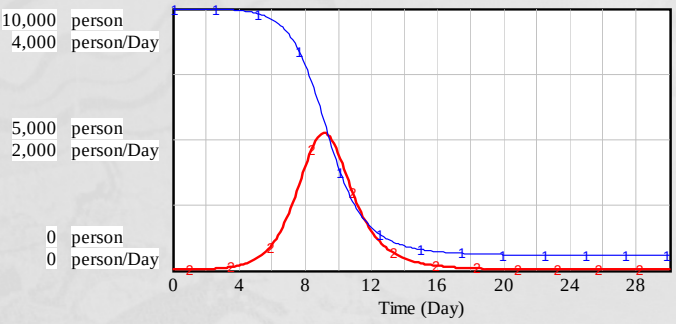


Susceptible Population : sir_c2 person
Susceptible Population : sir_c3 person
Susceptible Population : sir_c4 person
Susceptible Population : sir_c6 person

- 본격적인 감염발생 여부를 보기 위해 contact rate (c)값을 2, 3, 4, 6으로 변경했을 때, Susceptible Population의 변화

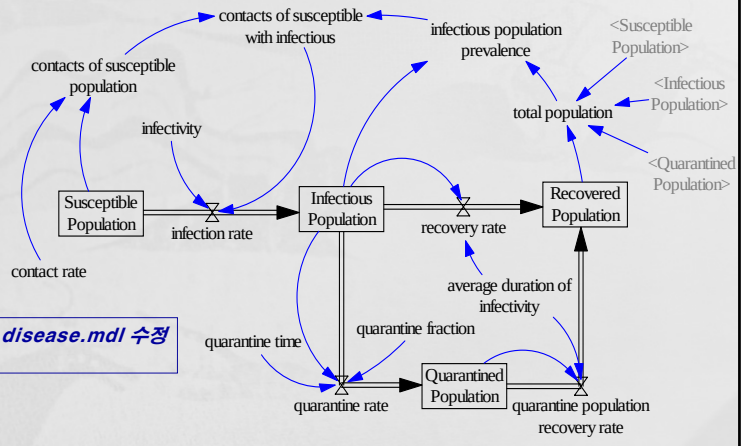
4. 급성 전염병 확산 모형 (6)

- 급성 전염병 확산모형에서 본격적인 감염이 발생한 후, System이 안정화된 이후까지 감염되지 않은 Susceptible Population 규모를 결정하는 요인
  - Tipping Point 계산식을 변형하면 cid = C/S
  - 주어진 c, i, d 값은 고정되어 있는 반면, 감염이 본격화 된 이후 시간의 경과에 따라 S는 감소하다가 cid = C/S가 성립하는 안정화 Tipping point 발생 → cid가 감염되지 않은 채 유지되는 S(susceptible population)규모를 결정하는 요인
    - c=6인 경우 cid = 6*0.25*2 = 3이므로 3=10000/S으로부터 S≈3333
    - 그러나, 실제로는 안정화 상태에서의 S값이 3333보다 상당히 작아짐 → 이는 susceptibles가 Tipping Point 시점 이후에도 감염자들과 계속 접촉하고, 결과적으로 감염발생이 지속됨에 기인한 결과



4. 급성 전염병 확산 모형 (7)

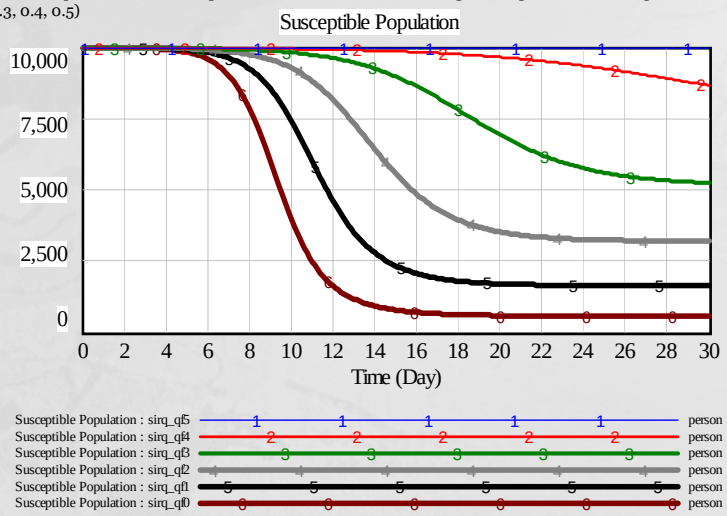
- 감염자중 일부를 격리하는 급성 전염병 확산 모형
  - 감염자중 격리되는 비율이 일정 (여기서는 0.25 가정)
  - 감염자 격리에 일정시간 소요 (1/2 Day 가정)
  - 격리는 완벽하게 이루어져서, 격리자 집단과 비감염자의 접촉은 이루어지지 않음
  - 격리자 집단의 평균감염기간도 비격리감염자 집단의 평균감염기간과 동일



SIR_recoverable epidemic disease.mdl 수정
SIR_quarantine.mdl로 저장

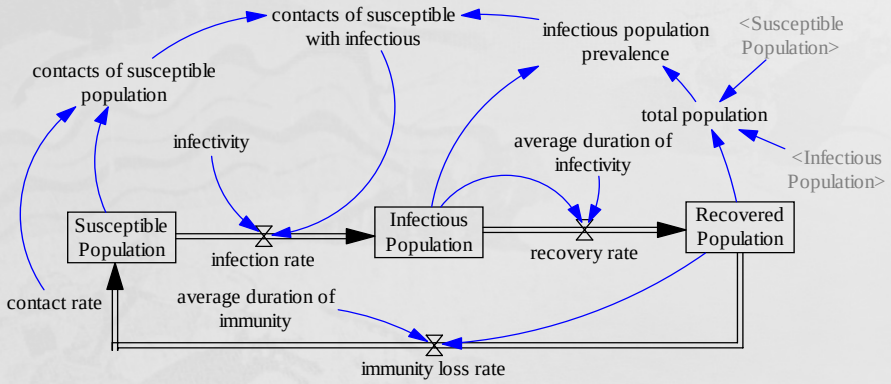
4. 급성 전염병 확산 모형 (8)

- 감염자중 일부를 격리하는 급성 전염병 확산 모형
  - 격리비율(quarantine fraction; qf)을 상이하게 설정함에 따른 Susceptible Population의 변화 (qf설정값 : 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)



4. 급성 전염병 확산 모형 (9)

- 회복자 집단의 영구면역성 가정을 완화한 급성 전염병 확산 모형
  - 회복자 집단이 갖는 면역성이 일정 시간 경과 이후 사라지는 상황을 [급성 전염병 확산 원 모형]에 반영하고,
  - 여러가지 [평균 면역지속기간값(average duration of immunity)]을 사용하여 시스템 행태를 고찰해보자.
    - 평균면역지속기간값을 30, 60, 90, 120 로 변경 설정
    - 시뮬레이션 기간을 360일로 설정



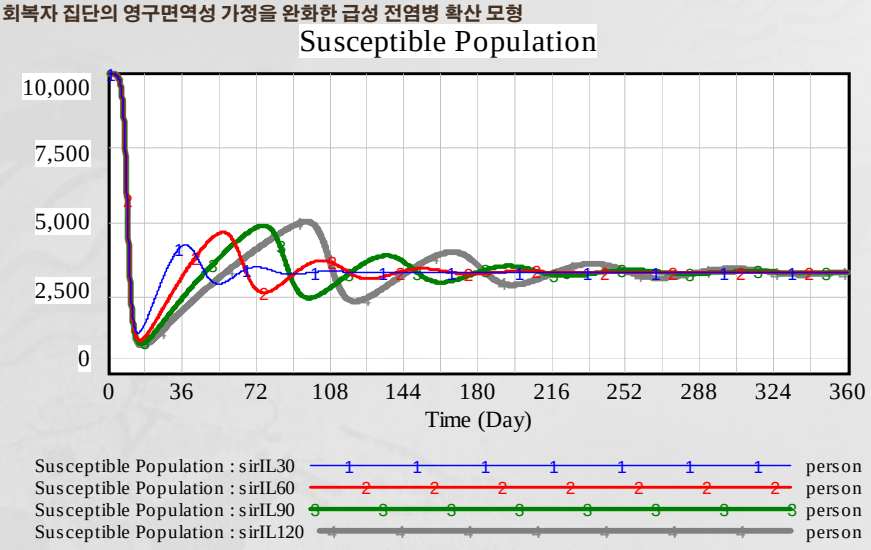
SIR_recoverable epidemic disease.mdl 수정
SIR_immunity loss.mdl로 저장

4. 급성 전염병 확산 모형 (10)

- 회복자 집단의 영구면역성 가정을 완화한 급성 전염병 확산 모형의 전체 수식
  - average duration of immunity = 90, Unit: Day
  - average duration of infectivity=2, Units: Day
  - contact rate=6, Units: 1/Day
  - contacts of susceptible population=Susceptible Population*contact rate, Units: person/Day
  - contacts of susceptible with infectious=contacts of susceptible population*infectious population prevalence, Units: person/Day
  - FINAL TIME = 360, Units: Day
  - immunity loss rate = Recovered Population/average duration of immunity, Unit: person/Day
  - infection rate=contacts of susceptible with infectious*infectivity, Units: person/Day
  - Infectious Population= INTEG (infection rate - recovery rate, 1), Units: person
  - infectious population prevalence=Infectious Population/total population, Units: Dmnl
  - infectivity=0.25, Units: Dmnl
  - INITIAL TIME = 0, Units: Day
  - Recovered Population= INTEG (recovery rate-immunity loss rate, 0), Units: person
  - recovery rate=Infectious Population/average duration of infectivity, Units: person/Day
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Day
  - Susceptible Population= INTEG (immunity loss rate-infection rate, 9999), Units: person
  - TIME STEP = 0.125, Units: Day
  - total population=Susceptible Population+Infectious Population+Recovered Population, Units: person

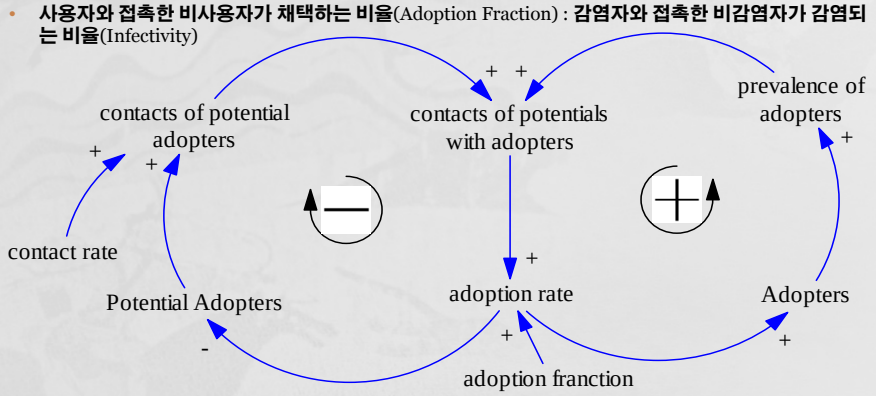
4. 급성 전염병 확산 모형 (11)

- 회복자 집단의 영구면역성 가정을 완화한 급성 전염병 확산 모형



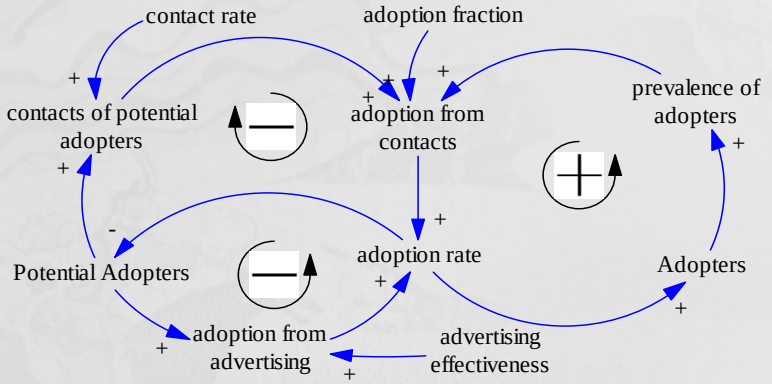
5. 단순 혁신 확산 모형

- 단순 혁신(신제품, 신서비스) 확산 모형
  - 단순 전염병 확산 모형과 완전히 동일
  - 규모가 일정한 집단내에서 신제품(신서비스)의 사용 확산과정을 모형화
  - 초기 채택자(사용자) : 전염병 모형의 초기 감염자에 대응
  - 사용자와 비사용자간의 접촉을 통해 비사용자의 사용을 유발 : 전염병 모형의 감염과정과 동일
    - Word of Mouth Effect
  - 사용자와 접촉한 비사용자가 채택하는 비율(Adoption Fraction) : 감염자와 접촉한 비감염자가 감염되는 비율(Infectivity)



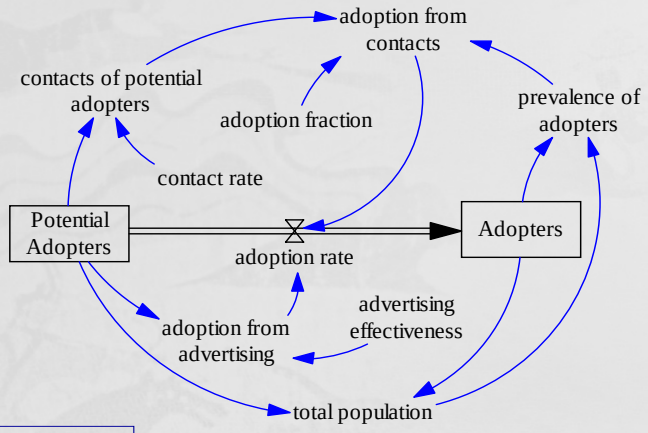
6. Bass 확산 모형 (1)

- 단순 혁신 확산 모형이나 전염병 확산모형에서는 확산이 일어나기 위해 최초 감염자(혹은 채택자)가 존재해야 함 → 모델 수식에 이를 인위적으로 설정하는 문제 (Startup Problem) 존재
- Bass 확산 모형에서는 광고를 통해 신제품의 초기 확산이 이루어지도록 함으로써, Startup Problem 해결
- 기본 Bass 확산 모형의 가정
  - 채택율 = 광고에 의한 채택율 + 접촉에 의한 채택율
  - 전체 집단규모 일정
  - 궁극적으로 집단내 모든 구성원이 채택하게 되고, 채택한 이후 영구적으로 사용



6. Bass 확산 모형 (2)

- **Bass 확산 모형의 Stock-Flow Diagram**
  - 1981년 ~ 1988년 Europe에서의 VAX11/750 Minicomputer의 확산형태를 적합화한 수식입력 (자료 : J. Sterman, Business Dynamics)



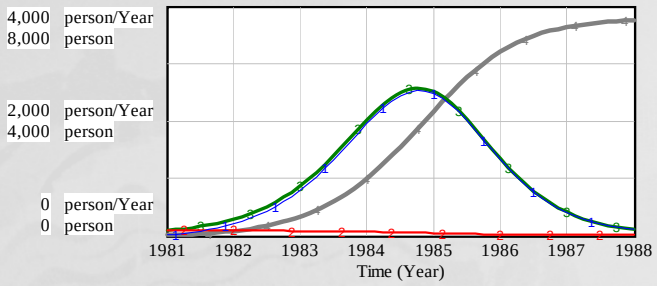
BASS_original.mdl 사용

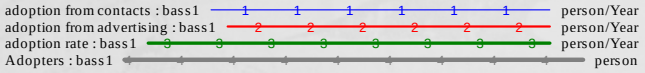
6. Bass 확산모형 (3)

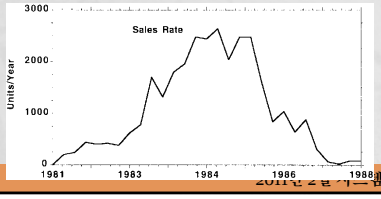
- **Bass 확산 모형 전체 수식**
  - Adopters= INTEG (adoption rate, 0), Units: person ← 초기값을 0으로 설정했음에 주의
  - adoption fraction=0.0133, Units: Dmnl
  - adoption from advertising=Potential Adopters*advertising effectiveness, Units: person/Year
  - adoption from contacts=contacts of potential adopters*prevalence of adopters*adoption fraction, Units: person/Year
  - adoption rate=adoption from contacts + adoption from advertising, Units: person/Year
  - advertising effectiveness=0.011, Units: 1/Year
  - contact rate=100, Units: 1/Year
  - contacts of potential adopters=Potential Adopters*contact rate, Units: person/Year
  - FINAL TIME = 1988, Units: Year
  - INITIAL TIME = 1981, Units: Year
  - Potential Adopters= INTEG (-adoption rate, 7600), Units: person
  - prevalence of adopters=Adopters/total population, Units: Dmnl
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Year
  - TIME STEP = 0.125, Units: Year
  - total population=Potential Adopters+Adopters, Units: person

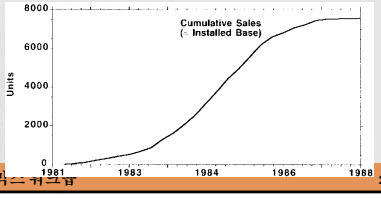
6. Bass 확산 모형 (4)

- 시뮬레이션 결과







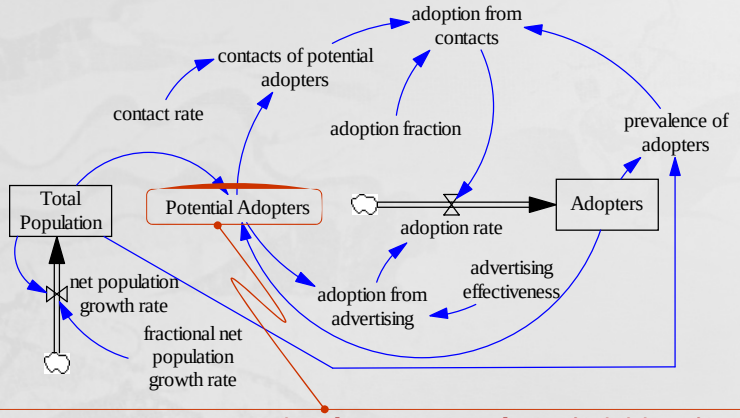


6. Bass 확산 모형 (5)

- Bass 확산 모형의 세부 가정
  - 총집단(총시장)규모 일정
    - 출생, 사망, 이주 등 인구통계학적 변경사항 미고려
    - 낮은 가격이 시장규모를 확장시키는 등의 시장 내부변화 미고려
    - 혁신의 속도가 매우 빠른 사례의 경우에는 적절하지만, 혁신의 수명주기가 긴 경우 부적절
  - 집단 구성원의 동질성 : 광고나 접촉(구전; Word of Mouth)에 대해 반응하는 경향이 동일
  - 한번 채택한 제품(혁신)은 영원히 사용
  - 광고와 접촉(Word of Mouth)만이 채택을 유발하는 요인이고 두 요인은 독립적
    - 채택비율 = 광고에 의한 채택비율 + 접촉에 의한 채택비율
  - 광고효과(advertising effectiveness) 일정 : 광고비용 일정 혹은 광고가 갖는 영향력 일정
  - 잠재적 채택자(비채택자)와 채택자간의 접촉율(contact rate) 일정
  - 접촉에 의한 채택비율(adoption fraction) 일정하고, 우호적인 입소문(Word of Mouth)만 존재
  - 경쟁의 부재 : 동일한(유사한) 제품(혹은 아이디어)의 상대적 매력도가 고정된 것으로 가정
  - 광고를 보거나 기채택자와 접촉한 이후 채택까지 시간지연 없음
  - 채택자와 채택대상을 별개의 Stock으로 구별하지 않음 : 한 채택자당 채택되는 제품수가 상수개임을 가정
  - 채택대상은 필요한 만큼 순식간에 획득가능 : 제품(혹은 서비스)의 생산능력 제약이 무한정이고, 조달소요시간이 0임을 가정

6. Bass 확산 모형 (6)

- 전체 인구의 순증가를 고려한 Bass 확산 모형 (1)
  - 모형의 단순화를 위해 출생, 사망, 이주 등을 통합한 비율변수 (net population growth rate)와 이를 누적하는 수준변수 (Total Population)을 추가 → 출생, 사망, 이주 등을 별개로 고려하는 모형으로의 확장은 매우 쉬움



Potential Adopters = Total Population - Adopters 이므로, [Potential Adopters]를 수준변수가 아닌 보조변수로 설정

BASS_original.mdl 수정 → 수정후 BASS_population growth.mdl로 저장

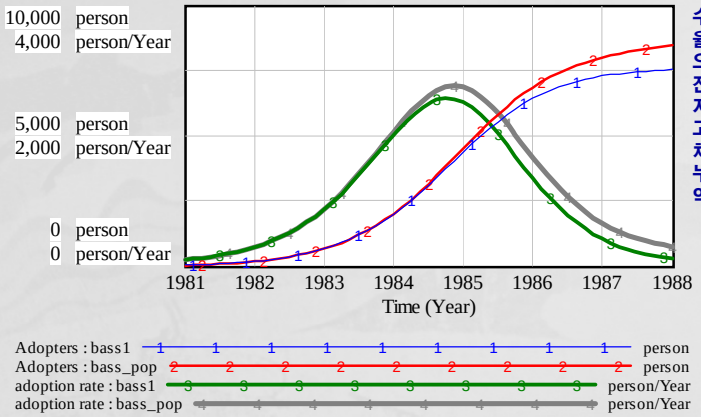
6. Bass 확산모형 (7)

- 전체 인구의 순증가를 고려한 Bass 확산 모형 (2) - 전체 수식
  - Adopters= INTEG (adoption rate, 0), Units: person
  - adoption fraction=0.0133, Units: Dmnl
  - adoption from advertising=Potential Adopters*advertising effectiveness, Units: person/Year
  - adoption from contacts=contacts of potential adopters*prevalence of adopters*adoption fraction, Units: person/Year
  - adoption rate=adoption from contacts + adoption from advertising, Units: person/Year
  - advertising effectiveness=0.011, Units: 1/Year
  - contact rate=100, Units: 1/Year
  - contacts of potential adopters=Potential Adopters*contact rate, Units: person/Year
  - FINAL TIME = 1988, Units: Year
  - fractional net population growth rate=0.019, Units: 1/Year
  - INITIAL TIME = 1981, Units: Year
  - net population growth rate=Total Population*fractional net population growth rate, Units: person/Year
  - Potential Adopters= Total Population - Adopters, Units: person
  - prevalence of adopters=Adopters/total population, Units: Dmnl
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Year
  - TIME STEP = 0.125, Units: Year
  - Total Population= INTEG (net population growth rate, 7600), Units: person

Potential Adopters = Total Population - Adopters 이므로, [Potential Adopters]를 수준변수가 아닌 보조변수로 설정

6. Bass 확산 모형 (8)

- 전체 인구의 순증가를 고려한 Bass 확산모형 (3) - 시뮬레이션 결과



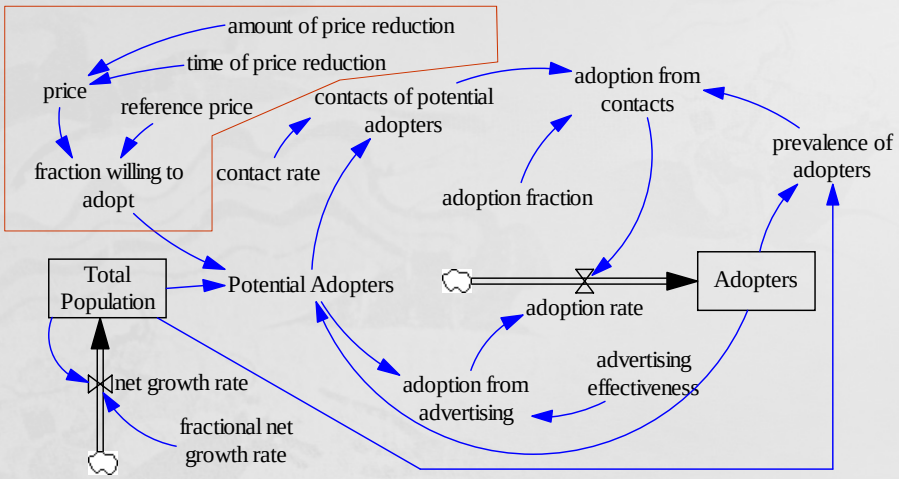
수식에서, 전체인구 순증가율을 0.019/Year로 입력함으로써,
전체 인구 순증가를 고려하지 않은 모델(bass1)보다 고려한 모델(bass_pop)의 채택율(adoption rate), 누적채택량(Adopters)이 약간씩 크게 나타남

6. Bass 확산 모형 (9)

- 가격하락에 따른 채택자 규모변화를 고려한 Bass 확산 모형 (1)
  - 확산이 진행되면 제품 가격이 하락하는 것이 일반적인 현상
    - 모형 설명을 위해 [미국의 유선방송 도입 초기 이후(1950년 ~ 2030년) 가입 확산사례] 사용 : J.D. Sterman, Business Dynamics, Irwin McGraw-Hill, 2000
    - 유선방송 가입의 기본단위 : 가구(Household)
  - 이전의 모형에서는 궁극적으로 집단 구성원 모두가 채택하는 것을 상정하고 있으나, 본 모형에서는 가격에 따라 전체집단의 일부분만이 채택하는 상황 고려
    - 이전모형 : Potential Adopters = Total Population - Adopters로 설정하였으나,
    - 현재모형 : Potential Adopters = fractional willing to adopt*Total Population - Adopters로 변경
  - 가격하락에 따른 채택가능성 상승을 반영하기 위해, 시장가격이 소비자의 기준가격보다 높으면 채택이 전혀 이루어지지 않고, 기준가격보다 낮아지면 채택가능성이 올라가는 형태를 가정
    - fractional willing to adopt = f (price/reference price)
      = MAX(0, MIN(1, 1-price/reference price))
    - 여기서, reference price = $200/month
      최초 price는 $100/month, 일정시점 이후 $25/month로 하락한다고 가정
      가격이 하락하는 시점을 다양하게 변경하면서 시뮬레이션
    - 가격효과에 집중하기 위해 전체 집단 규모는 변화하지 않는 것으로 설정
      - 전체 집단규모 = 100,000,000 household
      - 집단의 순증가율(net growth rate) = 0 household/year

6. Bass 확산 모형 (10)

- 가격하락에 따른 채택자 규모변화를 고려한 Bass 확산 모형 (2) - Stock-Flow Diagram



BASS_population growth.mdl수정 (수식 모두 변경) → 수정후 BASS_price reduction.mdl로 저장

6. Bass 확산모형 (11)

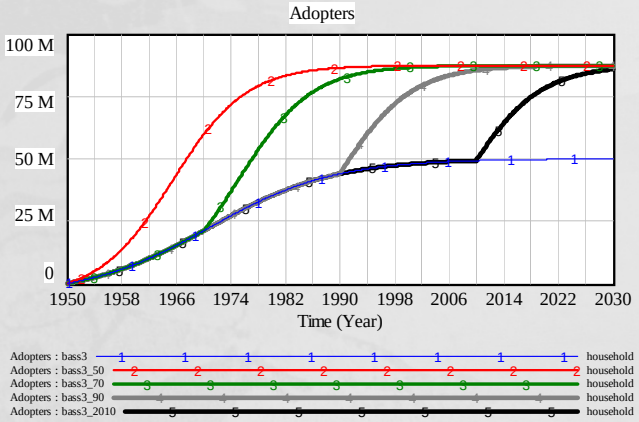
- 가격하락에 따른 채택자 규모 변화 고려한 Bass 확산 모형 (3) - 전체 수식 (이전 모형의 수식을 전체적으로 수정해야 함)
  - Adopters= INTEG (adoption rate, 0), Units: household
  - adoption fraction=0.02, Units: Dmnl
  - adoption from advertising=Potential Adopters*advertising effectiveness, Units: household/Year
  - adoption from contacts=contacts of potential adopters*prevalence of adopters*adoption fraction,Units: household/Year
  - adoption rate=adoption from advertising+adoption from contacts, Units: household/Year
  - advertising effectiveness=0.01, Units: 1/Year
  - amount of price reduction=75, Units: $/Month
  - contact rate=10, Units: 1/Year
  - contacts of potential adopters=Potential Adopters*contact rate, Units: household/Year
  - FINAL TIME [illegible]
  - fraction willing to adopt=MAX(0, MIN(1, 1-price/reference price)), Units: Dmnl
  - fractional net growth rate=0, Units: 1/Year
  - INITIAL TIME = 1950, Units: Year
  - net growth rate=Total Population*fractional net growth rate, Units: household/Year
  - Potential Adopters=MAX(0, fraction willing to adopt*Total Population - Adopters), Units: household
  - prevalence of adopters=Adopters/Total Population, Units: Dmnl
  - price=100 - STEP(amount of price reduction, time of price reduction), Units: $/Month
  - reference price=200, Units: $/Month
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Year
  - time of price reduction=1990, Units: Year
  - TIME STEP = 0.125, Units: Year
  - Total Population= INTEG (net growth rate, 1e+008), Units: household

fraction will to adopt값이 0이상 1이하가 되도록 MAX와 MIN함수를 조합해서 사용

가입을 희망하는 Potential Adopters가 음수가 되지 않도록 MAX함수 사용 : Model Robustness에 대한 고려

6. Bass 확산모형 (12)

- 가격하락에 따른 채택자 규모 변화 고려한 Bass 확산 모형 (4) – 시뮬레이션 결과
  - amount of price reduction=0인 기본 시뮬레이션을 수행
  - 이후, amount of price reduction값을 75로 변경설정하고, time of price reduction 값을 1950, 1970, 1990, 2010으로 변경하면서 시뮬레이션



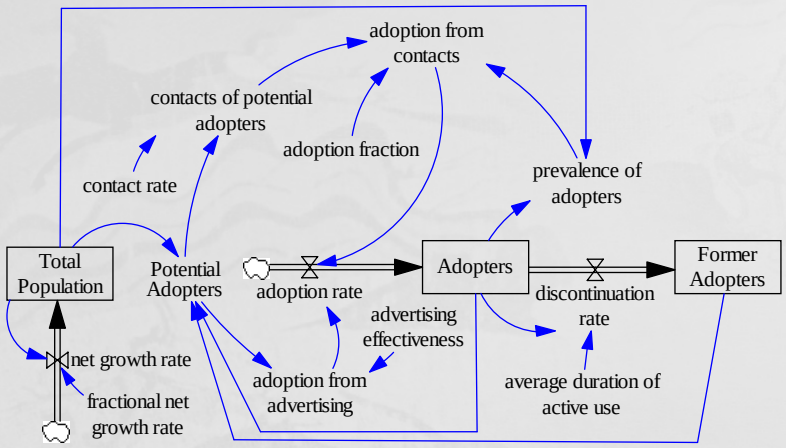
동일한 규모로 가격이 하락하면, 하락시점에 따라 Adopters 증가율이 높아지는 시점은 다르지만, 궁극적으로 도달하는 Adopters 총규모는 동일

6. Bass 확산 모형 (13)

- 사용중단을 고려한 Bass 확산 모형 (1)
  - 신제품이 일시적으로 유행한 이후 사용이 중지되는 현상을 반영 : 의류분야에서 가장 빈번하게 발생
    - 사용 중단자, 사용중단흐름을 각각 표시할 수준변수(Former Adopters), 비율변수 (abandonment rate) 추가
    - 현재 사용자들이 평균적으로 사용하는 기간 (average duration of active use)
    - 사용 중단자는 더 이상 제품 채택을 권장하지 않음 → adoption from contacts는 Adoptors들과 Potential Adopters간의 접촉에 의해서만 발생
  - 주요 parameter 재설정
    - average duration of active use = 1 year
    - abandonment rate = Adopters/average duration of active use
    - contact rate = 100 (1/year)
    - Former Adopter 초기값 = 0
    - Potential Adopters = Total Population – Adopters – Former Adopters
    - adoption fraction : 시뮬레이션 도중 3가지로 변경(0.01, 0.025, 0.001) (Dmnl)

6. Bass 확산 모형 (14)

- 사용중단을 고려한 Bass 확산 모형 (2) - Stock-Flow Diagram



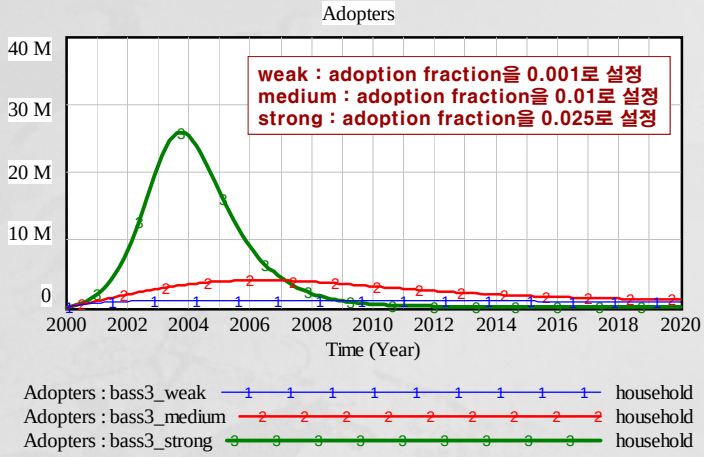
BASS_price reduction.mdl 수정 → 수정후 BASS_discontinuation.mdl로 저장

6. Bass 확산모형 (15)

- 사용중단을 고려한 Bass 확산 모형 (3) - 전체 수식
  - abandonment rate=Adopters/average duration of active use, Units: household/Year
  - Adopters= INTEG (adoption rate-abandonment rate, 0), Units: household
  - adoption fraction=0.01, Units: Dmnl
  - adoption from advertising=Potential Adopters*advertising effectiveness, Units: household/Year
  - adoption from contacts=contacts of potential adopters*prevalence of adopters*adoption fraction,Units: household/Year
  - adoption rate=adoption from advertising+adoption from contacts, Units: household/Year
  - advertising effectiveness=0.01, Units: 1/Year
  - average duration of active use=1, Units: Year
  - contact rate=100, Units: 1/Year
  - contacts of potential adopters=Potential Adopters*contact rate, Units: household/Year
  - FINAL TIME = 2020, Units: Year
  - Former Adopters= INTEG (abandonment rate,0), Units: household
  - fractional net growth rate=0, Units: 1/Year
  - INITIAL TIME = 2000, Units: Year
  - net growth rate=Total Population*fractional net growth rate, Units: household/Year
  - Potential Adopters=Total Population-Adopters-Former Adopters, Units: household
  - prevalence of adopters=Adopters/Total Population, Units: Dmnl
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Year
  - time of price reduction=1990, Units: Year
  - TIME STEP = 0.125, Units: Year
  - Total Population= INTEG (net growth rate, 1e+008), Units: household

6. Bass 확산 모형 (16)

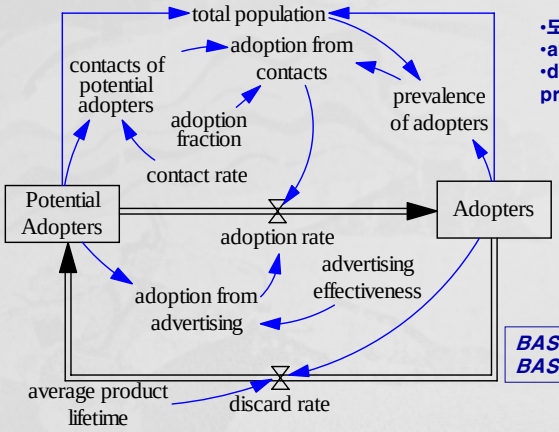
- 사용중단을 고려한 Bass 확산 모형 (4) – 시뮬레이션 결과
  - adoption fraction 을 변경함에 따라, 유행의 정도가 변화



• strong : 본격적인 확산에 의해 Potential Adopters가 빠른시간내에 Adopters가 되고, 다시 Former Adopter가 됨
• medium : 광고효과와 약간의 접촉효과에 의해 서서히 Potential Adopters가 Adopters로 변환되면서 오히려, 긴 시간동안 Adopters가 유지됨 (광고가 지속됨에 유의)
• weak : adoption fraction이 접촉에 의한 확산을 유발하기에는 너무 작아서, 광고효과에 의해서만 Adopters가 발생하므로 매우 적은 Adopters 규모가 지속됨

6. Bass 확산 모형 (17)

- 대체구매를 고려한 Bass 확산 모형 (1)
  - 원래의 Bass 모형은 제품을 1회 구매하는 상황만 고려하고, 제품의 소모 혹은 upgrade필요성 등에 의한 재구매(대체구매; replacement purchase)는 고려하지 않음
  - 대체구매가 필요한 상황 모형화 필요
    - 단순화를 위해, 제품의 평균사용시간(average product lifetime) 이후 대체구매 가정



•모델의 Final Time을 1995로 변경
•average product lifetime = 5 (year)
•discard rate = Adopters/average product lifetime (person/year)

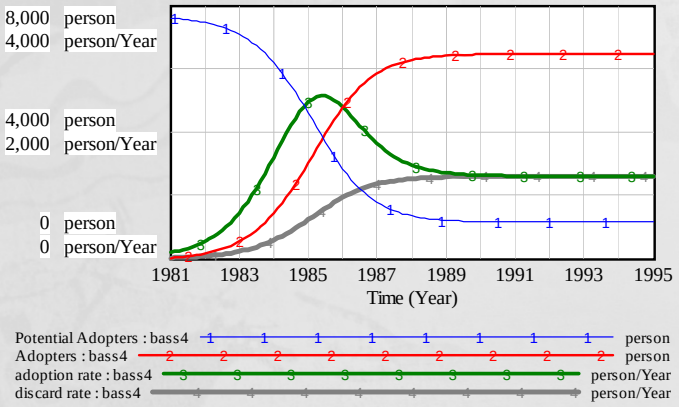
BASS_original.mdl 수정 → 수정후 BASS_replacement purchase.mdl로 저장

6. Bass 확산모형 (18)

- 대체구매를 고려한 Bass 확산 모형 (2) – 전체 수식
  - Adopters= INTEG (adoption rate-discard rate, 0), Units: person
  - adoption fraction=0.0133, Units: Dmnl
  - adoption from advertising=Potential Adopters*advertising effectiveness, Units: person/Year
  - adoption from contacts=contacts of potential adopters*prevalence of adopters*adoption fraction, Units: person/Year
  - adoption rate=adoption from contacts + adoption from advertising, Units: person/Year
  - advertising effectiveness=0.011, Units: 1/Year
  - average product lifetime=5, Units: Year
  - contact rate=100, Units: 1/Year
  - contacts of potential adopters=Potential Adopters*contact rate, Units: person/Year
  - discard rate=Adopters/average product lifetime, Units: person/Year
  - FINAL TIME = 1995, Units: Year
  - INITIAL TIME = 1981, Units: Year
  - Potential Adopters= INTEG (discard rate-adoption rate, 7600), Units: person
  - prevalence of adopters=Adopters/total population, Units: Dmnl
  - SAVEPER = TIME STEP, Units: Year
  - TIME STEP = 0.125, Units: Year
  - total population=Potential Adopters+Adopters, Units: person

6. Bass 확산 모형 (19)

- 대체구매를 고려한 Bass 확산 모형 (3) – 시뮬레이션 결과
  - **Adopters가 일정기간 이후 현재제품을 폐기하고, 재구매를 위해 Potential Adopters가 되므로 Potential Adopters가 완전히 소진되지 않음**
  - **제품 사용기간이 길고, 제품의 특성이 급격히 변화해서, 재구매자의 구매 경향이 신규 구매자의 구매 경향과 차별화되지 않는 경우에 적합**



SD 기본모형: 생태계 모델

Mathematical Biology 의 원리에 대한 System Dynamics 적용

전대욱
(한국지방행정연구원, dujeon@krila.re.kr)

2011년 2월 14일

(본 자료는 Vensim PLE를 대상으로 하며 PLE Plus, Professional, DSS 등에서 제공하는 기능들은 설명하지 않았습니다)

Population Dynamics

- Population Dynamics
  - Wiki: 인구 혹은 개체수에 대한 동역학은 생명과학의 한 분야로서 장단기에 걸친 인구규모 및 연령구조의 변화 및 그러한 변화를 야기시키는 생태환경적 과정에 관한 이론
    - PD는 birth 및 death rates, immigration과 emigration, ageing structure, population decline 등이 주요 이슈
    - PD의 기본구조: 인구 P, 출생 B, 사망 D, 유입 I, 유출 E 에 대해

$$P_t = P_{t-1} + B - D + I - E \quad \text{(이산형)}$$

$$\dot{P} = \frac{dP}{dt} = B - D + I - E \quad \text{(연속형)}$$

- Population Dynamics의 활용례
  - 생태학, 농림수산 등 자원환경 경제학 등에서 개체수 동역학을 활용
    - 개체수(자원량)의 변화모델에 입각하여 지속가능 수확량 등을 산정하는데 활용
  - 또한 도시공학 등 전형적인 Urban Dynamics와 같은 경우 사회적 유출입에 대한 PD의 기본구조에 기반한 모델링이라고 볼 수 있음
    - 특정도시에서 인구의 자연적인 출생 및 사망 외에, 취업 및 주거 등의 매력도(수급비율)와 같은 사회적인 요인에 의해 해당 도시로의 유입(immigrant), 유출(emigrant)에 따라 도시의 성쇠를 도시인구의 측면에서 논함

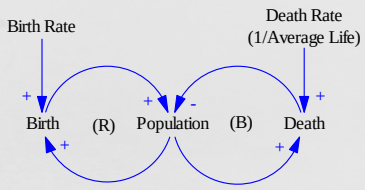
Math Background

- 미분방정식 (SD에서는 Flow Equation)
  - 방정식은 y = ax + b 와 같이 기지의 a, b, y에 대해 미지의 x를 구하기 위한 것임
  - 미분방정식은 이러한 방정식 내에 미분계수가 포함, 예컨대 y' = ay + b 와 같이 방정식 내에 미지수 y와 y의 미분도함수(y')가 동시에 포함되어 이 식을 푸는 것은 일반 방정식을 푸는 것과 달리 적분 등을 활용해서 풀어야 함
- y' 의 의미: 여기서는 변수 y 대신 P를 사용
  - 다음과 같은 식을 차분방정식(점화식, 축차방정식)이라 함: $P_t = aP_{t-1} + b$
    - 여기서 차분(difference)이란 P_t와 P_{t-1}의 변화를 의미 $\frac{P_t - P_{t-1}}{1} = (a-1)P_{t-1} + b$
    - 위 식은 다음과 같이 변형할 수 있음:
    - 만약 1기간의 차이 대신 dt 만큼의 차이를 가정: $\frac{P_t - P_{t-\Delta t}}{dt} = (a-1)P_{t-\Delta t} + b$
  - 미분(differential): 이러한 차분에서의 Δt를 무한히 작게 만든 것을 의미
    - 즉, $\dot{P} = \frac{dP}{dt} \equiv \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_t - P_{t-\Delta t}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0}(aP_t + b)$ 이면, 간단히 $\dot{P} = aP + b$
    - 의미: P의 시간에 따른 변화량(P')은 P의 함수, 혹은 level P의 flow (P')는 P의 함수
    - SD S/W에서의 Flow Equation: $P_t = P_{t-dt} + [aP + b] \cdot dt$ 혹은 $P = \int [aP + b, P_0]$

Simple Birth & Death

- 출생과 사망
  - 출생률(번식률) : 성체 1개체의 번식결과 다음세대의 개체수
    - 예컨대 개구리 1마리가 알을 낳았을 때의 산란률, 암수 1쌍의 수정성공률, 알이 성공적으로 부화할 부화율, 올챙이가 성체가 될 때까지의 생존률 등이 모두 출생률과 관련
    - Dynamic Hypothesis: 특정시기 신규발생 개체수는 전체 개체수와 출생률에 비례
  - 사망률(소멸률) : 전체 population size 중 매 시점에서 죽는 개체의 비율, 1개체의 평균수명의 역수
    - 예컨대 박테리아의 수명이 평균 1주일인 경우, 특정요일의 박테리아 집단 전체적으로 수명이 많이 남은 개체도 존재하며 반대로 수명이 얼마 남지 않은 개체도 존재하는데, 이 경우 특정일 동안 전체 개체 중 사망하는 수는 평균적으로 1/7이 됨
    - Dynamic Hypothesis: 특정시기 소멸 개체수는 전체 개체수와 사망률에 비례
  - CLD 및 Flow Equation : b는 출생률, d는 사망률

$$\dot{P} = B - D = bP - dP = (b-d)P$$

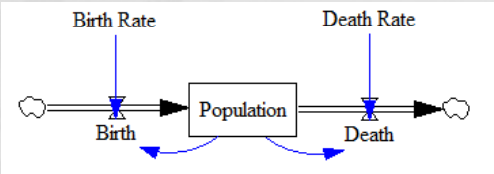


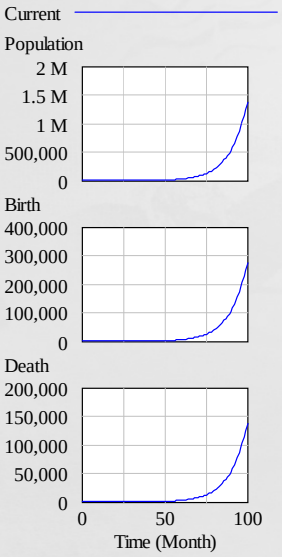
  - System Thinking
    - (b-d)가 0보다 크면 항상 증가(지수적 증가)
    - 0이면 동적 안정상태, 0보다 작으면 멸종

Simple Birth & Death

- Vensim을 활용한 예제 :

$$\dot{P} = (0.2)P - (0.1)P \quad \text{where} \quad P_0 = 100$$

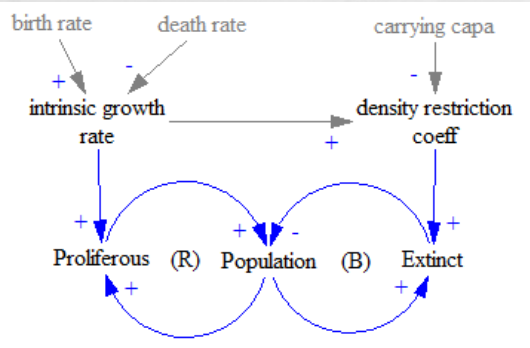




- Discussion :
  - 현실적인가? 아니오.
    - Carrying capacity
  - 만약 초기값을 변화시키면 어떤 결과가?
    - 초기값이 각각 200, 10, 0인 경우

S-Shape Growth

- 확산모형의 플로우
  - 전통적인 Logistic Curve의 flow equation : $\dot{P} = rP\left(1 - \frac{P}{K}\right) = rP - \frac{r}{K}P^2$
    - r은 본원적 성장률(intrinsic growth rate), K는 한계용량(carrying capacity)
    - 위 식은 r/K = k 로 치환하여 간단히 표현 : $\dot{P} = rP - kP^2$
  - 두 flows의 의미
    - Inflow : r은 순증식률 혹은 순출생률로서 (b-d)로 해석
    - Outflow : k 는 한계용량 대비 순증식률로서 비선형 밀도제약 (density constraint) 계수
    - 예컨대 박테리아(수명 5일) 1개체가 하루동안 1개체씩 증식하면 r = 1 가 되며, 박테리아가 증식할 수 있는 유리병의 용량은 최대 5만개체 라면 k = 1 / 50000 = 0.00002
  - CLD : 오른쪽 그림 참조



S-Shape Growth

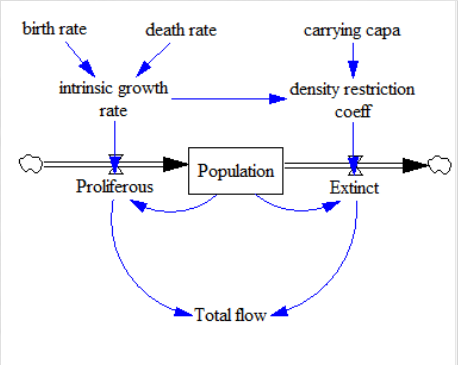
- Logistic Behavior의 System Thinking
  - Balancing loop가 2차식의 함수형태인 비선형 구조에 유의
  - 한계용량 대비 개체수가 적을 때,
    - 개체수(P)가 크지 않다면 P와 P^2의 차이보다 r과 k의 차이가 큼: $rP > kP^2$
    - 따라서 왼쪽의 R루프가 지배적 루프(dominant feedback loop) : Exp growth mode
  - 개체수가 한계용량에 근방에 있을 때,
    - 개체수(P)가 크면 P와 P^2의 차이가 r과 k의 차이보다 큼: $rP < kP^2$
    - 따라서 오른쪽의 B루프가 지배적 루프 : Goal-seeking mode
  - 전환점: 지배적 루프의 변환을 야기($rP = kP^2$)시키는 P값
  - 개체수의 변화가 없는 동적 안정상태(Steady-state):

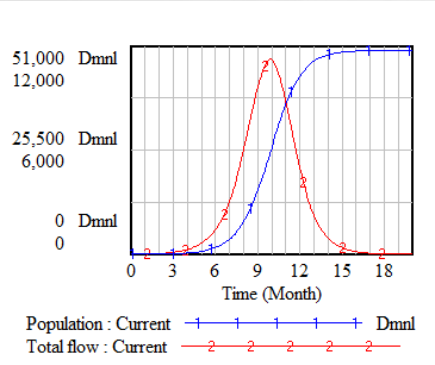
$$\dot{P} = 0, \text{ i.e. } 0 = rP - kP^2 \quad \therefore P = 0 \text{ or } P = \frac{r}{k} = \frac{r}{r/K} = K$$

    - 여기서 P=0인 점은 개체수가 0일때 증식도 소멸도 발생 불가능: 자명해(trivial solution)
    - P=K 는 시스템의 동적 안정상태에 대한 안정적(stable)인 유일해(unique solution)

Example of S-Shape Growth

- Vensim을 활용한 예제

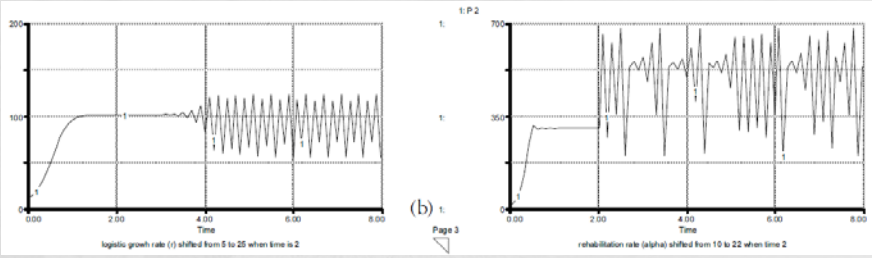




- Discussion
  - 초기조건의 변동: 동적 안정상태로 수렴하는 경로(trajectory) 상의 한 점에서 출발
  - 파라메터의 변동: 한계용량 K는 S커브의 height, 본원성장률 r은 수렴속도를 결정
  - 극단값 실험: r = 20 으로 바꾼 결과는?

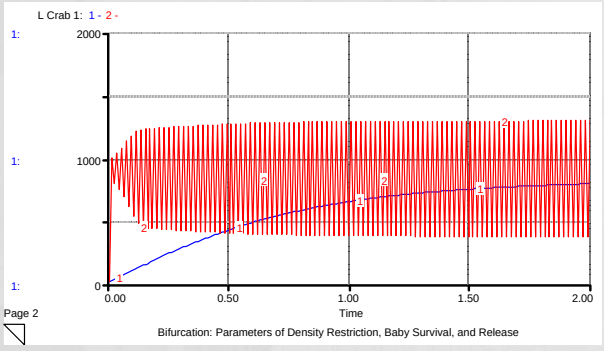
Chaotic Behavior in Logistic Curve

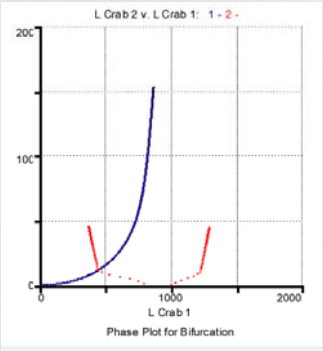
- [참고] Bifurcation
  - 직전의 극단값 실험의 분기현상(bifurcation)은 시스템의 동적안정해가 단일점이어야 함에도 불구하고 2^n개로 갈라지는 현상으로, 카오스적 행태를 일컫음
    - 일반적으로 한 점으로 수렴하지 않고 진동발산하는 cyclic & expanding oscillation의 행태를 보이는 경우와는 다름. 즉, 파동은 규칙성이 존재하나 분기현상은 복수개의 균형점으로 (표면적으로는) 불규칙하게 변동 (5일차 시뮬레이션분석 마지막 파동과 카오스의 phase portrait 참조)
    - 즉 flow equation이 비선형(2차 이상)인 경우 발생하는데, 로지스틱 커브의 경우 본원적 성장률 r이 큰 경우에 발생
    - 하기 그림은 로지스틱 곡선에서 균형점이 4개, 16개로 분기된 결과



Chaotic Behavior in Cohort Structure

- [참고] Bifurcation
  - 다음에서 설명될 Cohort 구조를 취한 모델의 분기현상
    - 미성숙 개체(붉은 선은 미성숙 개체수)가 일정 시간이 지나서 성숙 개체(파란 선은 성숙개체수)로 성장하는 과정에서, 미성숙 개체수의 증식을 인위적으로 크게 증가시켰을 때 분기 발생
    - 오른쪽 phase portrait에서 붉은 선이 두 개로 갈라짐: 어떤 시점에서는 왼쪽에 있다가 어떤 시점에서는 오른쪽에 있다가 불규칙하게 반복





Cohort Structure

- 개체수를 연령에 따른 몇 개의 그룹으로 구분하는 경우
  - 예컨대 특정 생태종의 자원량(biomass)에 관한 적정 개체수 관리를 목적으로 population dynamics가 필요하다면, 다음과 같은 실제적 목적을 지니는 경우가 많음
    - 성체를 수확하거나 채집, 사냥하는 경제적 목적, 유체를 incubating (양식 혹은 자연복원 등), 기후변화 등으로 급증한 개체수가 인간에게 피해를 입히는 경우 등
    - 인간이 생태계에 개입하는 경우에 대한 모델링: 수확, 사냥, 로드킬, 양식, 복원 등
    - 생태계뿐만 아니라 인간집단에서도 구분이 필요, 예컨대 조직에서의 직급별 구분 등
- 코호트 구조
  - "cohort"란 특정 속성을 공통적으로 지니고 있는 집단을 의미
    - 즉 동일 개체군 내에서 연령, 성별, 직업, 유전적 특성 등 특정 속성을 지닌 집단간 질적 차이를 반영하기 위하여 전체를 몇 개의 집단으로 분리, 개별적인 (그러나 상호 연결된) 모델링을 시도
  - 코호트 모델링의 고려사항:
    - 특정 집단간 개체군에 대한 level var의 분리(subscript나 array 활용) 및 집단간의 이동(성숙, 병의 완치 등으로 인한 속성의 변동), 특정 집단내 정책실험 등에 대한 flow equation의 고려
    - 기존 통합된 개체수에 기반한 의사결정 구조를 분화된 수준변수들에 맞도록 개편하는 등 각종 보조변수들에 대한 모델 커스터마이징 필요

Modeling Cohort Structure

- 모델링 사례: 멸종된 민물참게 복원(치게 방류 및 성게 수확)
  - Dynamic hypotheses
    - 치게는 성게의 산란 후 부화-유생-치게로 성장: 신생 치게 개체수는 성게 개체수에 비례
    - 치게는 성숙기간을 거쳐 성게로 편입, 성게는 일정기간 후 자연사망
    - 인간은 성게 개체수의 일정 비율만큼 매기 수확하며, 안정적인 수확을 위해 수확된 성게에 비례하여 인공사육조에서 부화 및 성숙시킨 치게를 강에 방류
    - 성게는 어린 치게를 잡아먹는 공식(cannibalism) 행태를 보일 수 있으며, 공식되어 희생되는 치게의 양은 치게 및 성게 각각의 개체수가 많으면 많을수록 증가 (밀도제약 대체)
  - 미성숙 단계인 치게(P_1)와 성숙단계인 성게(P_2)로 구분

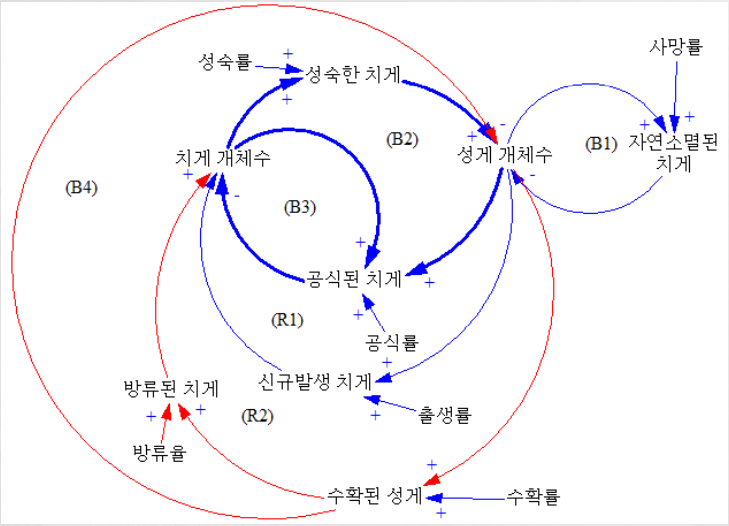
$$\dot{P}_1 = bP_2 - mP_1 - cP_1P_2 + ahP_2, \quad \dot{P}_2 = mP_1 - dP_2 - hP_2$$

    - 치게관련 파라메터: 출생률 b, 성숙률 m, 공식률(cannibalistic coeff) e, 방류율 a
    - 성게관련 파라메터: 사망률 d, 수확률 h
    - [참고] 상보효과(recruitment relationship b.w mature & immature) 등 다양한 집단간 상호작용의 모델링도 가능

$$\dot{P}_1 = b_1P_1\left(1 - k_1\frac{P_1}{P_2}\right) - h_1P_1, \quad \dot{P}_2 = b_2P_2\left(1 - k_2\frac{P_2}{P_1}\right) - h_2P_2$$

Modeling Cohort Structure

- CLD 및 System Thinking
  - 전통적 출생 및 사망: R1, B1
  - 공식행태의 조절기능 : B2, B3 (생태계의 동적안정 회귀능력)
  - 인위적 루프 1 - 수확 : R2
  - 인위적 루프 2 - 방류: B4



Modeling Cohort Structure

- 동적 안정상태 분석(Steady-State Analysis)
  - 모델: $\dot{P}_1 = bP_2 - mP_1 - cP_1P_2 + ahP_2,\quad \dot{P}_2 = mP_1 - dP_2 - hP_2$
  - 동적안정조건: P_1'=0 및 P_2'=0 이 동시에 성립

$$0 = bP_2 - mP_1 - cP_1P_2 + ahP_2,\quad 0 = mP_1 - dP_2 - hP_2$$

$$\Rightarrow\quad 0 = (b+ah)P_2 - mP_1 - cP_1P_2,\quad 0 = mP_1 - (d+h)P_2$$

두번째 식 $P_1 = \left(\frac{d+h}{m}\right)P_2$ 를 첫번째 식에 대입

$$\Rightarrow\quad 0 = [(b+ah)-(d+h)]P_2 - \frac{c(d+h)}{m}P_2^{\,2}$$

단순한 형태의 2차 방정식이므로 해를 풀면

$$\therefore\ P_2 = 0 \quad \text{or} \quad \frac{m}{c}\left(\frac{b+ah}{d+h} - 1\right)$$

$$P_1 = 0 \quad \text{or} \quad \frac{(b+ah)-(d+h)}{c}$$

  - (b + ah) > (d + h) 일 때 0보다 큰 동적 안정해가 존재
    - (b + ah) : 치게의 자연출생률과 인위출생률(방류율)의 합, 치게성장률
    - (d + h) : 성게의 사망률과 수확률, 즉 성게소멸률

Numerical Example of Cohort Structure

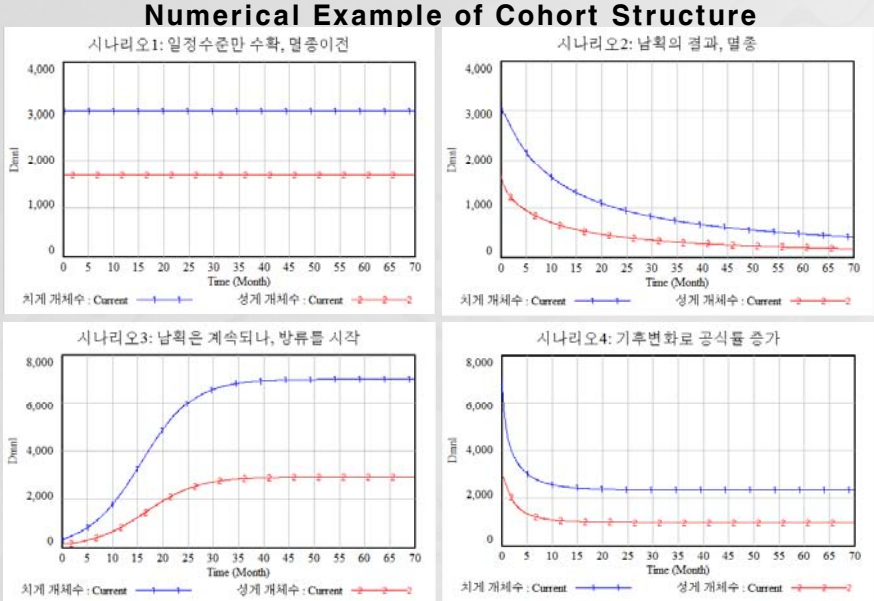
- Vensim 실험례
  - 모델파일: Cohort.mdl
  - 초기값 설정: 초기에 멸종전의 동적 안정상태 가정, 즉 $\frac{m}{c}\left(\frac{b+ah}{d+h}-1\right)$, $\frac{(b+ah)-(d+h)}{c}$
  - 실험의 시나리오

	초기값		파라메터					
	치게량 P1	성게량 P2	출생률 b	성숙률 m	공식률 c	방류율 a	사망률 d	수확률 h
멸종전	상기 동적안정 조건식		1.2	0.5	0.0001	0	0.5	0.4
남획멸종	3000	1666.67	1.2	0.5	0.0001	0	0.5	0.7
방류복원	300	166.67	1.2	0.5	0.0001	1	0.5	0.7
기후변화	6999.96	2916.65	1.2	0.5	0.0003	1	0.5	0.7

- Discussion
  - 복원률은 얼마로 설정? 0.1 보다 커야 함
  - 남획방지 정책의 결과 수확률이 낮아지면 방류를 지속시킬 필요가 있을까요?
  - 방류량을 수확량에 비례하지 않고 정량으로 하는 경우에는?

15

Numerical Example of Cohort Structure



16

Predator & Prey

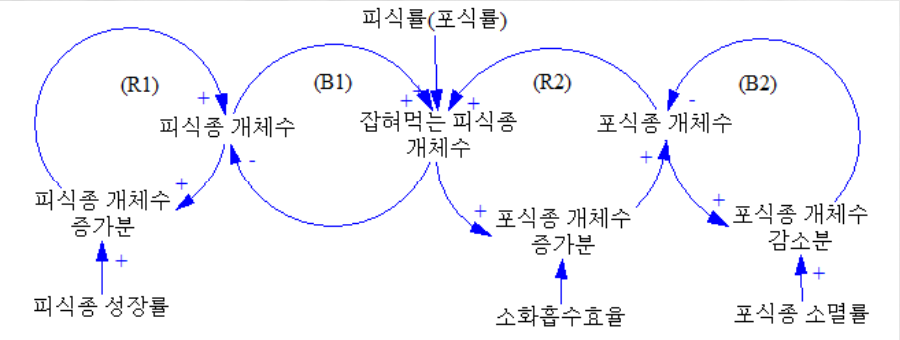
- 피식자-포식자 모델(Predator-Prey Model)
  - 5강의 시뮬레이션 분석결과에서 활용했던 토끼-여우의 개체수 모델이 전형적인 예
  - Predator-Prey Model의 Prototype (Lotka-Volterra 미방체계, 1925-6):

$$\dot{P}_1 = bP_1 - cP_1P_2, \quad \dot{P}_2 = acP_1P_2 - dP_2$$

    - 피식종 개체수 P_1 , 포식종 개체수 P_2
    - 피식종 성장률 b, 피식률 c, 소화흡수효율(assimilation efficiency) a, 포식종 사망률 d
  - Dynamic Hypothesis of Lotka-Volterra's
    - 피식종은 무한한 먹이공급을 받아 포식되지 않는 한 지수적 성장이 가능하다고 가정
    - 포식종에게 잡혀먹는 피식종의 희생개체수(피식개체수 혹은 피식량)는 피식종와 포식종이 조우하는 빈도에 비례
    - 포식종의 개체수 증가는 먹이섭취량, 즉 피식량에 비례
    - 포식종의 소멸량은 포식종의 개체수에 비례

Modeling Predator-Prey Interactions

- 피식자-포식자 모델(Predator-Prey Model)
  - Lotka-Volterra Model: $\dot{P}_1 = bP_1 - cP_1P_2, \quad \dot{P}_2 = acP_1P_2 - dP_2$
    - 피식종 개체수 P_1 , 포식종 개체수 P_2
    - 피식종 성장률 b, 피식률 c, 소화흡수효율(assimilation efficiency) a, 포식종 사망률 d



Modeling Predator-Prey Interactions

- Lotka-Volterra의 동적 안정상태(Steady-state)
  - 모델: $\dot{P}_1 = bP_1 - cP_1P_2, \quad \dot{P}_2 = acP_1P_2 - dP_2$
  - 동적 안정조건: $P_1'=0$ 및 $P_2'=0$ 이 동시에 성립

$$0 = bP_1 - cP_1P_2, \quad 0 = acP_1P_2 - dP_2$$

$$\Rightarrow \quad 0 = P_1(b - cP_2), \quad 0 = P_2(acP_1 - d)$$

(P_1, P_2) = (0,0)인 경우는 자명해(trivial solution)이므로 논의에서 제외하면

$$\therefore \quad P_2 = \frac{b}{c}, \quad P_1 = \frac{d}{ac}$$

  - 동적 안정조건의 의미: $(\text{피식자수}, \text{포식자수}) = \left(\frac{\text{포식자소멸률}}{\text{소화흡수효율} \times \text{피식률}}, \frac{\text{피식자성장률}}{\text{피식률}}\right)$
    - 피식자의 동적안정 개체수는 포식자의 소멸률/증가율
    - 포식자의 동적안정 개체수는 피식자의 증가율/소멸율

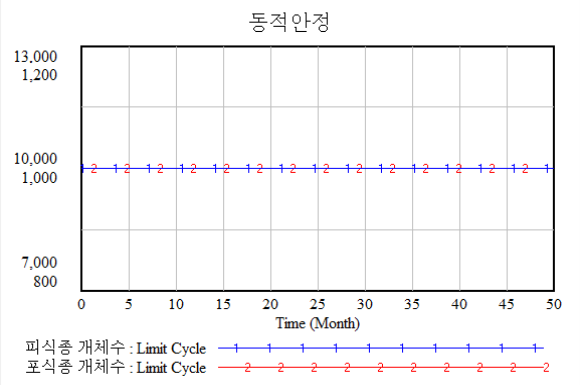
Numerical Example of Predator-Prey

- Vensim Example
  - 모델파일: Lotka-Volterra.mdl
  - 실험의 시나리오

	초기값		파라메터			
	피식자 P1	포식자 P2	피식출생률 b	피식률 c	소화흡수율 a	포식사망률 d
동적안정	d/ac 혹은 10000	b/c 혹은 1000	1	0.001	0.02	0.2
Limit cycle	d/ac 혹은 10000	b/c*0.9 혹은 900	1	0.001	0.02	0.2
입력값 변형1	d/ac	b/c * 0.9	1	0.002	0.02	0.2
입력값 변형2	10000	900	1	0.002	0.02	0.2

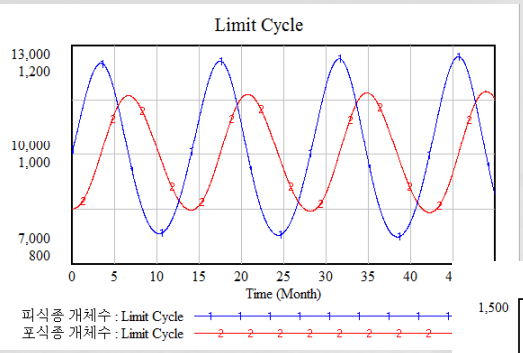
  - 입력값 변형1 및 2에서는 일단 파라메터 c의 값을 변화시켰는데, 그 차이점은
    - [참조] 동적 안정조건: 동적 안정상태의 레벨변수의 값은 파라메터 4개의 값에 의해 결정
    - 변형1에서는 파라메터 값이 변함에도 불구하고 초기조건을 식으로 넣었기 때문에 새로운 파라메터 값에 의해서 초기조건도 동시에 변하게 함, 즉 초기조건은 유지하고 파라메터만 바뀐 결과
    - 반면 변형2에서는 파라메터 값이 변해서 위의 시나리오보다 동적안정이 바뀌었는데도 초기조건을 바꾸지 않고 상수로 놓은 것, 즉 파라메터와 초기조건이 모두 바뀐 결과

Numerical Example of Predator-Prey

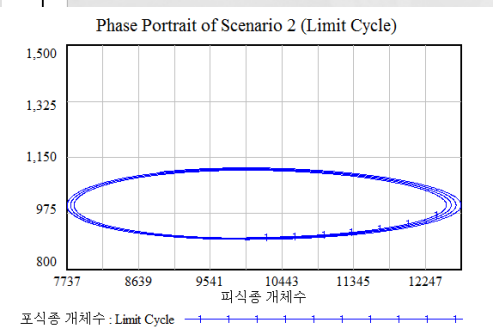


- 시나리오1: 동적안정
  - 동적 안정상태 조건식을 각 level variable의 초기값으로 입력한 결과 동적 안정상태를 잘 나타내고 있음 (동적 안정조건이 맞게 구해짐을 반증)
  - 일단 동적 안정상태에 다다르면 그것을 유지하려는 항상성 (homeostasis) 존재

Numerical Example of Predator-Prey

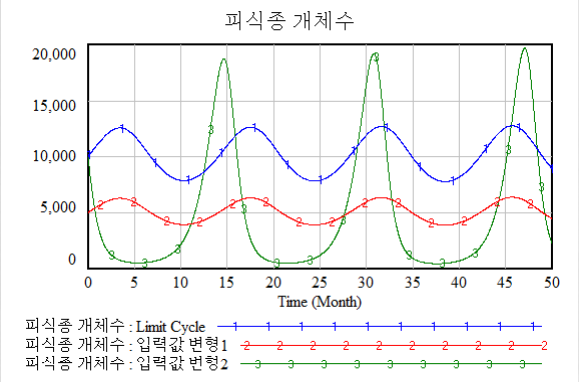


- 시나리오2: Limit Cycle
  - 동적 안정상태 조건식에서 약간 벗어난 값을 초기값으로 입력한 결과 cyclic or expanding oscillation을 보임
  - 피식자(1)가 줄어들면 시차를 두고 포식자(2)가 줄어들고, 포식자가 줄어들면 피식자가 다시 증가하는 패턴을 반복



- 오른쪽의 Phase portrait : 시점 0에서 한 점에서 출발하여, 시점이 흐르면서 점차로 원 궤도를 따라서 바깥쪽으로 조금씩 크게 원을 그림 (expanding oscillation)
- 안쪽의 동그라미는 접근하지 못한다는 의미에서 "limit cycle"라는 표현을 사용

Numerical Example of Predator-Prey



- Limit Cycle(시나리오2) 및 입력값 변형1&2(시나리오 3, 4)의 비교
  - 피식률을 증가시킨 결과 (초기조건은 변하지 않고 파라메터 값만 변한) 변형1 시나리오는 피식률을 높임으로써 전체적인 개체수가 감소했으나,
  - 두 레벨의 상대적 크기를 나타내는 초기조건은 변하지 않아 진폭도 변하지 않음

- 반면, 피식률을 증가시킨 결과 (초기조건의 상대적인 크기까지 같이 변한) 변형2 시나리오에서는 두 레벨의 상대적인 초기조건의 차이가 커짐으로써 개체수의 변동폭이 매우 심해짐
- 실제로 0에 근접한 개체수를 보이는데, 이는 비현실적으로 피식-포식 모형의 원형인 Lotka-Volterra 모델의 문제점으로 지적됨

Conclusion

- 생태계 모델의 기본구조와 생태계 작동원리에 대한 시스템 사고를 학습
  - 기본적인 Birth-Death process
    - 출생 및 소멸량은 개체수에 비례, 지수적 성장
  - 확산모델의 기본형인 logistic curve
    - Carrying capacity 에 의한 비선형 밀도제약
    - Feedback loop dominance 에 의한 s-shape curve 형성
    - 파라메터가 큰 경우 비선형성으로 인한 bifurcation과 chaotic behavior의 존재가능성
  - Cohort 구조를 채택한 population dynamics
    - 집단간의 특성에 따른 모델구조의 변화를 반영, 특히 생태자원의 경우 인간활동과 정책과 관련된 모델링을 위해서는 코호트 구조를 빈번히 활용
    - Cannibalistic behavior 등 집단간 상호작용은 생태계의 동적 안정상태를 강화
  - Predator-prey model
    - 코호트 모델의 공식행태와 같은 피식행태를 통한 먹이사슬 구조의 모델링
    - 피식자를 잡아먹는 것이 생존에 중요한 포식자의 개체수는 피식자의 재생률과 소멸률 등 피식종에 의존하며, 반대로 피식자의 장기적 개체수 역시 포식자에 의해 좌우됨
  - 상기 기본구조들을 혼합하여 기타 다양한 모델이 가능

Commodity Cycle 모델

김창욱
(삼성경제연구소, cwkim@seri.org)

2011년 2월 15일

대규모 장치산업에서 나타나는 산업경기순환

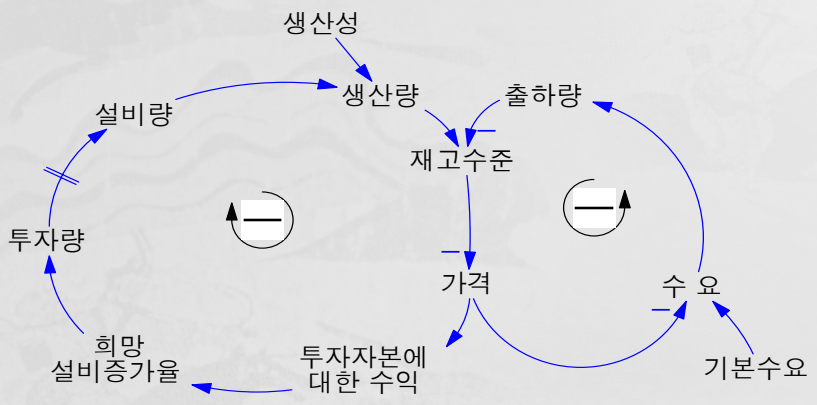
- 반도체, LCD 등 국내 주력산업에서 산업경기순환이 반복
  - 반도체 산업: Silicon Cycle(4~5년 주기)
    - 침체기: 1996년-2001년-2007년
  - LCD 산업: Cristal Cycle(2~3년 주기)
    - 침체기: 2002년-2004년-2006년
- 조선, 화학, 제지 산업 등 대규모 장치산업에서 경기순환은 공통적 현상

산업경기순환의 원인

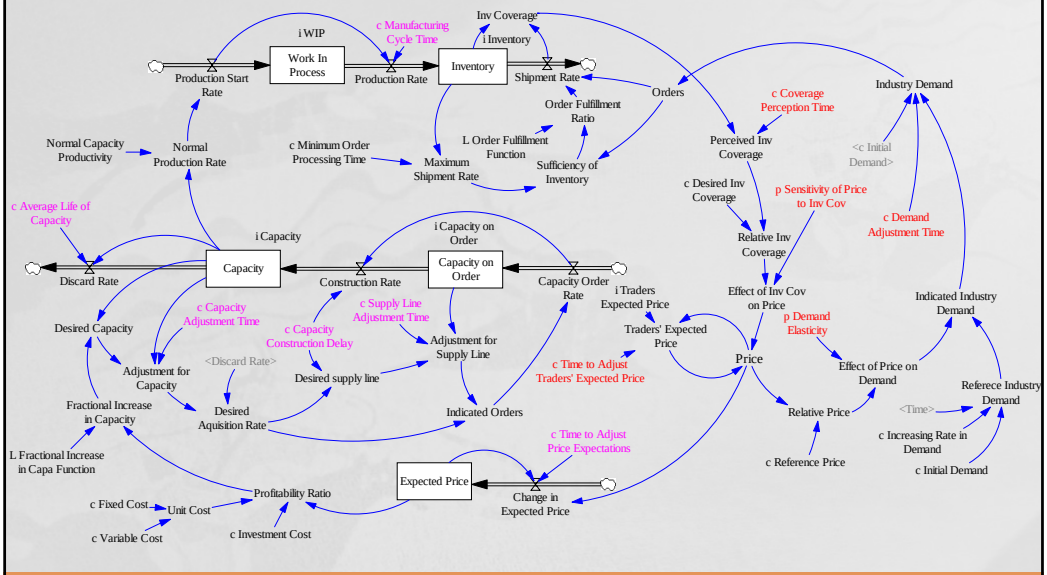
- 왜 대규모 장치산업에서 경기순환이 반복되는가?
  - 대규모 장치산업에 공통적으로 존재하는 내적 특성으로부터 경기순환의 구조적 원인을 파악
- 원인: 시황순응 투자와 투자의 시간지연(Delay)
  - 호황기에 투자 증대, 불황기에 투자 감소
  - 설비구축에 상당한 시간 소요(반도체: 약 2년, 제지 설비: 3~5년)
- 경기순환의 프로세스
  - 가격 상승 → 수익 증가 → 투자 증대 → (건설기간 경과) → 과도한 생산능력 확충 → 공급과잉 및 가격 하락 → 수익 감소 → 투자 감소 → (건설기간 경과) → 과도한 투자 축소 → 공급부족 및 가격 상승

모형의 기본구조

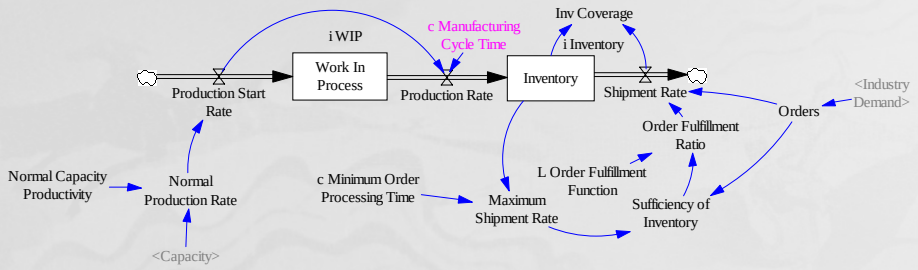
- Delay를 포함한 2중의 Negative Loop
  = Commodity Cycle Model



전체 모형(CommodityModel.mdl)

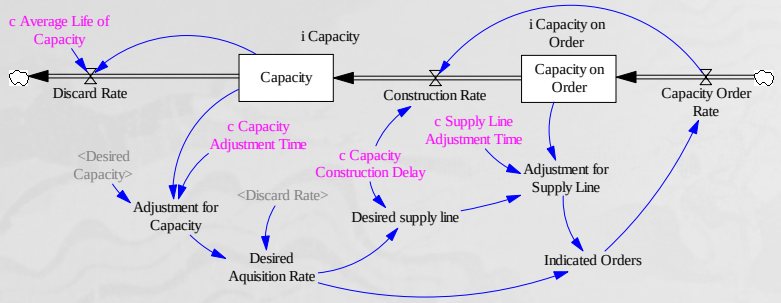


Production과 Inventory



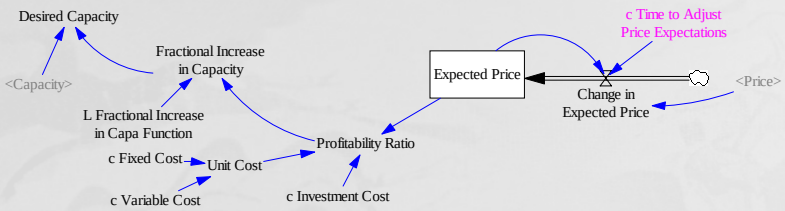
Normal Production Rate = Capacity*Normal Capacity Productivity
Production Rate = DELAY3(Production Start Rate, c Manufacturing Cycle Time)
Shipment Rate = Orders*Order Fulfillment Ratio
Order Fulfillment Ratio = L Order Fulfillment Function(Sufficiency of Inventory)
Sufficiency of Inventory = Maximum Shipment Rate/Orders
Maximum Shipment Rate = Inventory/c Minimum Order Processing Time
Inv Coverage = Inventory/Shipment Rate

Capacity



Discard Rate = Capacity/c Average Life of Capacity
Construction Rate = DELAY3(Capacity Order Rate, c Capacity Construction Delay)
Indicated Orders = Adjustment for Supply Line+Desired Aquisition Rate
Desired Aquisition Rate = Adjustment for Capacity+Discard Rate
Adjustment for Capacity = (Desired Capacity-Capacity)/c Capacity Adjustment Time
Adjustment for Supply Line = (Desired supply line-Capacity on Order)/c Supply Line Adjustment Time
Desired supply line = c Capacity Construction Delay*Desired Aquisition Rate

Desired Capacity

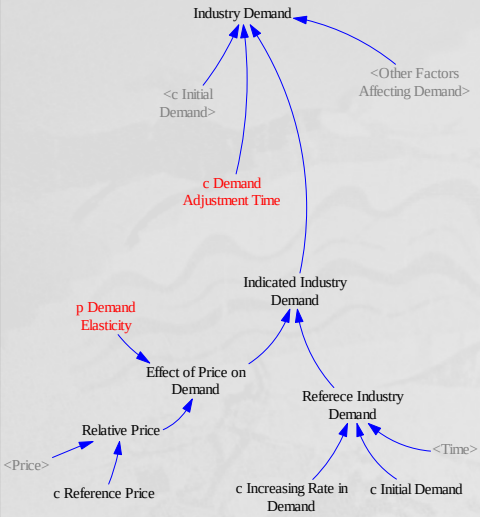


Desired Capacity = Fractional Increase in Capacity*Capacity
Fractional Increase in Capacity = L Fractional Increase in Capa Function(Profitability Ratio)
Profitability Ratio = (Expected Price-Unit Cost)/c Investment Cost
Expected Price = INTEG (Change in Expected Price, i Traders Expected Price)
Change in Expected Price = (Price-Expected Price)/c Time to Adjust Price Expectations

Price

Perceived Inv Coverage
= SMOOTH(Inv Coverage, c Coverage Perception Time)
Relative Inv Coverage
= Perceived Inv Coverage/c Desired Inv Coverage
Effect of Inv Cov on Price
= Relative Inv Coverage^p Sensitivity of Price to Inv Cov
Price = Traders' Expected * Effect of Inv Cov on Price
Traders' Expected Price
= SMOOTHI(Price, c Time to Adjust Traders' Expected Price , i Traders Expected Price)

Demand

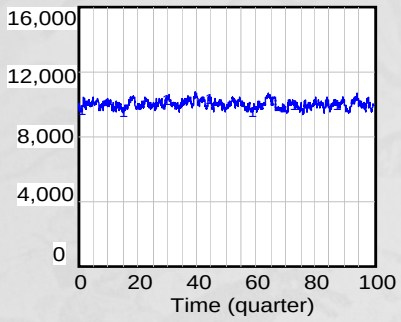


Industry Demand
= SMOOTHI(Indicated Industry Demand, c Demand Adjustment Time , c Initial Demand)*Other Factors Affecting Demand
Indicated Industry Demand
= Referece Industry Demand*Effect of Price on Demand
Referece Industry Demand
= c Initial Demand*EXP(c Increasing Rate in Demand*Time)
Effect of Price on Demand
= Relative Price^(-p Demand Elasticity)
Relative Price
= Price/c Reference Price

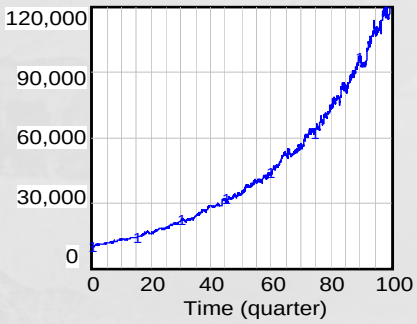
외생수요의 입력

- 불규칙적으로 미세 변동하는 기본수요(가격의 영향을 제외)를 외생적으로 입력하면서 시뮬레이션을 진행

(a) 수요 정체의 경우



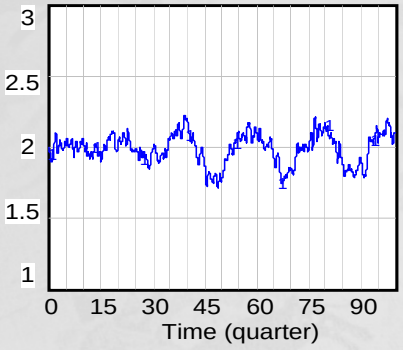
(b) 수요 성장의 경우



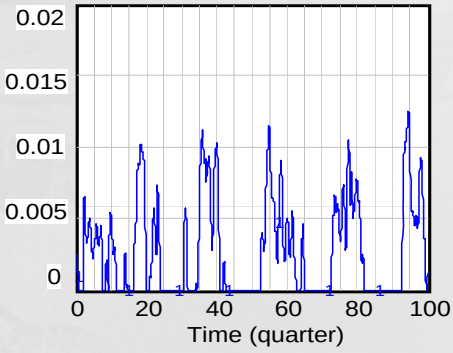
모형의 반응

- 수요정체 경우: 시간이 흐르면서 점차 경기순환 현상 발생

(a) 가격

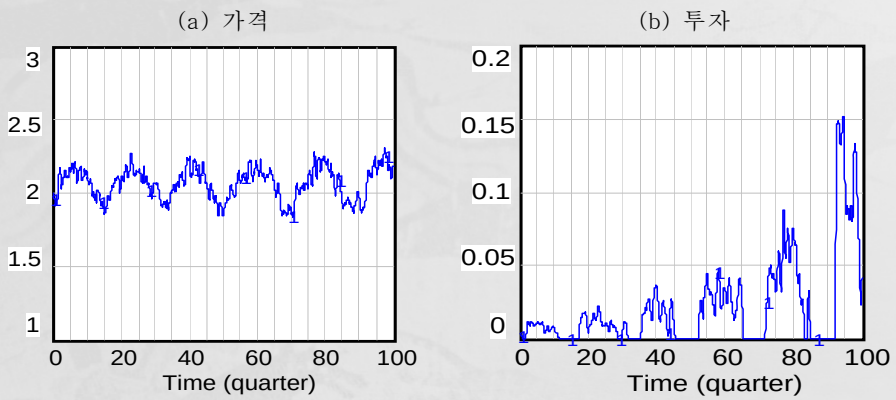


(b) 투자



모형의 반응

- 수요성장 경우: 성장을 시작하자마자 경기순환 현상 발생



복잡계 방법론: 시스템 다이내믹스

발전된 모형: 인구-환경-에너지

유재국
(국회입법조사처, yujk@nars.go.kr)

2011년 2월 15일

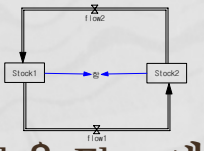
1. 강의 목적

- Stock과 Flow의 개념 정립
  - Stock 변수의 특징
  - Stock 변수의 사용 시점
- Look up 함수에 대한 이해
  - Look up 함수의 구조
  - Look up 함수의 사용 시점
- Stock과 Look up의 실제 적용

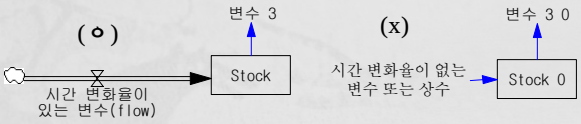
2. Stock

- Stock은
  - 보존의 법칙이 존재함

  - 같은 성격인 것들은 몇 개의 Stock으로 분리가 가능함



  - Stock은 Flow에 의해서만 영향을 받음



2. Stock

$$\frac{dS}{dt} = gS$$

양변을 정리하면

$$\frac{dS}{dS} = gdt$$

양변을 적분하면

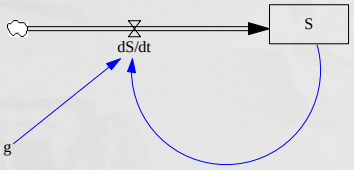
$$\int \frac{dS}{dt} = \int gS$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln(x)$$

$$\ln(S) = gt + c^{*}$$

양변에 exp 를 씌우면

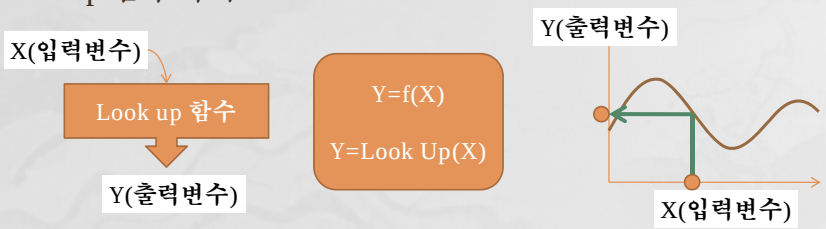
$$S = c \times \exp(gt)$$



Sterman(2000), Business Dynamics, Irwin McGraw-Hill.*pp* 265-267..

2. Look Up

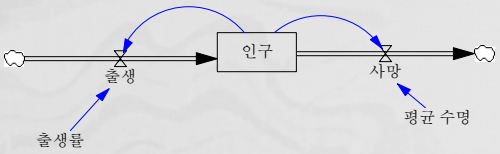
- Look Up 함수의 구조

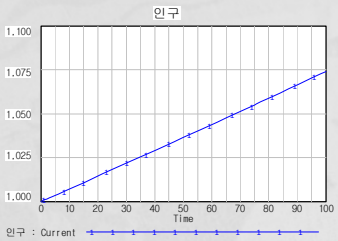


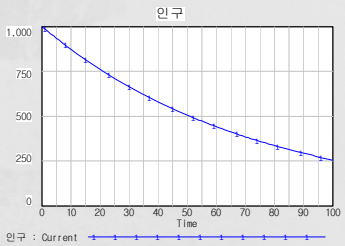
- 두 변수간의 비선형적 관계를 직접 표현
  - 수식으로 표현하기 어려운 상황
  - 이른바 소프트 변수의 관계 표현
    - 예) 스트레스(Stress)와 성과(Performance)
  - 자의적이라는 비판을 받을 수 있으므로 사전에 함수에 대한 정의를 명확하게 하여야 함

3. 모델링: 인구(1)

- 인구의 모델링
- 인구는 Stock이며, 일반적 형태는 다음과 같음

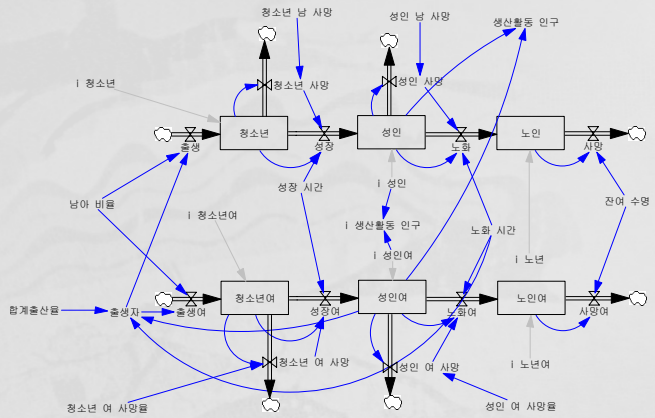






3. 모델링: 인구(2)

- 인구를 세분화



•실제 아이는 여자만 낳음

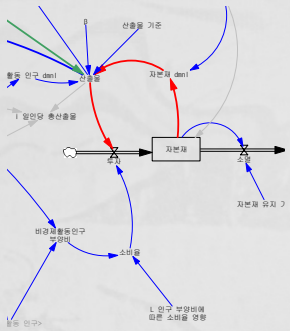
•경제를 고려할 때 경제활동 인구를 고려할 필요가 있음

•사회적으로는 인구부양비를 고려해야 함

수식은 모델 참조

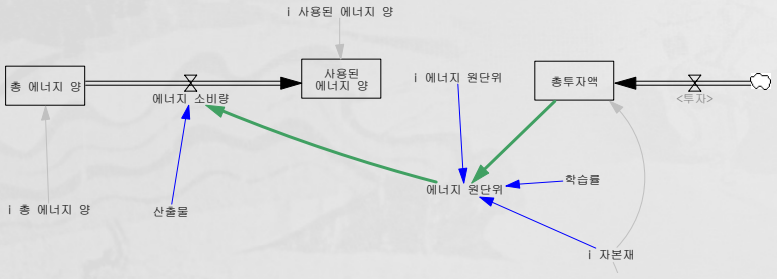
3. 모델링: 경제 부문

- 노동과 자본을 통해 산출물이 발생
  - 그 중 일부는 소비되고 일부는 재투자되어 다음 생산활동에 사용됨



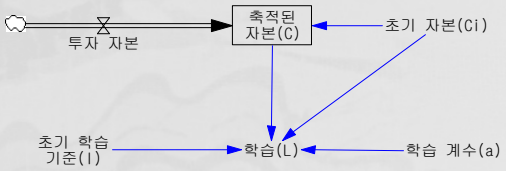
3. 모델링: 에너지

- 경제활동을 하면서 발생하는 에너지 소비



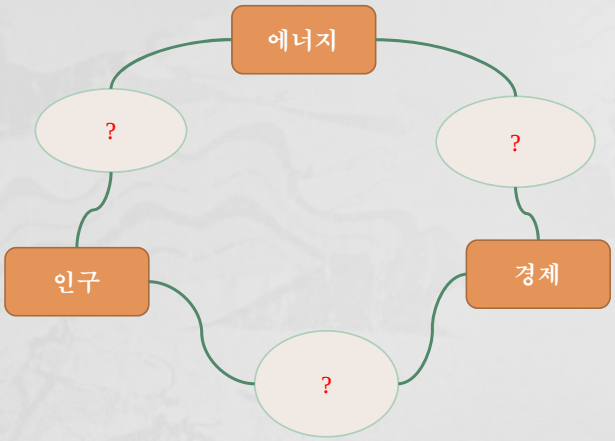
3. 모델링: 학습모형

- 인간의 학습 활동에 대한 모델링 방법

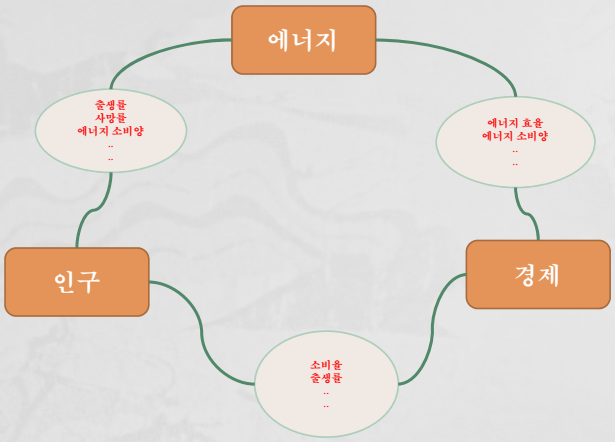


$$L = I \times \left(\frac{C}{C_i}\right)^a$$

3. 모델링: 모듈의 연결



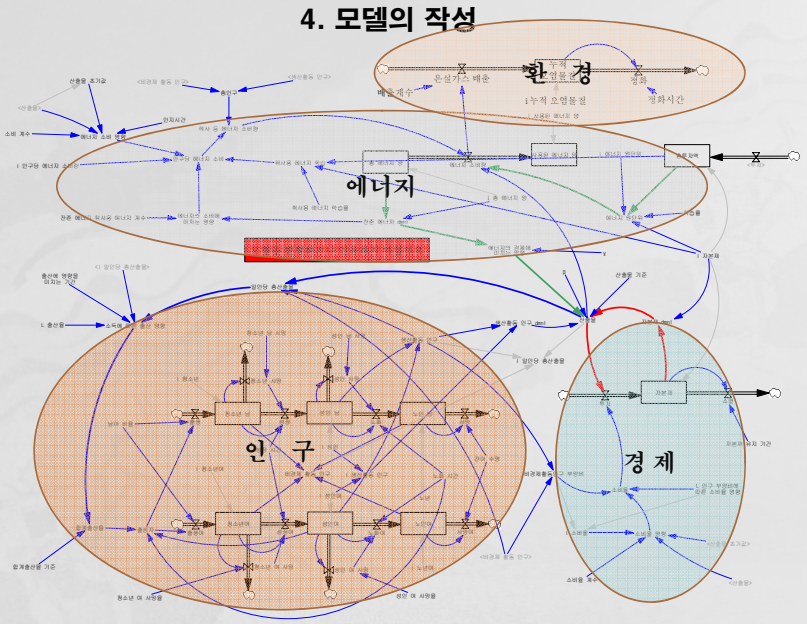
3. 모델링: 모듈의 연결



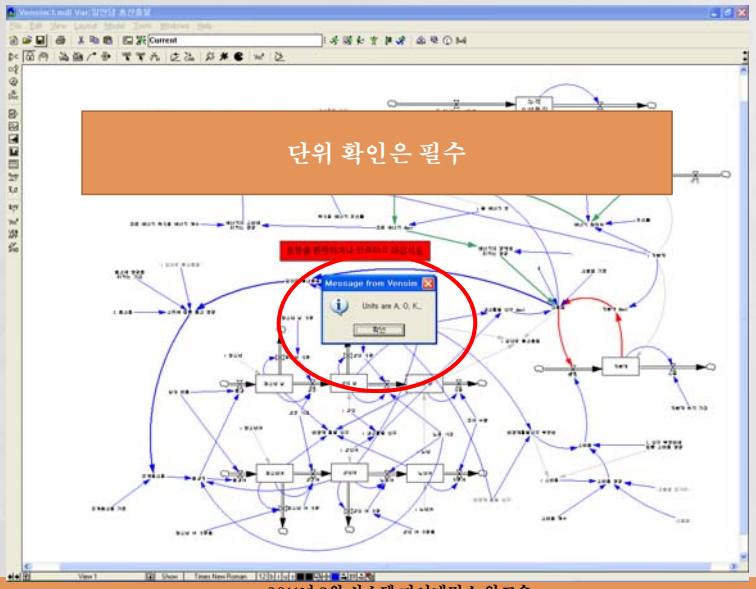
4. 모델의 작성

- 모델을 함께 만들어 봅시다.
- 배포해 준 모델을 참조하세요!
- 주의: 인용이나 허락 없이 발표하지 마십시오!

4. 모델의 작성



4. 모델의 작성



5. 확인 사항

- Stock과 Flow 구분
- Look up 함수
- Smooth 함수
- 모듈간 연결하는 방법
- 변수의 정규화 방법(normalization)

6. 모델 검증

- 몬테카를로 시뮬레이션
- 실 데이터와의 비교를 통한 모형의 검증
- 비현실적인 값에 대한 모형에서의 반응

감사합니다.

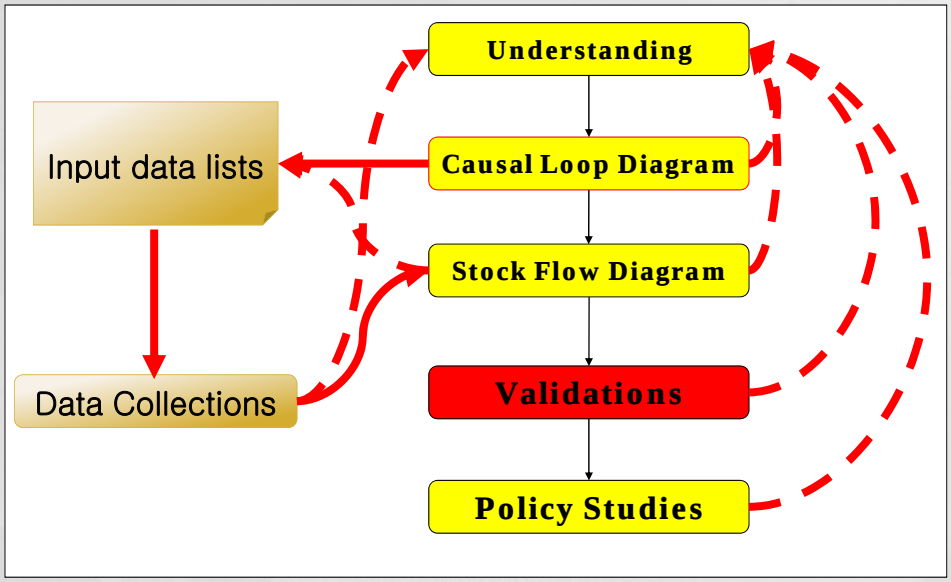
모형 검증, 민감도 분석, 캘리브레이션,

오영민

(한국 SD 학회 편집위원장, unaion@hanmail.net)

2011년 2월 16일

1. Sequence of SD Modeling : Feedback!



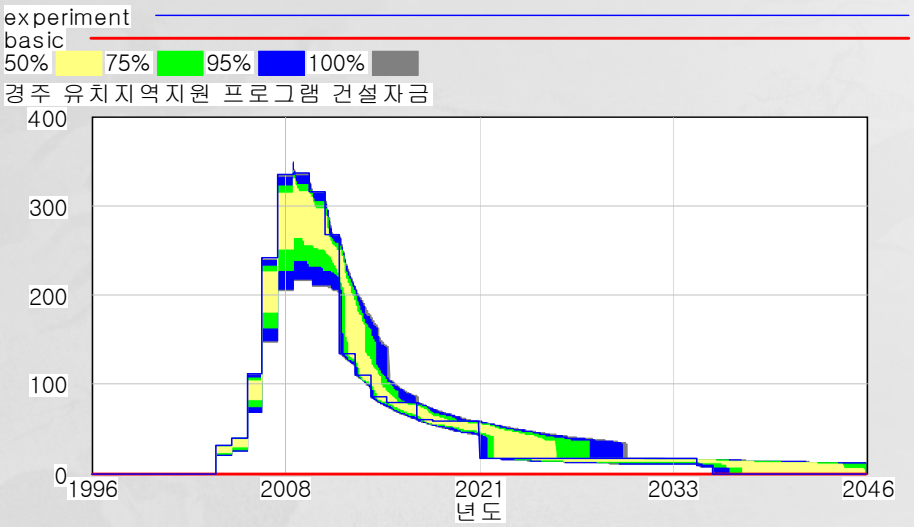
Validation of SD Model

- Ensure that it is soundly constructed
- Focusing on the structure of the causal loops to create the outcome
  - Tool : model map(model boundary)
  - Expert Judgment : CLD and SFD
  - Direct Inspection of Equations
  - Unit Check and Reality Check
- Do elements respond to reflect data
  - Comparing between Historical Data and Model Output
- Validation is depending on what purposes of model are

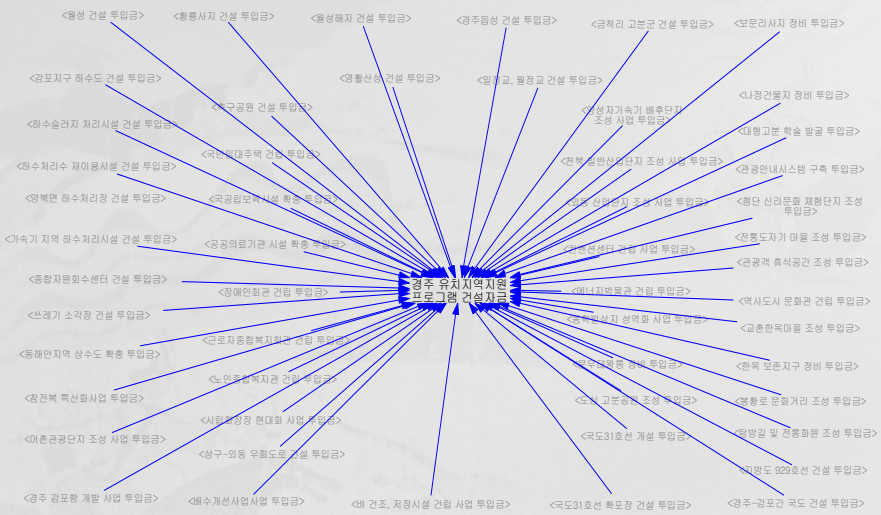
How to test soundness ?(Validation)

- o 모델의 검증
  - 검증의 3 요소
    - ✓객관성 / 정량성 / 형식성
- o SD 모델의 검증
  - 건전성 검토
    - ✓모델개발자의 의도한 대로 구성되어 있는가?
  - 객관성 검토
    - ✓객관성이 있는가?
    - ✓연역적 방법 / 귀납적 방법
  - 발전성 검토
    - ✓앞으로 발전시킬 수 있는가?
- o SD 모델은 아직까지 유용성에 초점을 둔 주관적 모델

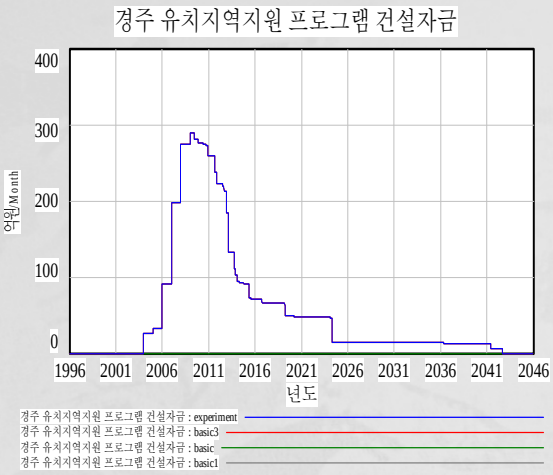
2. Validation Test-Sensitivity Analysis



Model : 지역발전 프로그램 자금의 불확실성



Basic Result and Problem



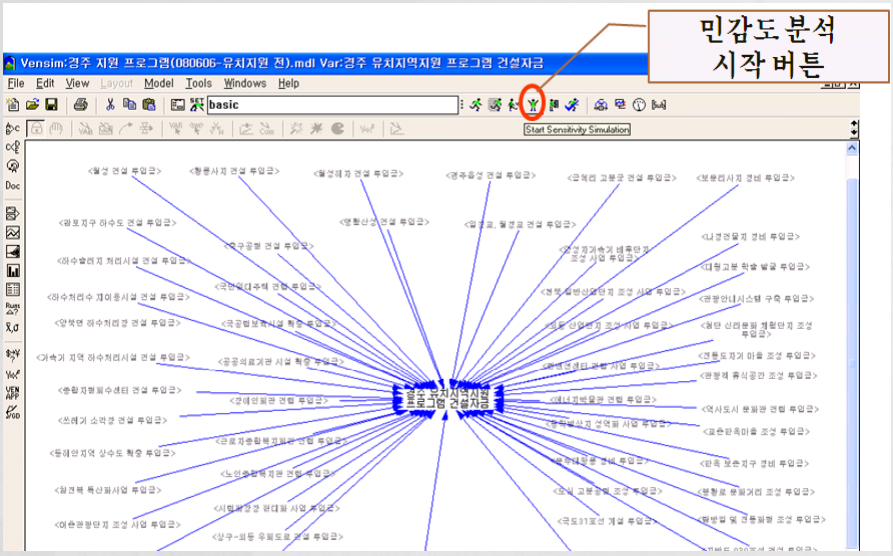
Problem

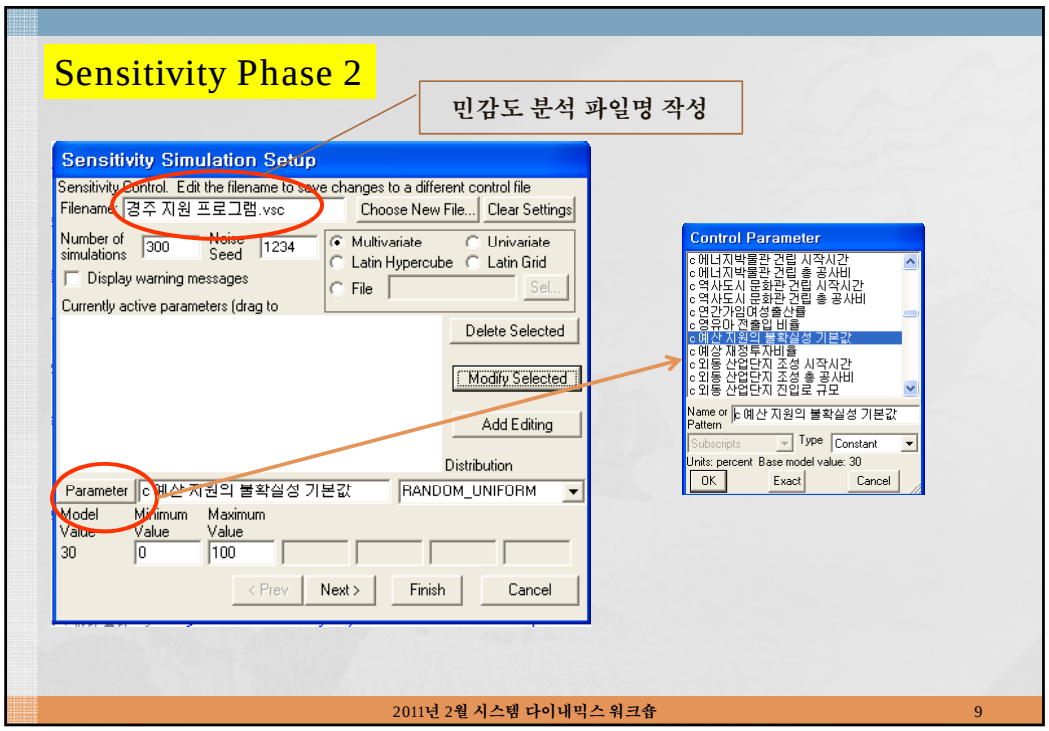
- Uncertainty of Gov't Finance
- 외생변수로 불확실성 고려해야 함

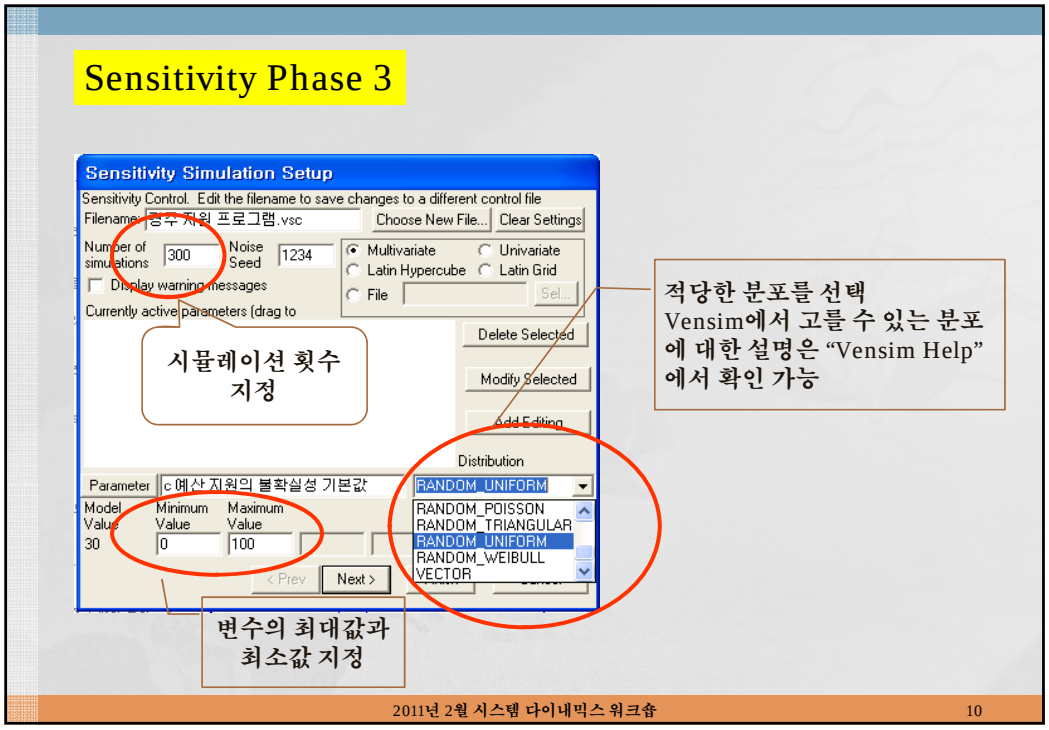
Model

- 모델에서 "C 예산지원의 불확실성 기본값"이라는 변수생성
- 이 값을 변화시켜 자금지원 변화를 예측
- 기본값의 범주가 크기 때문에 민감도 분석 시행

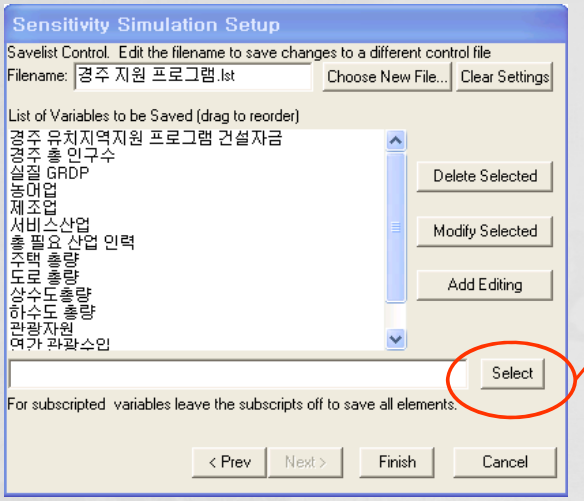
Sensitivity Phase 1



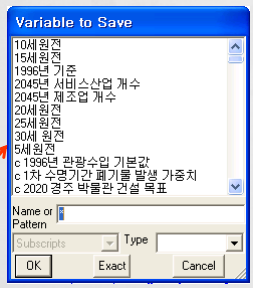

Sensitivity Phase 2
민감도 분석 파일명 작성
Sensitivity Simulation Setup
Sensitivity Control. Edit the filename to save changes to a different control file
Filename: 경주 지원 프로그램.vsc
Choose New File...
Clear Settings
Number of simulations
300
Noise Seed
1234
Multivariate
Univariate
Latin Hypercube
Latin Grid
File
Sel...
Display warning messages
Currently active parameters (drag to
Delete Selected
Modify Selected
Add Editing
Distribution
Parameter
c 예산 지원의 불확실성 기본값
RANDOM_UNIFORM
Model Value
Minimum Value
Maximum Value
30
0
100
< Prev
Next >
Finish
Cancel
Control Parameter
c 에너지박물관 건립 시작시간
c 에너지박물관 건립 총 공사비
c 역사도시 문화관 건립 시작시간
c 역사도시 문화관 건립 총 공사비
c 연간가임여성출산률
c 영유아 전출입 비율
c 예산 지원의 불확실성 기본값
c 예상 재정투자비율
c 외동 산업단지 조성 시작시간
c 외동 산업단지 조성 총 공사비
c 외동 산업단지 진입로 규모
Name or Pattern
c 예산 지원의 불확실성 기본값
Subscripts
Type
Constant
Units: percent Base model value: 30
OK
Exact
Cancel
2011년 2월 시스템 다이내믹스 워크숍
9


Sensitivity Phase 3
Sensitivity Simulation Setup
Sensitivity Control. Edit the filename to save changes to a different control file
Filename: 경주 지원 프로그램.vsc
Choose New File...
Clear Settings
Number of simulations
300
Noise Seed
1234
Multivariate
Univariate
Latin Hypercube
Latin Grid
File
Sel...
Display warning messages
Currently active parameters (drag to
시뮬레이션 횟수 지정
Delete Selected
Modify Selected
Add Editing
Distribution
Parameter
c 예산 지원의 불확실성 기본값
RANDOM_UNIFORM
RANDOM_POISSON
RANDOM_TRIANGULAR
RANDOM_UNIFORM
RANDOM_WEIBULL
VECTOR
Model Value
Minimum Value
Maximum Value
30
0
100
< Prev
Next >
적당한 분포를 선택
Vensim에서 고를 수 있는 분포에 대한 설명은 "Vensim Help"에서 확인 가능
변수의 최대값과 최소값 지정
2011년 2월 시스템 다이내믹스 워크숍
10

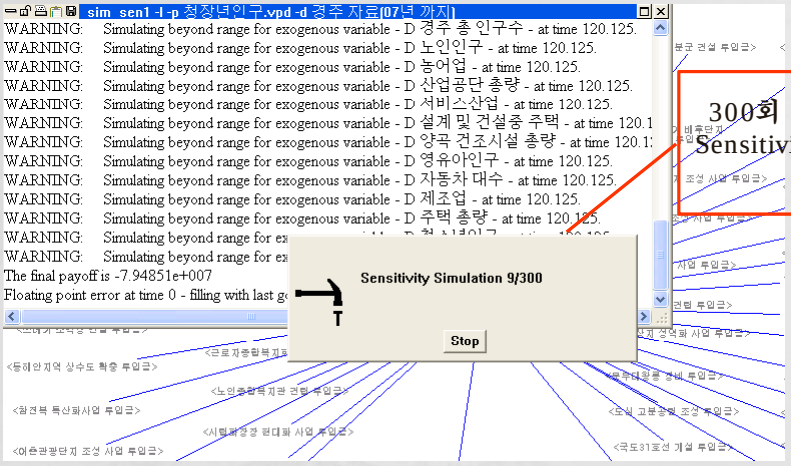
Sensitivity Phase 4



불확실성을 갖고 있는 변수에 영향을 받을 것 같은 변수들을 모델러가 선택

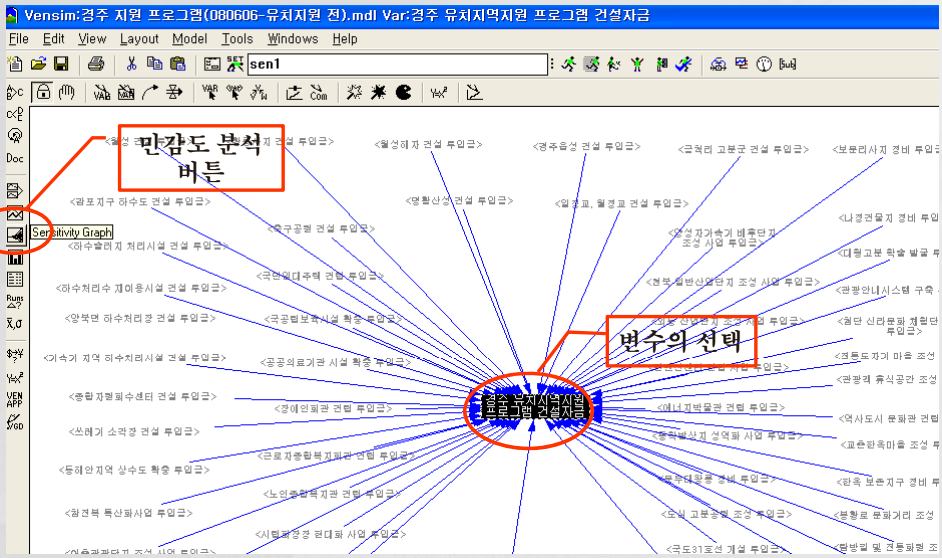


Sensitivity Phase 5

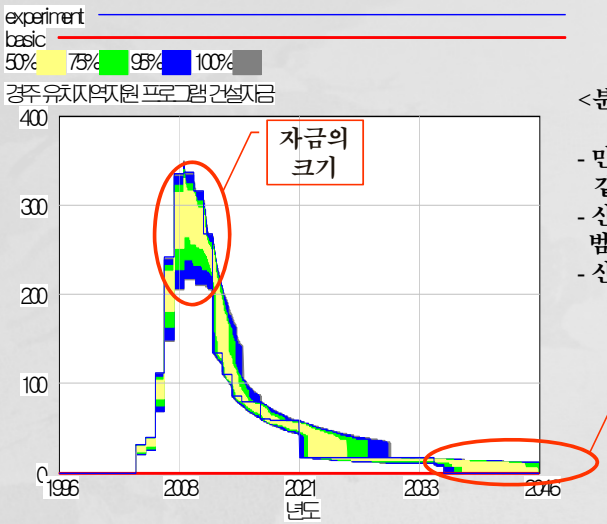


300회 Monte Carlo Sensitivity Simulation 시작

Sensitivity Phase 6



Sensitivity Phase 7 : Output and Analysis



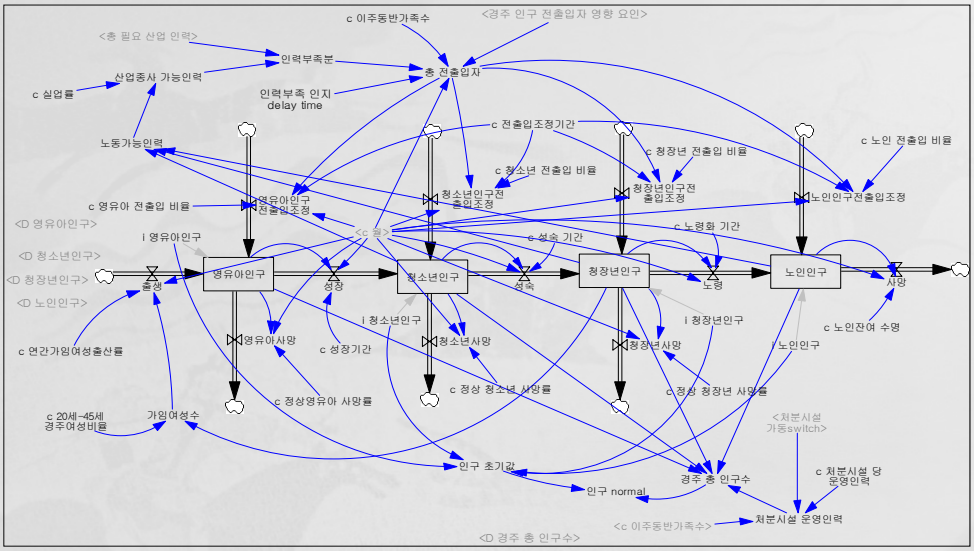
<분석>

- 민감도 분석 결과가 예상된 바와 같은가?
- 산출된 값의 크기가 수용할 수 있는 범주에 있는가?
- 산출된 결과를 개별적으로 추적

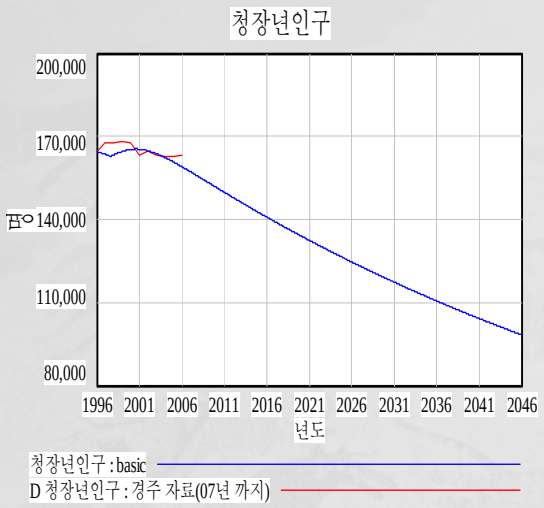
3. Calibration : Optimization

- **Calibration** : 최적 값을 얻기 위한 조치
- 모델의 타당성 및 모델에 필요한 상수값을 얻기 위해서 사용할 수 있음
- 또한 최적의 정책을 찾기 위해서도 사용
- 모델에 관련된 데이터가 사전에 존재해야 함
- 데이터를 기반으로 모델의 상수를 계산함
- 칼만 필터 방식으로 **payoff**를 계산
  - **payoff**의 값에 따라 **constant**를 산출

사례 :인구모델



데이터와 basic 시뮬레이션 결과

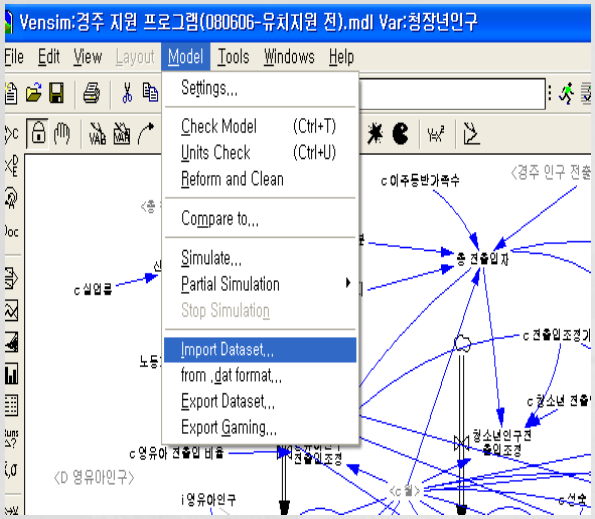


기본적으로 모델에서
가정 또는 기존 report된
자료를 통해서 basic 시뮬레이션 시행

-만일, 자료가 신뢰성이 없고,
모델에 적합한 상수를 찾고 싶을 때
시행

예를 들어,
-c 청장년 전출입 비율
-c 청장년 사망률을 결정하고 싶음

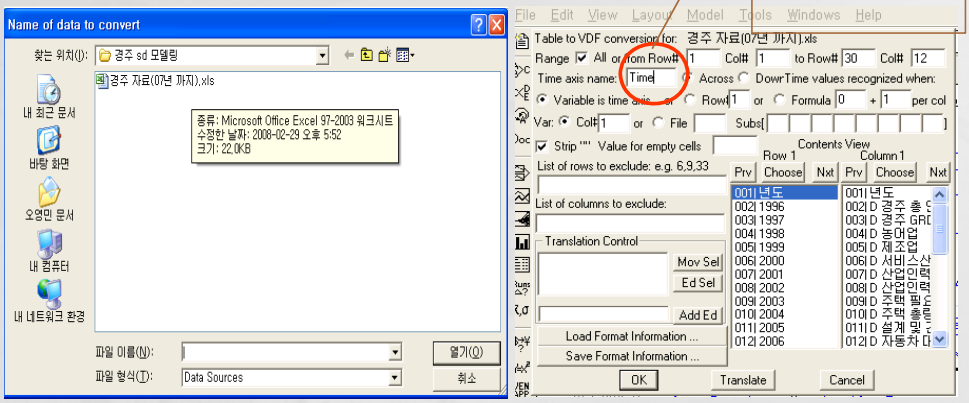
Calibration phase 1 : 데이터 변환



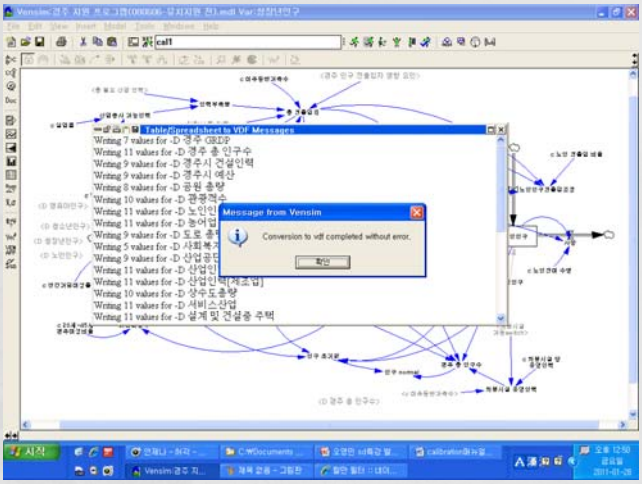
- **Excel** 등 데이터가 있다면, 벤심 데이터 파일 **(.vdf)**로 변환해야 함
- 데이터 파일은 시뮬레이션 모델이 있는 폴더에 함께 있어야 됨
- 데이터 변환은 **"모델"→ "import data"**에서 변환

Calibration phase 1 : 데이터 변환

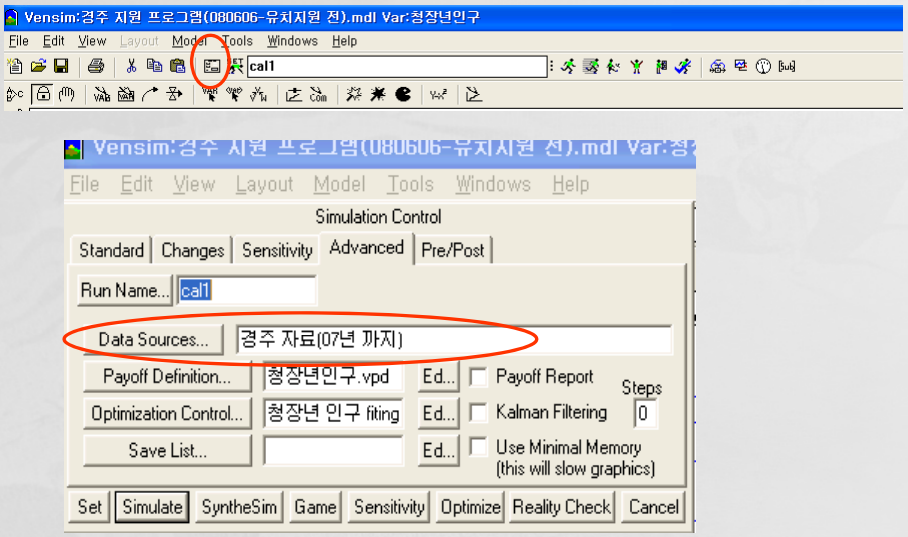
Time을 데이터에 있는 년도로 전환



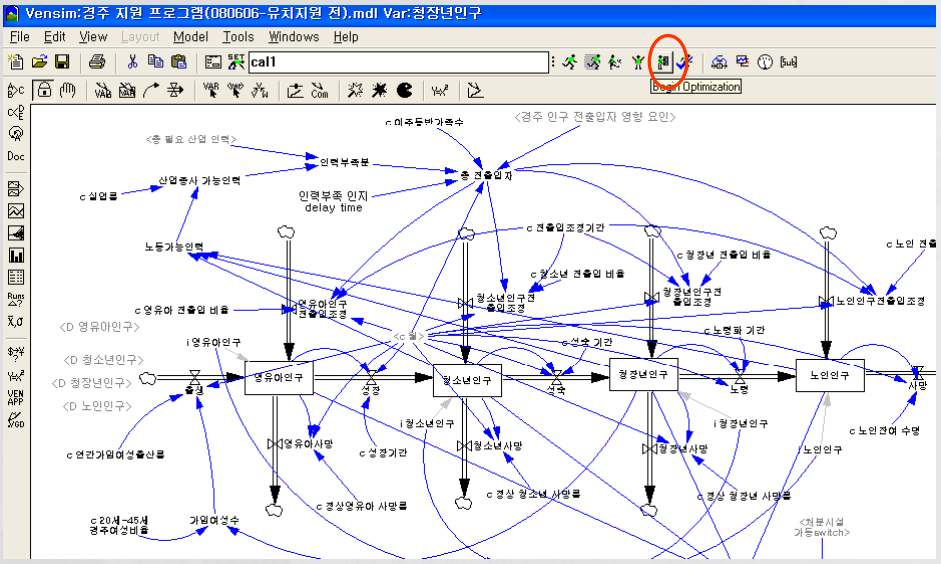
Calibration phase 1 : 데이터 변환 완료



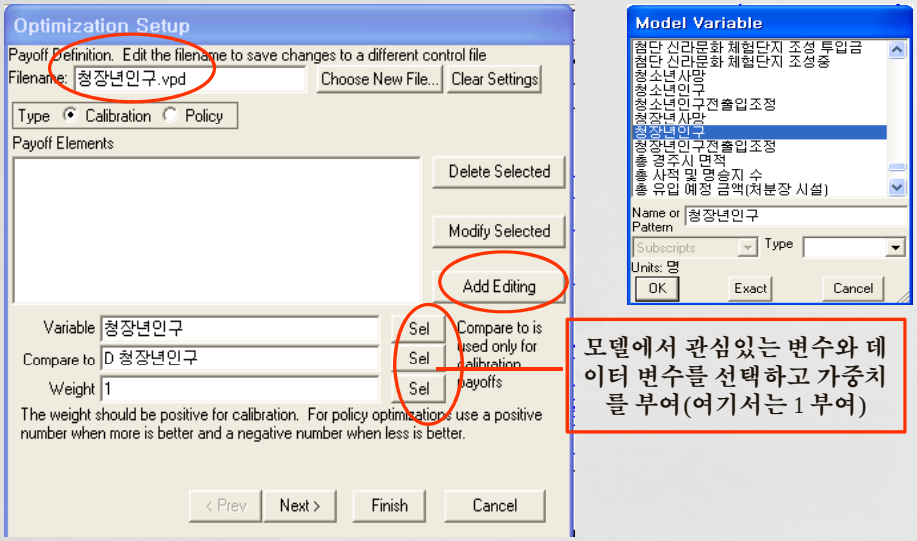
Calibration phase 2 : vdf 데이터 활용



Calibration phase 3 : Optimization

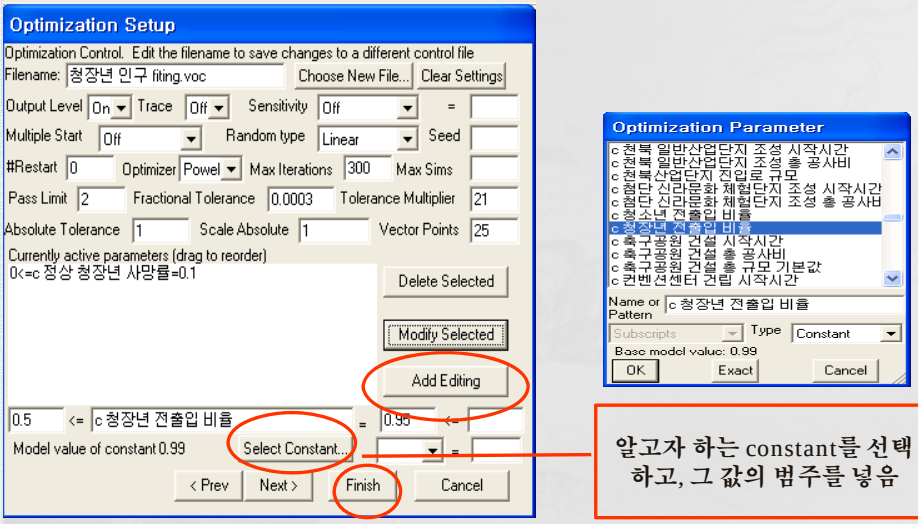


Calibration phase 3 : Optimization



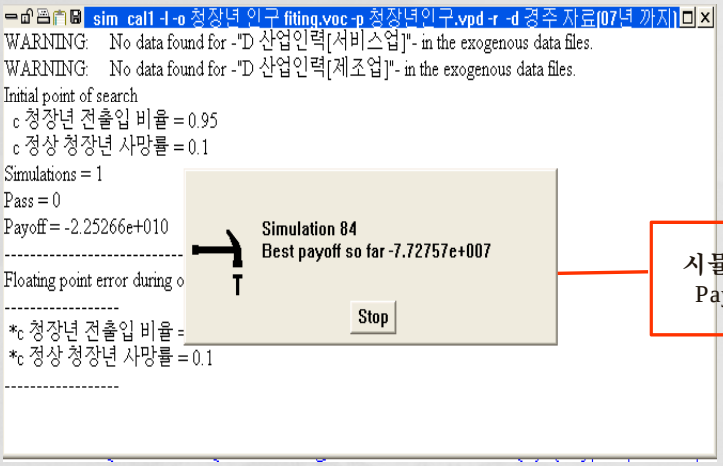
모델에서 관심있는 변수와 데이터 변수를 선택하고 가중치를 부여(여기서는 1 부여)

Calibration phase 3 : Optimization



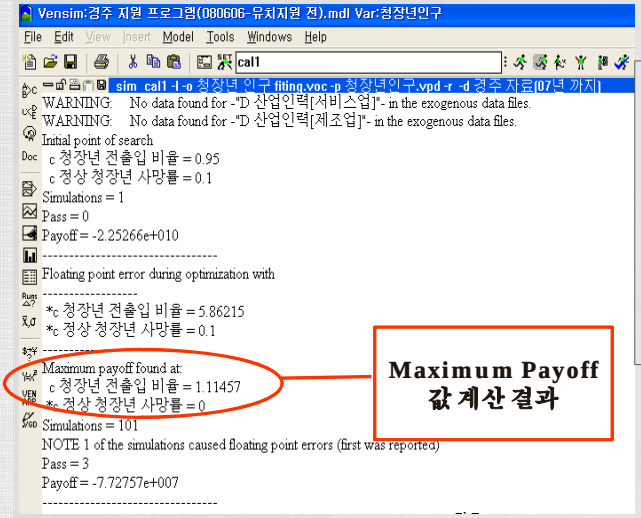
알고자 하는 constant를 선택하고, 그 값의 범주를 넣음

Calibration phase 3 : Optimization



시뮬레이션 시작
Payoff 값 계산

Calibration phase 3 : Optimization



Maximum Payoff 값 계산 결과

Calibration 결과의 검토

-주어진 정보와 전문가의 견해와 캘리브레이션의 결과와 비교
-상식적으로 맞는 constant를 선택

-캘리브레이션 결과를 통해 모델에서 사용된 수식과 상수 등을 검토해 보고 모델의 적정성을 판단할 수 있음

전략적 시사점: 정책 지렛대의 발견

김동환
(중앙대, sddhkim@cau.ac.kr)

2011년 2월 17일

1. 전략이란?

- 전략 (strategy)이란?

상대방이 있는	⟷	Not 독립
시스템을	⟷	Not 요소
적은 노력을 들여	⟷	Not 강제
원하는 방향으로	⟷	Not 상태
변화시키는	⟷	Not 자연
방법	⟷	Not 규범

변화를 의도적으로 유발시키려면,
먼저 변화가 어디에서 오는지를 이해해야 한다.

2. 시스템 다이내믹스 전략의 초점

- 변화시키고자 하는 변수를 직접 공략하는 대신
  시스템 전체를 지배하는 메커니즘을 활용한다는 점에서
  그리고 종종 목표 변수와 멀리 떨어져 있는 변수를 공략한다는 점에서,
  시스템 사고가 제안하는 전략은 동양의 침술과 유사하다.

3. 전략의 핵심

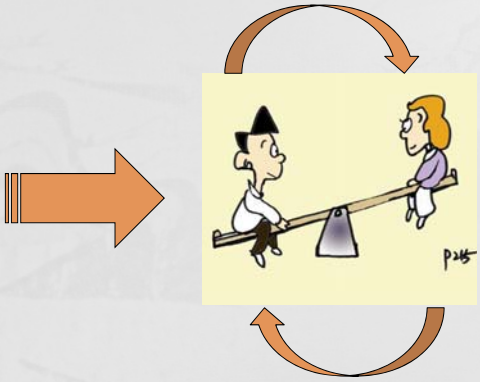
전략의 출발은

나와 상대방이

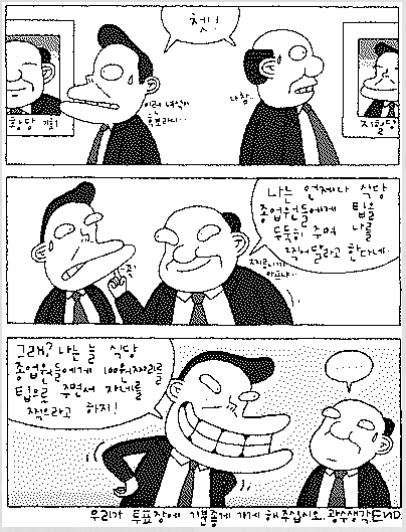
어떠한 피드백으로

연결되어 있는가를

아는 것.



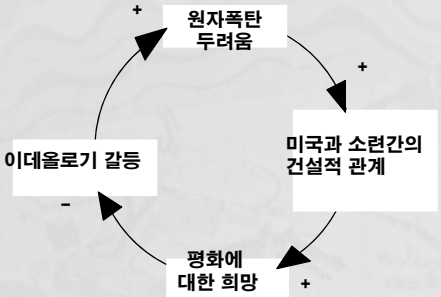
4. 전략에 대한 광수 생각

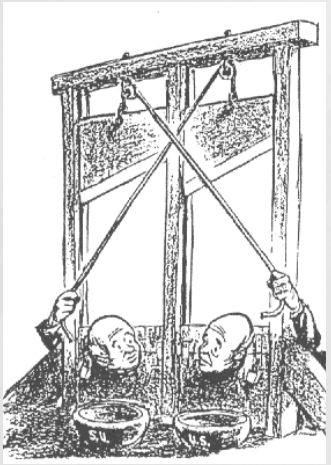


광수 생각에서 드러난 정치가들의 전략에 내재된 핵심은?

5. 냉전시대의 전략

- 냉전 시대의 외교 전략가였던 헨리 키신저 장관은 핵 무기의 상호 억제력을 깨달았으며, 역설적으로 핵 무기가 평화를 가져올 것이라고 설파하였다.





6. 우리나라 대통령의 전략: 피드백의 창출

양의 피드백 루프

하면 된다

엽전은 안된다는 자포자기 의식

음의 피드백 루프

정치인은 반걸음만 시민에 앞서 가야 한다

이념적 극단주의

7. 피그말리온 효과

- 다음의 글에서 나타나는 전략적 성공과 실패의 원인은?

장점과 단점

어느 마을에 두 청년이 있었는데,
그들이 비슷한 시기에 결혼을 했습니다.
한 사람은 결혼을 하자마자 매일 한 가지씩 아내의 단점을 지적했습니다.
그러나 절대로 아내의 장점은 이야기하지 않았습니다.
몇 가지 단점만 고치면 완벽한 아내가 되리라고 기대했기 때문입니다.
그러나 그의 생각은 보기 좋게 빗나갔습니다.
그의 아내는 완벽해지기는커녕 점점 더 성격이 나빠져만 갔습니다.
그 가정에는 하루도 싸움이 끊일 날이 없었습니다.
그런데 다른 한 사람은 아내의 장점을 찾아내어
하루에 한 가지씩 칭찬했습니다.
물론 아내에게는 많은 단점이 있었습니다.
그러나 그 단점은 남편인 자신이 채워주어야 할 부분이라고 생각하며
늘 장점만 보려고 노력했습니다.
이 가정에는 늘 웃음꽃이 피었고 부부는 더없이 행복했습니다.
당신은 어느 가정에서 살고 싶습니까?
당신이 무엇을 먼저 보느냐에 따라 당신의 가정이 달라집니다.

이영무/ 목사

8. 정책 지렛대

정책 지렛대란
조그마한 노력을
들여서 커다란 결과를
가져올 수 있는 정책
개입 지점을 의미한다.

피드백 분석을 통하여서만
정책 지렛대를 발견할 수 있다.

왜냐하면 "조그마한 힘을 증폭시킬 수 있는 양의 피드백 루프" 와 "커다란 힘에 저항하는 음의 피드백 루프" 의 발견이 요구되기 때문이다.

한국일보 1998년 9월 3일, 저항

한국일보 1998년 10월 21일, 분담의 지점

한국일보 1999년 1월 31일, 힘의 증폭

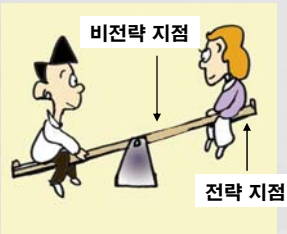
대구매일신문 1998년 12월 8일, 침=지렛대

9. 전략적 개입 지점과 피드백 루프

정책 지렛대란
조그마한 노력을
들여서 커다란 결과를
가져올 수 있는 정책
개입 지점을 의미한다.

피드백 분석을 통하여서만
정책 지렛대를 발견할 수 있다.

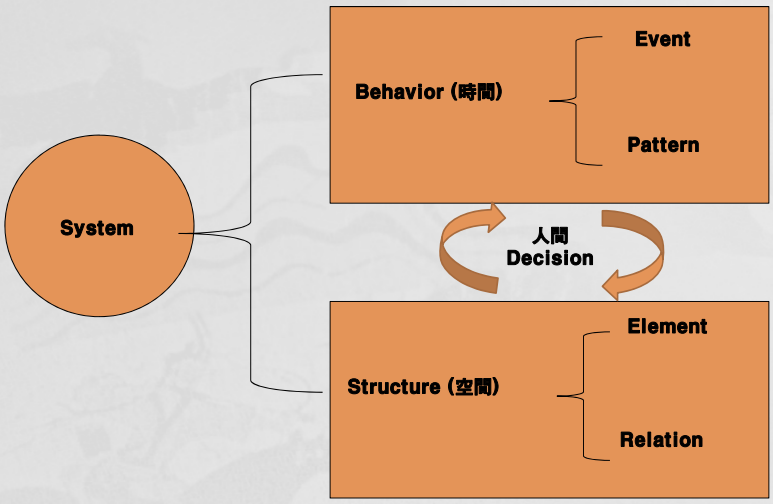
왜냐하면 "조그마한 힘을 증폭시킬 수 있는 양의 피드백 루프" 와 "커다란 힘에 저항하는 음의 피드백 루프" 의 발견이 요구되기 때문이다.



첫번째 원칙: "작은 힘을 증폭시킬 수 있는 양의 피드백 루프" 를 활용하라.

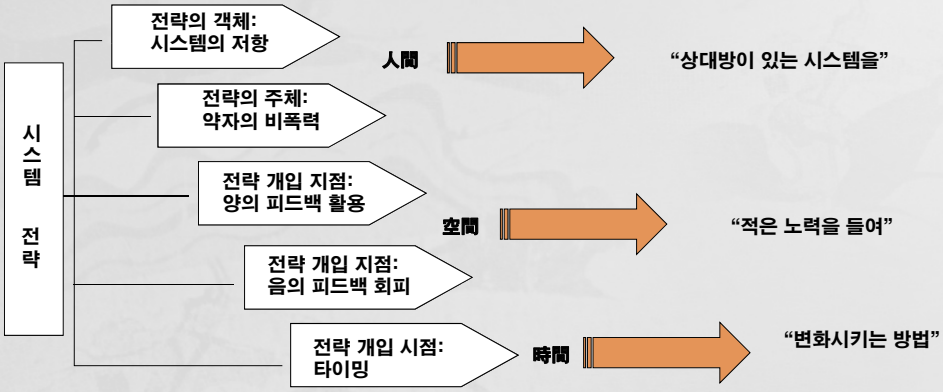
두번째 원칙: "커다란 힘에 저항하는 음의 피드백 루프" 를 피하거나 역이용하라.

10. 시스템의 구성 요소와 전략



11. 전략의 구성 요소

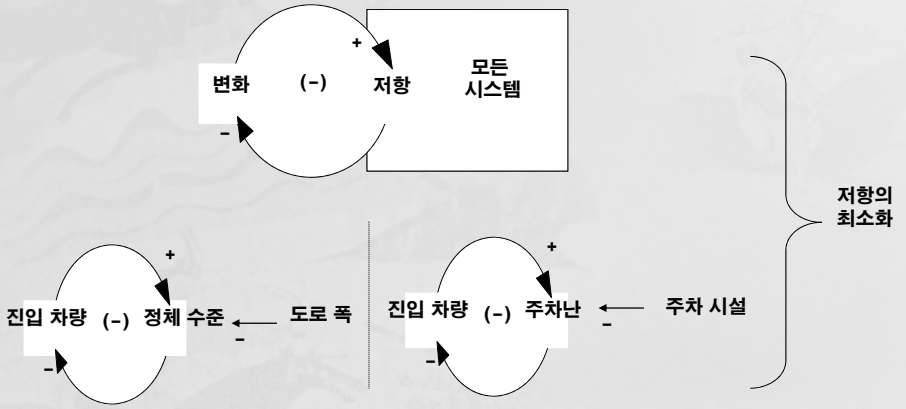
- 전략 (strategy) =



- 김동환, 2004, 시스템 사고, 선학사.

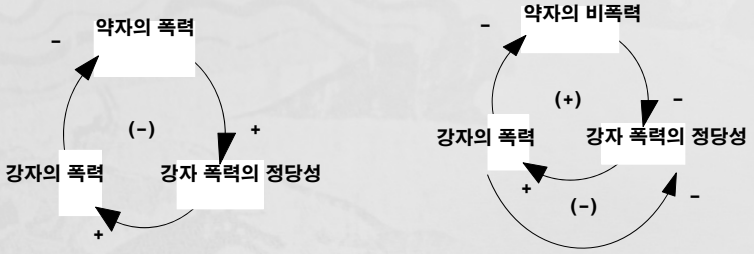
12. 전략의 객체: 변화에 저항

- 살아있는 모든 시스템은 변화 즉, 전략에 저항적이다.
  저항하지 않는 시스템이 있다면, 이는 죽은 시스템이다.



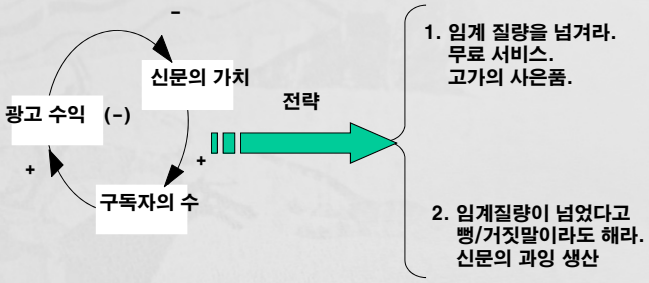
13. 전략의 주체: 겸손함

- 도로에서 질주하는 차량에 치어 죽는 동물은 고양이일까 개일까?
- 절대 권력은 절대적으로 우둔해진다.
- 가장 전략적이기 위해서는 가장 겸손해야 한다.
  비폭력의 힘을 행사할 수 있을 만큼 겸손해야 한다.



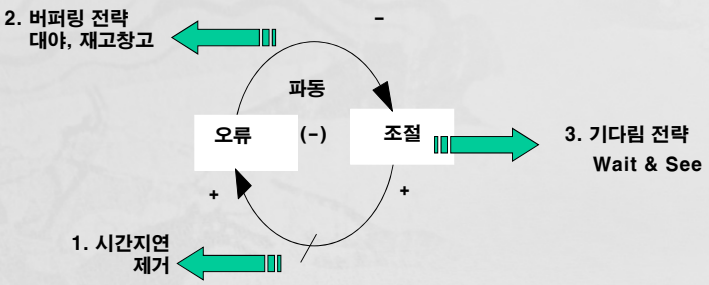
14. 전략적 개입지점: 양의 피드백 루프와 공격적 전략

- 무릇 자신의 약한 힘을 증폭시켜 시스템을 변화시키고자 한다면, 시스템 내부에 존재하는 양의 피드백 루프를 공략하여야 한다.
- 양의 피드백 루프의 임계질량을 넘어서는 전략은 무엇보다도 과감해야 한다. 무료로 서비스하는 모험을 감수해야 하며, 다른 기업체들보다 먼저 시장에 진출하는 과감한 결정을 내리기도 해야 한다.
- 양의 피드백 루프에 대한 공략은 과감한 전략을 그 생명으로 한다.



15. 전략적 개입지점: 음의 피드백과 방어적 전략

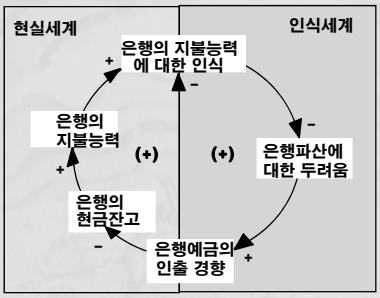
- 음의 피드백 루프를 관리하는 태도를 한 마디로 요약하면 노자의 무위(無爲, inaction)라고 할 수 있다. 자연스러운 흐름에 내 맡기는 전략이다.
- 양의 기운은 과감하게 활용하고 음의 기운은 조용히 피하는 것이 자연스러운 전략이다.



16. 전략은 현실과 기대를 이어주는 것

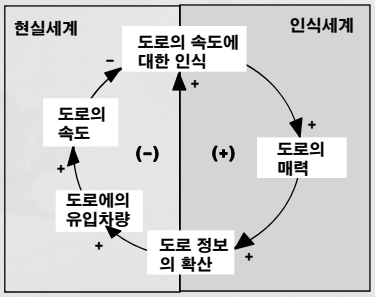
자기실현적 예언의 시스템과 자기배신적 예언의 시스템에서
전략은 공격적이어야 하는가 또는 방어적이어야 하는가?

자기실현적 예언(self-fulfilling prophecy)



1997년의 금융위기

자기배신적 예언(self-failing prophecy)

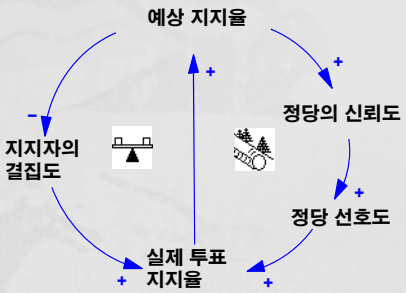


교통예측 시스템

17. 당신이라면 어떤 전략을?

국회의원 선거를 치룰 때, 당 대변인들은 당선자 숫자를 예상하여 언론에 발표하곤 한다.
그런데 자신의 예상을 그대로 언론에 발표하는 대변인은 거의 없다.
과반수 이상의 의석을 확보할 것으로 예상되는 집권당의 대변인은 어떻게 발표해야 할까?
교섭단체 조차 구성하기 어려워 보이는 야당의 대변인은 어떻게 발표해야 할까?

1. 예상되는 의석 수 그대로 발표한다.
2. 예상되는 의석 수 보다 과장해서 발표한다.
3. 예상되는 의석 수 보다 축소해서 발표한다.



18. 전략 개입 시점: 타이밍

- 피드백 루프의 특성을 고려하여 전략 개입 시점 즉, 타이밍을 결정할 수 있다.
  현실적으로 타이밍은 이보다 훨씬 더 복합적인 고려에 의해서 결정되곤 한다.
  다른 행위자들과 보조를 맞추어야 할 경우도 있고,
  거꾸로 엇 박자로 가야만 하는 경우도 있다.

피드백 루프의 특성	시스템의 특성	정책 문제와 목표	정책 개입시기
양의 피드백 루프	성장 또는 쇠퇴	성장	초기 (임계점)
음의 피드백 루프 + 시간지연	파동	균형	기다림
양과 음의 피드백 루프의 전환	성장과 쇠퇴의 반복	지나친 성장이나 지나친 쇠퇴 억제	지배적 피드백 루프가 전환되는 시점의 근방

19. 내가 타고 있는 전략적 순환은?

내가 속한 시스템은 어떠한 순환을 타고 어디로 가고 있는가?

20. 마치기 전에 질문

- 시스템 사고(ST)/시스템 다이내믹스(SD)를
  초등학교 때부터 교과목으로 채택하여 가르치는 국가의 젊은이들과
  아직까지 대학에서 조차 배우기 쉽지 않은 우리나라의 젊은이들이
  과연 10년 후에 경쟁할 수 있을까?

- 시스템 전략을 사용하여 정책을 설계하고 검토할 때,
  얼마나 많은 정책 비용을 감소시킬 수 있을까?

- 시스템 전략을 사용하여 기업의 전략을 수립할 때,
  얼마나 많은 업체의 부도를 방지할 수 있을까?

SD 연구성과와 타 연구방법과의 관계

문태훈
(중앙대학교, sapphire@cau.ac.kr)
http://cau.ac.kr/~thmoon

2011년 2월 18일

1. 방법론의 계보와 SD의 위치

진실의 규명을 위한 방법
과학적지식의 축적을 위한 방법

표준과학 Standard View of Science
해석적사회과학 Interpretive Social Science
비판적사회과학 Critical Social Science

주관론적 접근 vs. 객관론적접근 Subjectivist vs. Objectivist Approach
질적접근 vs. 양적접근 Qualitative vs. Quantitative Approach

도구주의 Instrumentalism
패러다임주의 Paradigmism
반증가능주의 Refutationism

SD

수량적모델의 구축 – 표준과학관, 객관론적 접근, 도구주의
인과지도의 사용 - 질적접근, 반증가능주의

2. 사회과학에서 주관론자와 객관론자의 차이

subjectivivist approach to social science						objectivist approach to social science
ontological assumption (존재론적 입장)	현실은 인간 의식과 상상의 반영, 투사물	현실은 인간이 부여하는 의미의 구성체reality as a social con- struction)	현실은 인간행동과 상호작용을 통해서 지속되는 상징적관계와 의미의 세계	현실은 변화하는 정보에 입각하여 끊임없이 변화하는 영역	현실은 구체적인 과정	구체적인 구조(reality as a concrete structure)
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	정보처리자	적응자	반응자
인식론적 입장 (epistemo-logical stance)	현상학적 이해와 통찰, revealation	사회현실이 어떻게형성되는가를 이해하려 함	상징 사용 패턴을이해하려 함(to understand pattern of symbolic discourse)	상황에 대한 이해(to map context)	to study systems, process, change	to construct a positivist science

2. 사회과학에서 주관론자와 객관론자의 차이

subjectivivist approach to social science						objectivist approach to social science
비유 (Favored Metaphors)	transcenden-tal(초월)	language game, accomplish-ment, text	theater, culture	인공두뇌학 (cybernetic)	유기체 (organism)	기계 (machine)
연구방법 (Research Method)	순수한 주관성의 탐구 해석학	해석학적인 탐구 인류학	상징분석 (symbolic analysis) 사회행위 이론	상황분석 (contextual analysis of Gestalten)	historical analysis open system theory	lab experiment, surveys Behavioralism

출처: 문태훈. 2007. 시스템사고로 본 지속가능한 도시. 집문당. p.62.

3. 양적분석, 시스템다이내믹스, 질적분석의 특성

	양적분석	시스템다이내믹스	질적분석
분석의 논리	연역적	연역적 추론, 반증가능성의 검토, 시뮬레이션	귀납적
분석의 대상	결과중심의 연구에 적합	동태적 과정 설명, 인과론적 결과	분석의 범위가 넓고 과정 중심의 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 범위 내에서 명쾌한 상관관계의 규명에 초점 제한되나 명쾌한 상관관계의 규명	피드백 시스템의 인과관계 규명	분석대상간 관계의 형태(pattern)를 대상으로 함 제한되지 않은 풍부하고 복잡한 인과관계의 규명에 강함
자료의 모집	숫자화된 기존의 데이터나 관찰로 얻어지는 수량화할 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
결과의 제시	양적분석의 통계검증의 결과, 테이블, 차트 등의 결과를 제시	그래프, 테이블, 서술을 동시에 제시	서술형태의 결과 제시

출처: 문태훈. 2007. 시스템사고로 본 지속가능한 도시. 집문당. p.63.

4. SD 연구동향과 성과

1) 방법론 연구
질적연구
시스템사고, 인과지도의 이용,
한계
양적연구
각종 게임의 개발과 응용, 인터페이스의 디자인이 미치는 영향
최적화기법으로서의 활용

2) 활용및응용
기업부문의 연구: 프로젝트관리, 기업전략, 이미지 명성관리, 다양화전략
공공부문의 연구: Urban Dynamics, Limit to Growth, World Dynamics, Medicine, Nursing Science.

3) 컨설팅분야
국내기업들의 전략구상 SK, POSCO etc.
컨설팅업체들의 활용

4. SD 연구동향과 성과

4) 시스템다이내믹스 세계학회 및 한국학회

<시스템다이내믹스연구> 연구동향

<System Dynamics Review> 연구동향

세계시스템다이내믹스 학술대회에서 보여지는 연구동향

4. SD 연구동향과 성과

5) 교육분야

노르웨이 베르켄대학 (University of Bergen)
시스템다이내믹스 석사학위 프로그램.
석사. 협동석사(U. of Bergen, U of Radboud, U of Lund)
http://www.uib.no/studyprogramme/MASV-SYSDY
http://www.uib.no/rg/dynamics

미국 Worcester Polytechnic Institute. SD 전공.
학부 SD 전공 또는 부전공
http://www.wpi.edu/academics/Depts/SSPS/Undergraduate/sysdyn.html
대학원 SD 석사학위 과정
http://www.wpi.edu/academics/Depts/SSPS/Graduate/index.html

4. SD 연구동향과 성과

5) 교육분야

MIT – SDM (System Design and Management) in MBA Program
시스템사고를 이용한 리더십과 혁신역량의 배양
Sloan School of Management and MIT's School of Engineering. 기술자들에게 시스템사고를 이용한 복잡한 문제의 파악, 분석, 해결능력의 배양.
원격강의.
http://sdm.mit.edu

K-12. 초등 중고등학생을 대상으로 하는 K-12 Project로 시스템시민을 양성 : Creative Learning Exchange
2년마다 컨퍼런스 개최.
http://www.clexchange.org

시스템 다이내믹스와 미래 연구

김동환
(중앙대, sddhkim@cau.ac.kr)

2011년 2월 18일

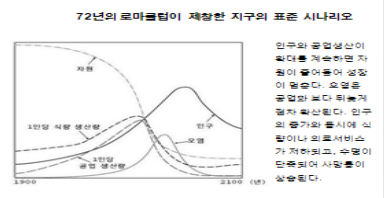
1. 원래 시스템 다이내믹스는 미래지향적 방법이었다

1972년 로마클럽 보고서 Limits to Growth 는

시스템 다이내믹스의 가장 유명한 성과였다.

이는 지구 전체에 대한 고민과 모델링이었으며,

이는 미래 예측에 관한 세계 최초의 시뮬레이션이었다.



2. SD와 미래연구의 궁합

미래연구자들의 SD에 대한 기대 = SD 만큼 미래예측을 잘 하는 방법이 없다.

로마클럽 보고서
성장의 한계 예언

SD의 장점 = 시뮬레이션을 통한 현 구조의 미래 행태 점검 가능

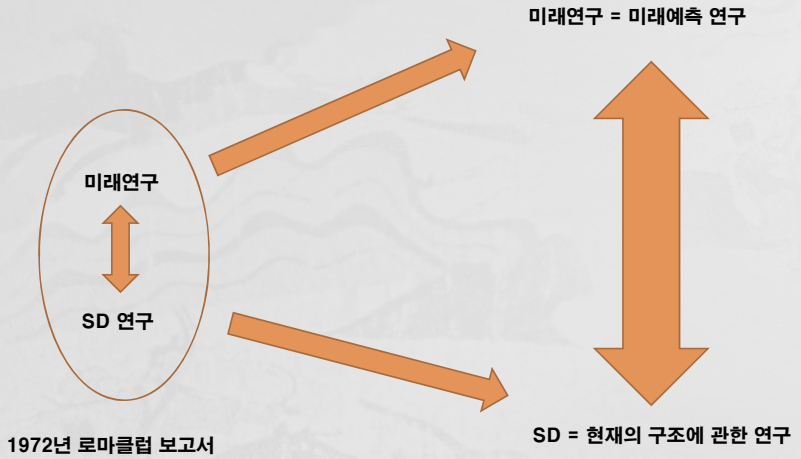
3. SD와 미래연구의 거리감

미래연구자들의 SD에 대한 기대 = SD 만큼 미래예측을 잘 하는 방법이 없다.

인식의 GAP

SD 학자들의 기본 태도 = 미래예측이 아니라
현재의 구조를 이해하는 것이 중요

4. SD와 미래연구의 상이한 진화

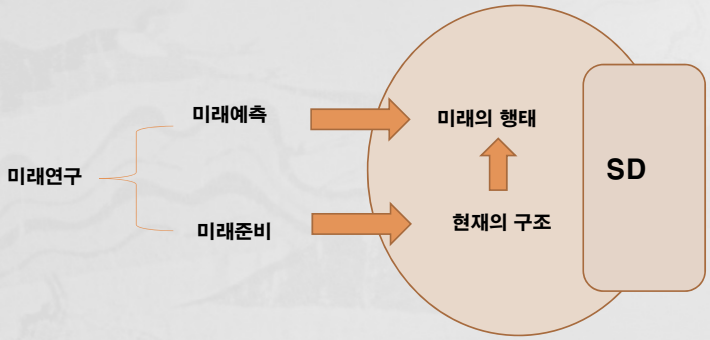


5. 미래연구의 한계

- 기존의 미래 연구 = 미래 예측에 전적으로 의존
  - 학문의 한계 – 미래 예측의 정확성/방법론적 엄밀성/이론적 체계성 부족
  - 연구의 한계 – 전문적 예측과 일반적 예측의 차별성 부족
  - 정책의 한계 – 미래예측 결과의 집행/통제 수단 부족

- 이러한 한계로 인하여 미래연구는 방법론적 모호성과 내용적 추상성을 지니는 연구로 인식되어 왔음.

6. 미래연구와 SD의 창조적 재결합



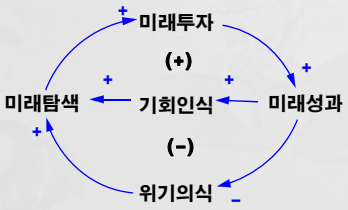
7. 미래준비의 메커니즘

• 미래 준비의 흐름은 세 가지 메커니즘으로 전개될 수 있다.

1) **선순환(vicisous cricle)**: 양의 피드백 루프로서 미래준비를 할 수록
더 많은 미래의 기회를 인식/포착하여
더 많은 미래준비를 하여 진보하는 순환.

2) **악순환 (Vicious circle)**: 동일한 양의 피드백 루프로서
미래준비를 소홀히 할 수록 미래 투자가 약화되고
미래의 기회를 포착하지 못하고 결국 미래의
준비를 더욱 소홀히 하여 나락에 빠지는 순환.

3) **역순환 (Attention Cycle)**: 음의 피드백 루프로서
미래를 준비하여 미래 성과가 향상됨에 따라
미래에 대한 위기의식이 약화되어 미래 준비를
소홀히 하게 되어 미래 준비가 낮아지는 반복 순환.



어느 순환을 타고 갈 것인가? → 미래지향적 리더의 역할

8. SD와 ST의 지속적 순환

得意亡象

주역을 집대성한 왕필의 말: 의미를 이해했으면 괘와 같은 기술을 잊어 버리라는 말.

- SD 시뮬레이션의 최종적인 가치는 모델링과 시뮬레이션을 통하여 얻은 직관(insights)을 어떻게 쉽고도 명쾌하게 전달할 수 있는가에 달려 있다.
- 시뮬레이션을 수행하고 나서, 그 결과를 토대로 하여 컨설팅을 하거나 정책 제언을 하고자 한다면 시뮬레이션 모델을 잊어 버려야 한다. 시뮬레이션 모델이 복잡하고 아름답다는 생각을 다른 사람도 한다면 이는 오해의 꽃이다.
- 따라서 SD 시뮬레이션을 수행하고 나서는 시스템 사고(systems thinking)로 돌아갈 준비를 해야 한다.
- 그러나 시뮬레이션을 통해 얻은 직관을 일반인에게 전달하기 위해서는 '시스템 사고' 를 넘어서는 기술이 요구된다. 즉, 커뮤니케이션 기술과 교육 기술이 추가로 요구된다.

9. SD 소통 기술

첫째 원칙: 상대방의 언어로

1. 전통적 사고: 음양이론, 불교의 연기설, 기독교의 예화...
2. 상식적 속담: 되로 주고 말로 받는다, 다람쥐 쳇바퀴, 칼로 물베기...
3. 상식적 언어: 악순환/선순환, 남녀간의 상열지사...
4. 조직의 언어: 상대방에 친숙한 Story Telling, 유명한 동화나 사례의 소개...
5. 이론적 언어: 상대방에게 친숙한 모델의 도입

둘째 원칙: 모델의 단순화

1. SD 모델중 중요한 부분만을 제시
2. SD 모델을 인과지도로 제시
3. 인과지도중에서 중요한 피드백 루프만을 제시
4. 모델은 블랙 박스로 처리. 가정에 따른 시스템 행태의 변화만을 제시
5. 모델은 블랙 박스로 처리. 시스템의 행태만을 피드백으로 제시

셋째 원칙: 정책에 초점

1. 가급적 정책 섹터를 모델과 분리
2. 모델은 블랙 박스. 정책의 효과만을 피드백 루프로 제시
3. 다양한 가정과 정책의 효과만을 일대일로 대응시키고 그 이유를 간략히 설명
4. 현재의 정책을 그대로 유지할 때의 결과 설명. 진정으로 변화가 필요한가?
5. 논쟁이 되는 정책의 효과를 특징적으로 비교.