

지탱가능한 발전을 위한 서울시 환경용량의 산정과 정책적 함의

Estimating Environmental Carrying Capacity of Seoul Metropolitan Area for a Sustainable Development and Its Policy Implications

문태훈* · 홍민선**
Moon, Tae-Hoon · Hong, Min-Sun

Abstract

The purpose of this paper is estimating environmental carrying capacity of Seoul Metropolitan Area for a sustainable city management using system dynamics modeling. A sustainable development requires society to define sustainability constraints or environmental limits, environmental carrying capacity. Environmental carrying capacity can be defined as the level of human activity which a region can sustain at an acceptable quality of life level. This concept of environmental carrying capacity has several important applications to sustainable city planning and management. If the limitation of a human activity can be supported by a scientific data on carrying capacity, the resulting decision and actions could more easily win public support for a sustainable development. However, one of the key issues is how to operationalize the carrying capacity. In this paper, the environmental carrying capacity was operationalized as a maximum number of industry structure, population, and housing that can sustain certain level of environmental quality of Seoul Metropolitan Area. The model developed in this paper consisted of 5 sectors; population, housing, industry, land, and environmental sector. The model limits its main focus on the NO₂ level of ambient air of Seoul. Carrying capacity of Seoul Metropolitan Area was estimated by figuring out the maximum number of population, industry structure, housing at an equilibrium point that sustain a desirable NO₂ level. Based on the model estimation, several policy implications for a sustainable city management was discussed.

키 워 드 · 환경한계용량, 환경용량, 지탱가능한 발전, 지속가능한 발전, 시스템다이내믹스, 서울시

I. 서론

1. 연구의 목적

환경한계용량(Environmental Carrying Capacity),

또는 환경용량이란 일정한 삶의 질을 지속적으로 유지할 수 있는 수준에서 지역이 지탱할 수 있는 인간활동의 수준을 말한다. 지탱가능한 발전이라는 것이 환경이 지탱할 수 있는 범위 내에서 경제, 사회, 환경 세부문의 균형된 발전

* 본학회 정회원, 중앙대학교 도시 및 지역계획학과 교수

** 아주대학교 환경공학과 교수

2. 환경용량에 대한 선행연구 검토

을 추구하는 것이라면 우리는 어떤 형태로든지 환경용량을 파악해야 할 필요성에 직면한다. 과학적으로 산출된 환경용량에 기초하여 지역의 자연시스템이 어느 정도나 인간의 활동을 지탱할 수 있을지를 파악하고 수용 가능한 경제적, 사회적 인간활동의 한계범위를 제시해 줄 수 있는 구체적인 계획지침이 개발되어야 할 필요가 있다는 것이다.

예를 들어 서울시의 토지, 산림, 녹지의 분포정도, 대기의 상태, 수자원의 양과 질 등을 종합적으로 고려하여 서울시가 수용 가능한 인구규모, 산업활동의 규모, 주택의 규모, 교통량의 규모 등은 어느 정도인지를 파악할 수 있다면 도시의 각종 계획이나 정책 수립에 유용한 지침을 제공할 수 있을 것이다. 이외에도 환경용량의 산출은 도시가 과연 지탱가능한 발전을 위하여 현재 어느 정도의 위치에 와 있는지를 모니터링하고 평가할 수 있는 기반을 제공해 줄 수 있다. 서울시의 수용가능한 적정 인구규모가 환경용량상 약800만 정도라면 현재의 인구가 1000만여 명이므로 앞으로 인구계획이 어떻게 되어야 할 것이라는 등 계획의 구체적 방향을 제공해 줄 수 있을 것이다.

그러나 환경용량에 기반한 계획지침의 개발은 환경용량을 어떻게 산정할 것인가의 어려움 때문에 여전히 미개척의 분야로 남겨져 온 것이 사실이다. 본 연구는 환경용량 산정을 위한 시론적인 연구로서 대기모델인 박스모델과 시스템다이내믹스 모델인 도시동태 모델¹⁾을 결합한 서울시 환경용량모델의 구축가능성을 모색하고 이에 기반하여 서울시 환경용량 추정을 시도하였다. 그리고 제한적이나마 분석결과와의 정책적 함의를 논의하였다.

생태학자들은 환경용량을 “현재 지역에 생존하고 있는 종이 미래에도 생존할 수 있는 가능성을 헤치지 않으면서 수용할 수 있는 최대 개체의 수”로 정의한다. 더 구체적으로 “유기체의 수로 표현된 재생가능한 자원의 크기”를 말한다(Daily & Ehrlich, 1992). 다시 말하면 환경용량이란 재생가능한 자연자원이 지탱할 수 있는 유기체의 최대규모를 말한다. 환경용량은 지역의 크기와 그 지역에 생존하고 있는 유기체의 특성의 함수관계로 표시된다. 다른 조건이 동일하다면, 더 넓고 자연자원이 풍부한 지역일수록 더 큰 환경용량을 가질 것이다. 또 같은 규모의 지역이라도 그 지역에 생존하는 종이 적은 에너지로 생존이 가능하다면 더 많은 에너지를 필요로 하는 종이 생존하고 있는 경우보다 더 큰 환경용량을 가지게 될 것이다. 따라서 일정한 규모의 지역이 지니는 환경용량은 그 지역에 생존하는 유기체가 생존에 필요한 자원의 양이 변하는 속도와 같이 변하게 된다.

인간일 경우 환경용량은 자연생태계가 지탱할 수 있는 최대 인구의 규모를 지칭하는 것으로 사용되어 왔다(Miller, 1979). 인간일 경우 환경용량의 문제는 두가지 이유로 인하여 더 복잡해진다. 인종에 따라 생존에 필요로 하는 자원의 소비량에는 상당한 차이가 있으며, 기술진보를 포함한 문화적인 진보에 따라 개개인이 소비하는 자원의 양은 상당한 차이를 가져오기 때문이다. 따라서 보통 환경용량은 생물물리학적인 환경용량과 사회적 환경용량으로 구분한다. 생물물리학적 환경용량은 주어진 기술수준에서 생물물리학적으로 생존이 가능한 최대의 인구규모를 말하며, 사회적 환경용량은 특정 수준의

사회체제하의 소비수준에서 수용가능한 최대 인구규모를 말한다. 따라서 어떤 기술수준에서 이 양자를 비교하더라도 사회적 환경용량은 생물물리학적 환경용량의 규모보다는 적게 된다. 이같이 환경용량의 개념은 비교적 명확하지만 용량의 측정은 단순하지가 않다.

환경용량의 개념과 관련하여 지구의 환경용량은 어느 정도인가에 대한 연구는 두 부류로 갈라지고 있다. 한 부류의 연구는 모든 비용을 지불해서라도 지구가 지탱할 수 있는 최대의 인구규모가 얼마인가에 집중되며 다른 한 부류의 연구는 생명을 지탱시키는 생태계가 파괴되지 않는 범위내에서 수용가능한 최대 인구의 규모를 밝히는데 집중된다(Baldwin, 1985:12). 그러나 이미 대부분의 생태학자들은 지구의 환경용량은 초과되었다고 보며 이러한 상태하에서 문제는 삶의 질과 지탱가능성에 모아지고 있다. 즉, 환경용량 이상의 삶을 지구가 지탱할 수는 있으나 여기서는 필연적으로 삶의 질의 저하를 수반하게 된다는 것이다. 이렇게 보면 환경용량은 “일정한 삶의 질을 지속적으로 유지할 수 있는 수준에서 지역이 지탱할 수 있는 인간활동의 수준”으로 정의할 수 있다(Bioshop et.al. 1974).

이러한 입장에서 논의되는 환경용량에 대한 개념은 인간활동이 자연생태계에 미치는 영향, 오염규제를 위한 기준의 설정, 재활용 자원의 지속적인 추출을 가능케 하는 자원개발의 한계, 자연환경에 악영향을 가할 수 있는 인간활동의 한계점의 규명 등 다양한 연구에 활용되고 있다(이창우, 1999; 김선희, 1996). 보다 구체적으로 이러한 연구들은 세 부류로 갈라진다. 첫째, 미래의 자원개발 기반을 파괴하지 않는 범위 내에서 추출할 수 있는 재활용 가능한

자원의 추출량은 어느 정도가 되어야 할 것인가를 규명하는데 이용된다. 둘째, 대기나 수질 기준의 설정에서와 같이 인간건강에 영향을 미칠 수 있는 한계점을 규명하기 위한 연구에서 환경용량의 개념이 사용되는 경우이다. 이 한계점이 규명되면 기준을 충족시키기 위하여 감소되어야 할 오염물질의 양을 계산할 수 있고 반대로 인간에 해를 미치는 정도의 오염물질 배출량을 계산할 수도 있다. 셋째, 자연환경에 악영향을 가할 수 있는 인간활동의 한계점의 규명 등에 관한 연구이다(Baldwin, 1985:13).

본 연구에서 의도하고 있는 환경용량에 대한 연구는 위의 연구범주에서 분류한다면 세 번째 부류에 속한다. 즉, 주어진 자연조건하에서 이러한 자연환경을 파괴하지 않는, 자연의 재생산능력을 해치지 않는 범위 내에서의 인간활동의 한계점이 어느 정도인가를 파악하고자 하는 것이기 때문이다. 이러한 부류의 연구로 가장 좋은 예는 야생동식물 서식지를 파괴하지 않으면서 수용할 수 있는 관광객의 수는 최대한 어느 정도인가에 대한 연구(Shelby & Colvin, 1982; Tarrant & English, 1996), 성공적인 농업경작을 위한 적정인구밀도를 환경용량의 관점에서 행한 연구(Fearnside, 1985), 도시지역에서 일정한 삶의 질과 환경의 질을 목표로 할 때 인구수용량이 어느 정도이며 현재의 상태는 어떠한가에 대한 연구(Onishi, 1994; 문태훈, 1999b, 1998; 이창우, 1999, 2000) 등이 있다.)

환경용량에 대한 연구들은 환경정책에 몇가지 중요한 응용가능성을 시사해 주고 있다. 인간활동의 한계가 보다 과학적 방법으로 규명될 수 있다면 각종 계획과 인간활동에 대한 여러 가지 결정을 보다 용이하게 내릴 수 있을 것이

며 모호한 지탱가능한 개발의 개념을 실천적인 개념으로 대치시켜 줄 것이다. 뿐만 아니라 환경용량의 개념은 인구과밀상태에 있는 지구에서 장기적으로 인간이 당할 고통을 최소한으로 줄이기 위해서, 그리고 인류의 후손들이 번창할 수 있는 여지를 남겨두려는 윤리적인 의미에서도 필요한 개념으로 주장되고 있다(Hardin, 1975).

그러나 문제는 환경의 환경용량 산정이 단순한 것이 아니라는 점이다. 환경용량의 산정에 대한 비판들은 대체로 환경용량이라는 것이 기술의 발전정도, 인간의 선호도, 생산과 소비를 망라하는 경제활동의 구조 등에 의하여 지속적으로 변화하는 것임에도 불구하고 환경용량의 산정이 인구밀도와 기술 및 제도가 무관하다는 가정에 입각해 있을 뿐 아니라 소비와 생산에 있어서 경제학의 대체이론이 무관한 것으로 가정되고 있으며, 인구밀도와 사회복지 함수가 무관하다는 가정에 입각해 있다는 점 등에 모아지고 있다(Mackellar, 1996). 뿐만 아니라 환경의 환경용량은 물리적 환경과 생물학적 환경과의 상호작용에 의해서도 끊임없이 변화한다(Arrow, Bolin, Costanza et.al, 1995: 520-521). 따라서 환경용량은 불변의 고정된 숫적인 개념으로서는 의미가 없으며 일정한 환경의 질을 목표로 할 때, 인간활동과 환경요소들간의 복합적이고 순환적인 양방향의 상호작용에 의하여 변화되는 개념으로 파악되어야 한다. 그리고 환경용량을 산정하기 위한 방법은 이같이 복잡하게 얽힌 각 요소들간의 연쇄적인 인과관계를 동태적으로 고려할 수 있어야 한다.

II. 환경용량 산정을 위한 시스템다이내믹스 모델

1. 모델개요

본 논문에서 환경용량의 산정을 위한 모델은 대기부문 중 이산화질소만을 대상으로 한 소규모 모델의 구축에 한정하였다. NO₂만을 대상으로 한 것은 환경용량 모델을 최대한 단순화시킬 필요가 있었고 또, 도시 대기오염의 주원인이 자동차로 인한 이산화질소 오염으로 밝혀지고 있기 때문이었다. 모델은 시스템다이내믹스(System Dynamics)의 모델링 방법을 사용하였다. 시스템다이내믹스는 동태적이고 순환적 인과관계의 시각으로 (dynamic feedback perspective) 현상을 이해하고 설명하며, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모델을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변해 나가는지를 컴퓨터상에서 실험해 보는 방법론이자 현상을 바라보는 시각이며 준거틀 (framework) 이다.

이 동태적 체계이론은 1961년 MIT의 J. Forrester 교수가 산업체 재고량의 불안정한 변화, 노동력의 불안정한 변화, 그리고 시장점유율의 감소 문제를 다루기 위하여 공학의 제어이론(Control Theory)에 바탕을 둔 컴퓨터 모의 실험 결과를 다양한 각도로 분석한 *Industrial Dynamics* 『산업 동태론』을 저술한 것이 방법론적인 효시가 된다. 이후, 시스템다이내믹스는 거시적인 차원에서는 도시 및 산업문제, 지탱가능한 발전문제들을 포함한 다양한 사회 및 경제문제에 대한 이해나 해결책을 모색하기 위하여, 그리고 미시적인 차원에서는 기업의 경영문제, 인간의 의사결정행위에 대한 이해를 증진시키기 위한 방법으로 광범위하게 응용되어 왔다 (김도훈, 문태훈, 김동환, 1999; Forrester, 1961, 1969, 1971; Hamilton, et. al.,

1969; Mass, 1974; Sterman, 1987; Darling and Richardson, 1990).

이 접근방법의 특징은 모든 현상을 원형의 환류체계(Circular Feedback System)의 관점에서 이해한다는 것과, 파라미터의 정확한 측정보다는 연구하고자 하는 특정변수가 시간의 변화에 따라 어떻게 동태적으로 변화해 나가는가에 기본적인 관심을 둔다는 것이다. (Richardson, 1982: 1-2; Meadows, 1980: 30-36). 보다 상세히 살펴보면 다음과 같다.

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

둘째, 모든 현상을 내부순환적 환류체계(closed loop thinking, circular feedback system)의 관점에서 이해한다는 것이다(김도훈 문태훈 김동환, 1999: 36). 즉, 어떤 변수의 동태적인 변화를 시스템 내부에 존재하는 변수들과의 원형의 역동적인 상호작용(circular causation, two-way causation or feedback)에 의하여 일어나는 것으로 파악한다. 이때 시스템은 일반적 체제이론에서 말하는 시스템과는 다른 개념을 가

진다. 여기서 시스템은 연구대상의 변수가 동태적 변화를 일으키는 데 관련되는 변수들의 집합체를 의미한다. 이러한 체제에서는 기존의 개방체제와 폐쇄체제의 구분은 더 이상 의미를 갖지 못한다. 따라서 변수의 동태적 변화는 시스템 내부의 원인에 의하여 발생하는 것이 아니라 시스템 밖의 외부변수에 의해서 발생하는 것이 아니게 된다. 이런 의미에서 시스템다이내믹스는 내부순환적, 또는 내부지향적 관점(endogenous point of view)을 가지며, 관련된 변수들이 일방향의 단선적인 영향을 주는 것이 아니라 원형의 인과관계에 의하여 동태적인 상호작용을 하고 있는 것으로 파악하기 때문에 원형의 피드백 관점을 가진다(Richardson, 1982:1-2; Meadows, 1980:30-31). 아래 그림1은 일방향의 단선적 인과관계는 학업성취도에 여러 원인들이 일방향으로, 그리고 일회적인 영향을 미치는 구도로 이해되고 있다. 그러나 그림2 원형의 피드백관점에서는 학업성취도에 영향을 미치는 변수들이 순환적으로 영향을 주고 받는 상호작용 관계에 지속적으로 놓여 있음을 나타내고 있다(High Performance Systems, 1994:25-26).³⁾ 종속변수와 독립변수의 구분은 더 이상 의미가 없게 된다.

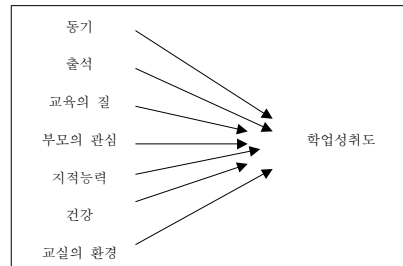


그림1. 일방향의 단선적 인과관계

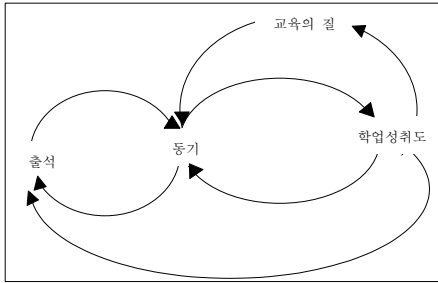


그림2. 원형의 내부순환적 환류체계

이러한 시스템다이나믹스의 관점에 입각한 환경용량 산정을 위한 모델의 개념도는 그림3과 같다. 모델에서 도시는 크게 인구, 산업, 주택, 환경, 토지, 차량의 다섯 부문으로 구성되어 있으며 각 부문은 서로간에 영향을 주고받는 역동적인 관계를 가지는 것으로 설정되어 있다. 여기서 환경부문의 모델은 Box Model을, 도시의 인구, 산업, 주택, 토지, 차량부문은 도시동태모델을 이용하였으며 이 두 모델을 결합하여 서울시 환경용량 모델을 구축하였다. 모델의 목적은 녹지를 포함하는 한정된 토지공간

이 주어져 있다고 가정할 때, 이 공간내에서 일정한 환경의 질을 유지할 수 있는 지탱가능한 인구규모, 산업활동의 규모, 주택의 규모, 자동차의 규모는 어느 정도인가를 동태적으로 파악함으로써 서울시의 환경용량을 산정하고자 하는 것이다.

2. Box Model을 이용한 서울시 이산화질소 농도의 추정

이 모델에서 환경부문은 가장 중요한 부문으로 목표 대기질을 설정하면 (여기서는 대기중 목표 NO₂ 농도) 서울시의 대기중 이산화질소의 농도가 목표 대기질에 최대한 근접해 나가도록 인구, 산업, 교통, 주택, 녹지부문이 동태적으로 조정되어 나가도록 설정되었다. 서울시의 대기중 이산화질소의 농도는 Box Model로 추정하였다. Box Model을 사용한 것은 서울시의 전체의 평균 대기질을 일정한 목표수준에서 유지하는 경우의 한계용량을 산정하기 위한

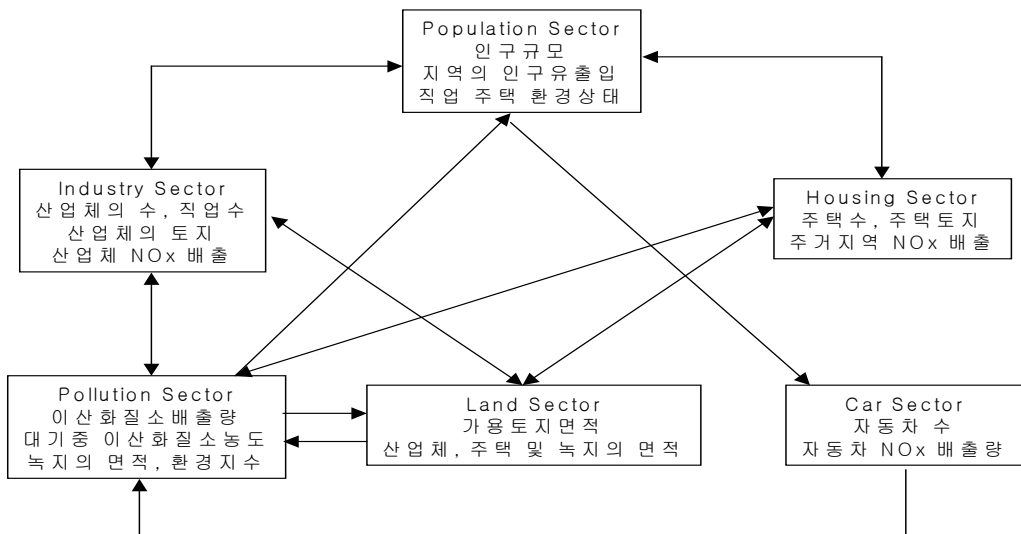


그림3. 환경용량과 인간활동 모델의 개념도

것이었습니다. 이를 위한 평균 대기질의 산정에
는 Box Model이 비교적 적합하다고 판단하였
기 때문이었다.⁴⁾

1) BOX MODEL

Box Model은 대류현상이 활발하여 공간내
오염물질이 고르게 분포되어 있다고 가정할 때
CSTR(Continuous Stirred Tank Reactor) 개념이
도입된다. 본 연구에서는 서울시를 대상으로
1년간 유출입 되는 NO₂량과 건성침착(dry
deposition)과 화학 반응에 의해 전환되는 양을
상자(Box)모형을 이용하여 추정하였다.

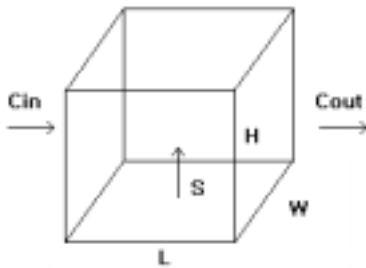


그림4. Box model

$$V \frac{dc}{dt} = q C_{in} - q C_{out} + S - K_{dd} CLW - K_{cr} CV$$

q=체적속도 (m³/sec)

K_{dd}=건성침착속도 (m/sec)

K_{cr}=화학반응속도 (1/sec)

qC_{in}=오염물질 유입량 (g/sec)

qC_{out}=오염물질 유출량 (g/sec)

S=오염물질 배출량 (g/sec)

K_{dd}CLW=건성침착에 의한 오염물질 제거량
(g/sec)

K_{cr}CV=화학반응에 의해 전환되는 양 (g/sec)

Wi=바람속도 (m/sec)

위 식에서, V(=L×W×H)는 서울시의 공간
체적(m³)을 나타내며, q(m³)는 유출입 되는 공
기의 체적으로 공기가 비압축성이므로 유출입
면에서 동일하다고 가정하였다. 서울시의 면적
은 대략 605km²정도로 상자의 길이(L)와 너비
(W)를 각각 25km로 가정하였다. H(m)은 오염
물질이 일정높이 까지 혼합되는 높이(mixing
height)를 나타낸다.

또, C_{in}는 유입되는 농도와 C_{out}은 유출되는
농도를 나타내며, 위 식에서 첫 번째 항은 일
정기간동안 유입되는 NO₂의 총량을, 두 번째
항은 동 기간동안 유출되는 NO₂ 총량을 나타
낸다. 일정기간(1년)동안 농도의 변화가 없
다

고($V \frac{dc}{dt} = 0$) 가정하면, $q=H \times W \times Wi \times \text{Time}$
(1yr)이다. 세 번째 항은 NO₂ 배출량으로써
S(kg/yr)는 산출된 NO_x 배출량 중 NO로의 전
환을 고려해주기 위해 1년동안('98년) 서울시
에서 관측된 NO₂/NO_x 비(0.456)를 이용하여 배
출량을 재 산정하였다. 오른쪽 넷째항은 건성
침착에 의한 제거량으로, K_{dd}는 건성침착속
도(cm/sec)이고 본 모사시 K_{dd}=0.5cm/sec로 가
정하였다. 다섯 번째 항은 화학반응에 의해 전
환되는 양으로 K_{cr}는 반응속도 상수를 나타
낸다.

2) 박스모델의 형태

박스모델을 시스템다이내믹스 모델로 전환
하면 아래와 그림5와 같은 모델로 표현될 수
있다. 물론 서울시 대기중 NO₂ 농도는 혼합고,
유입농도, 풍속, 침착속도의 변화에 따라 변
화하겠지만 여기서는 혼합고 1Km, 유입농도
30ppb, 풍속 1.5m/sec, 건성침착 도심 및 녹지
0.033cm/sec, 0.098 cm/sec의 경우로 한정
하였다. 이 박스모델의 형태는 그림6에 나타
나있는데 서울시의 NO₂ 배출량이 일정할 때
서울시 대

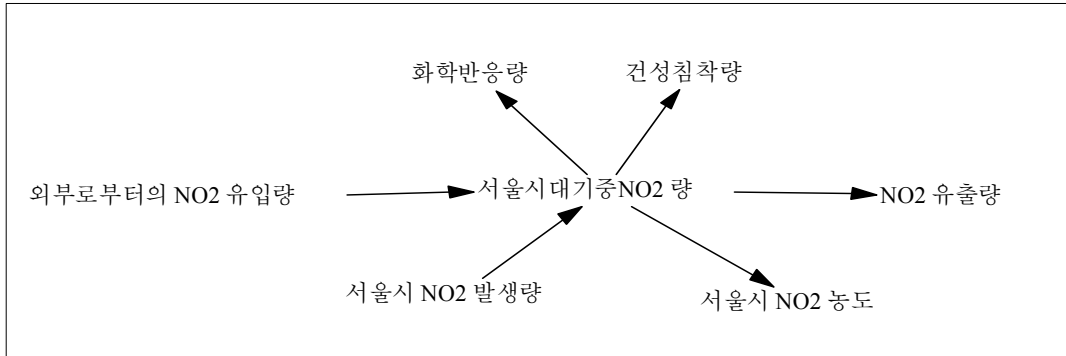


그림5. 박스모델 인과지도

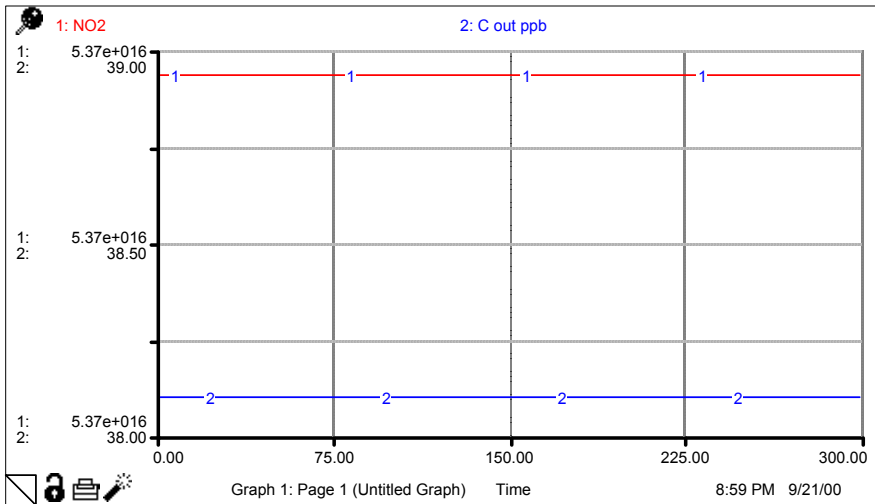


그림6. Box Model의 행태

기중 NO₂의 연간 농도는 약38ppb 수준에서 유지되고 있음을 보여주고 있다.

이 Box Model을 인과지도로 표현한 환경부문 모델의 개념도는 그림7과 같다.

환경부문 모델을 간략히 설명하면 다음과 같다. 고정오염원인 산업부문과 주거부문과 이동오염원인 자동차에서 배출되는 이산화질소는 이 모델에서의 주된 오염물질로 설정되고 있다. 서울시 이산화질소의 농도는 서울시로 유입되는 외부로부터의 이산화질소의 유입량과

서울시에서 발생하는 이동오염원과 고정오염원으로부터의 이산화질소의 배출량, 그리고 이들 이산화질소가 화학반응(chemical reaction)으로 다른 물질로 변하는 양, 그리고 건성침착(dry deposition)되는 양의 크기에 의하여 결정된다. 그런데 건성침착은 녹지에서 일어나는 이산화질소의 침착과 도심지역의 비녹지 지역에서 일어나는 이산화질소의 침착으로 구성되는데 물론 녹지지역에서의 이산화질소의 침착이 훨씬 더 빠른 속도로 많이 이루어진다.

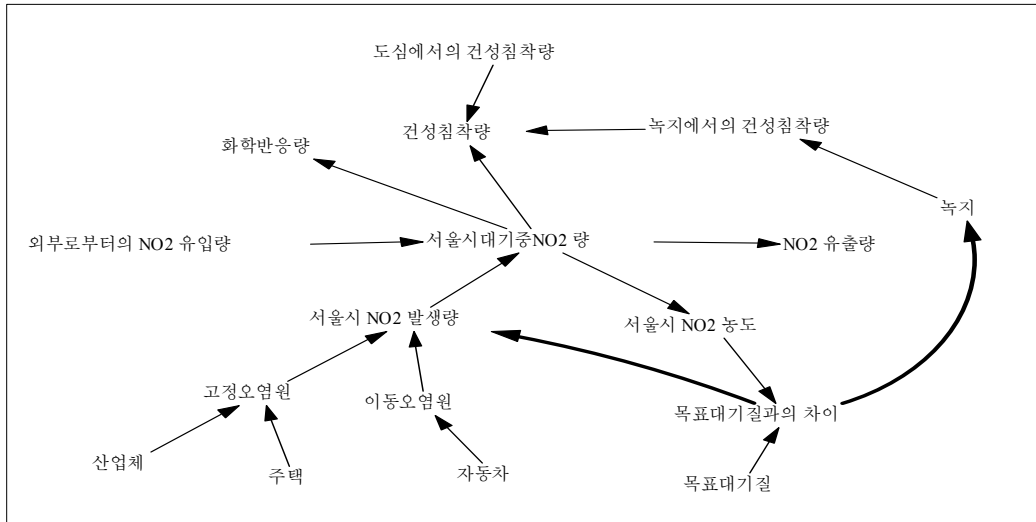


그림7. 환경부분의 인과지도

그런데 이 인과지도의 그림에서 녹지가 포함되고, 굵은 선으로 표시된 인과관계의 루프(loop)들이 보이는데 이 인과관계는 사실적인 인과관계를 나타낸다기 보다는 이 모델이 목표 대기질로 근접해 갈 수 있도록 하는 정책리렛대(policy leverage)의 역할을 하여 궁극적으로 서울시가 목표 대기질을 이루었을 때 수용 가능한 인구의 규모나 주택, 산업체, 차량의 규모가 어느 정도인가를 밝히기 위하여 삽입된 루프이다.

서울시의 대기질이 목표 대기질과 현격한 차이가 있어 서울시의 대기오염이 심각해지면 두가지 측면에서의 대응이 가능하다. 첫째, 대기오염물질의 총 배출량을 기술개발을 통해서나 자동차, 산업체의 절대량의 감소를 통하여 줄이거나, 둘째, 이산화질소의 흡착원인 도심 녹지의 규모를 증대시켜서 대기질을 향상시키는 방법이다. 주어진 토지내의 주어진 자연환경인 녹지는 지역주민들에게 신선한 산소를 공급해 주는 한편 고정오염원과 이동오염원에서

배출되는 이산화질소를 흡착하는 흡수원으로서의 역할도 동시에 하기 때문이다. 그러나 녹지의 면적은 무한히 증가할 수 없다. 서울시의 토지용량이 한계가 있기 때문이다. 다른 한편으로 녹지면적의 증가는 토지용량의 한계범위를 압박하여 산업체의 증가는 물론 주택의 증가를 억제하는 요인으로 작용한다. 토지이용이 녹지면적, 산업체부지, 택지간에서 경쟁이 일어나게 되는 것이다. 여기서 환경의 질은 대기중 이산화질소의 농도와 목표 이산화질소의 농도의 비율로 산정하였는데 $\frac{\text{서울시 NO2 ppb}}{\text{목표 NO2 ppb}}$ 로 계산되었다.

3. Box Model과 도시동태 모델과의 결합 - 서울시 환경용량모델

이상 Box Model에 기반한 환경모델을 도시동태 모델과 결합하여 시스템다이내믹스 모델의 인과지도로 표시하면 그림8과 같다. 그림8에서 상단 부분은 도시동태 모델을, 하단 부분

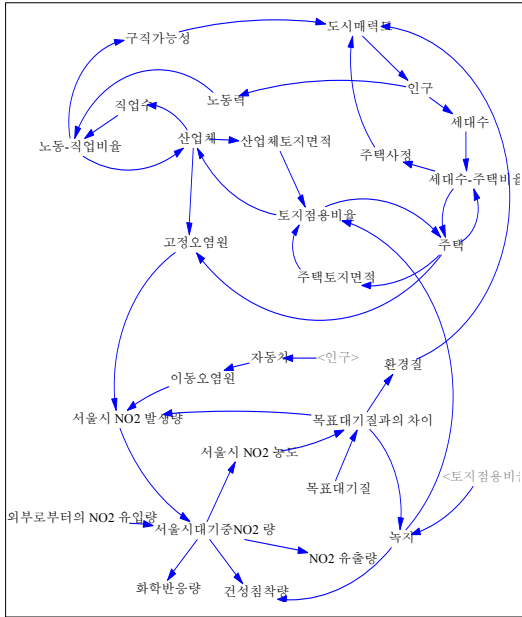


그림8. 서울시 환경용량모델의 인과지도

은 앞에서 설명한 환경모델의 인과지도를 나타내고 있다. 인과지도를 간략히 설명하면 다음과 같다. 도시의 성장과 쇠퇴는 인구의 유출입에 따라 순환되는데 도시로의 인구유입은 크게 도시의 일자리, 주택의 사정, 환경의 질에 의하여 결정된다. 일자리가 풍부하고, 주택사정이 양호하며, 환경의 질이 양호할 때 도시는 인구 유입의 매력도가 커, 주변 지역으로부터 급속히 인구를 끌어들이게 되지만 지속적인 인구의 급속한 유입은 일자리를 부족하게 만들고 주택사정을 악화시키며, 환경의 질을 저하시키면서 도시는 점차 그 매력을 잃어가게 된다. 뿐만 아니라 가용토지가 한정되어 있다고 가정할 때 산업체, 주택, 녹지의 증가는 가용토지의 양을 점차 축소시켜 산업체의 입지와 주택의 증가를 어렵게 하여 인구의 유입은 점차 억제된다. 하단 부분에 “서울시 대기중 NO₂ 량”을 중심으로는 앞에서 설명한 박스모델에 입각한 환경부

문 모델이 나타나 있다. 서울시의 인구, 산업, 주택, 환경, 토지부분의 상호 동태적인 순환적인 과정이 그림8로 표현되고 있는 것이다.

III. 모델행태와 서울시 환경용량

그림8로 표현된 서울시의 환경용량모델 인과지도는 시스템다이내믹스 모델로 전환되어 컴퓨터 모의실험을 수행하였는데 그 결과는 아래와 같다.

1. Base Run

Base Run에서는 서울시의 이산화질소 대기질의 목표를 일단 현재 우리나라의 환경기준과 동일한 50 ppb로 설정하였다. 그리고 연평균 이산화질소 50 ppb의 대기질을 서울시가 유지하기 위해 서울시가 수용가능한 최대한의 인구, 산업, 주택, 차량, 녹지 등의 규모가 어느 정도인가를 추정하였다. 그림9, 그림10, 그림11은 시뮬레이션 시간의 흐름에 따라 각 변수들이 Base Run에서 설정되어 있는 시뮬레이션의 목표인 서울시 이산화질소 대기질 50 ppb를 달성하기 위하여 균형점을 찾아 이동해 나가는 모습을 보여주고 있다. 시뮬레이션 시점 1000에서 각 변수들의 값은 대체로 균형을 이루기 시작했으나 사업체의 수는 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 안정적인 균형값을 구하기 위하여 표1에서 제시된 균형값은 시뮬레이션 시점 3000에서의 값을 취하였다. 여기서 시점 1000, 3000은 시간단위라기 보다는 계산회수의 반복으로 보는 것이 이 경우에는 더 적절하며 실질적으로 시간의 개념과는 큰 관계가 없다. 시스템의 균형점에서 각 변수들의 값이 어떤지를 찾는 것이 목적이기 때문이다.

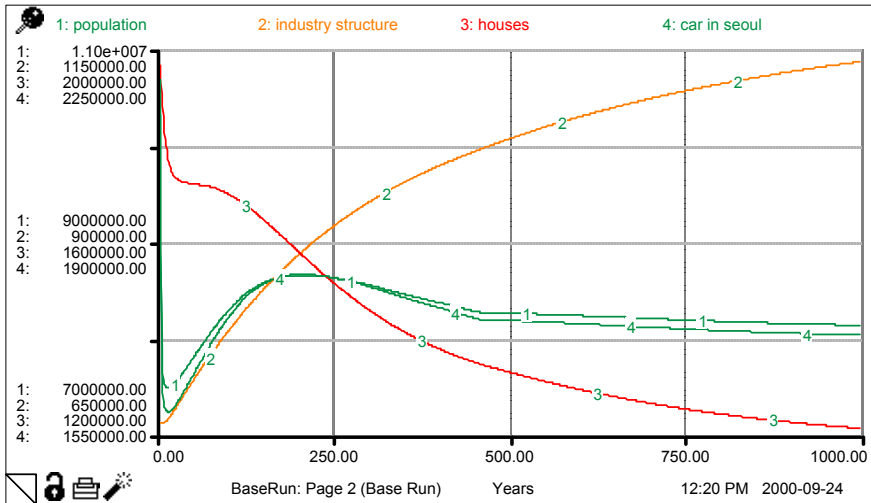


그림9. 서울시 인구, 산업체, 주택, 차량수의 변화

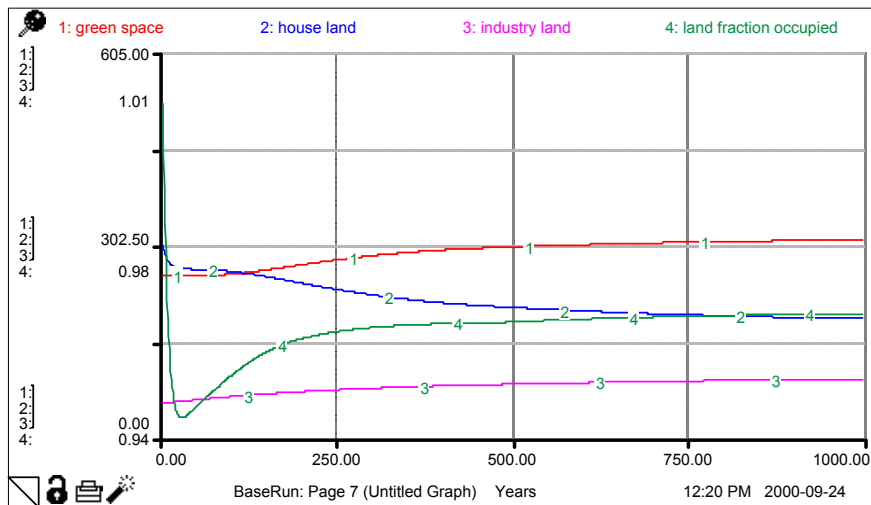


그림10. 서울시의 녹지, 택지, 산업체부지, 토지점용율 변화

시뮬레이션 균형점에서 각 변수들의 값은 대기중 NO₂의 농도가 연평균기준치인 50ppb를 유지하는 상태에서 수용가능한 최대규모의 인구, 산업체수, 주택수, 산업부지, 택지, 녹지의 규모들을 나타내고 있다. 균형값에서 나타나는 인구, 산업체수, 주택수는 서울시가 이산화질소

의 연평균 기준치 50ppb를 목표로 할 때 서울시가 각종 도시계획의 과정에서 최대수용규모의 한계로 지켜야 할 서울시의 환경용량이라고도 볼 수 있다.

Base Run은 녹지가 대기질의 향상을 위한 주요 수단으로 채택되어 이산화질소의 주된 흡

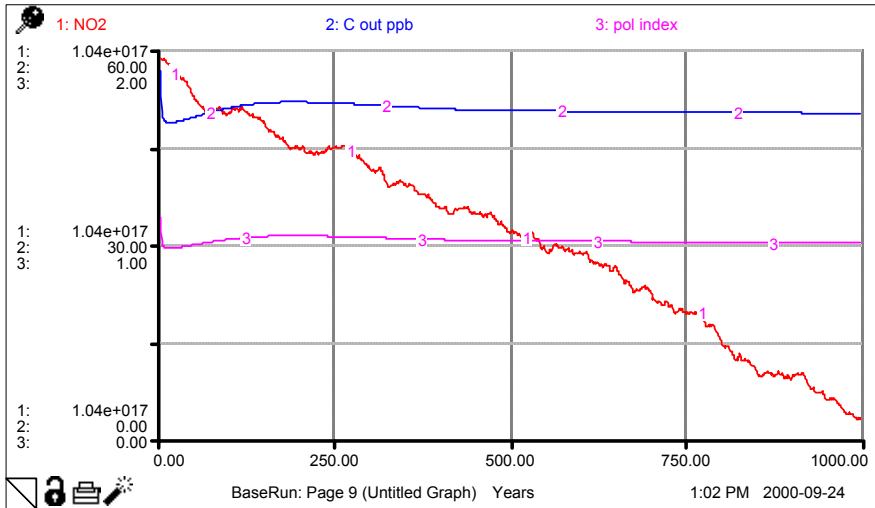


그림11. 서울시 이산화질소의 농도, 환경지수의 변화

표1. 균형값에서의 서울시 인구, 사업체, 주택, 차량, 토지이용 값

	초기값	Base Run 균형값*	비고
인구	10,321,496	8,060,481	명
사업체	663,293	1,203,878	개소
주택	1,968,054	1,155,908	호
차량	2,196,062	1,714,996	대
사업체부지	52.24	94.82	Km ²
택지면적	300.43	176.45	Km ²
녹지면적	253.28	311.79	Km ²
NO ₂	56.79	50	ppb
환경지수	1.14	1.00	서울시 NO ₂ ppb/목표 NO ₂ ppb
세대수-주택비율	1.27	1.82	세대수/주택수
노동-직업수비율	1.07	0.64	노동자수/직업수

* Base Run : 녹지가 대기질에 따라 변화하고 기술변화가 없다고 가정했을 때 (Green Space test=1, Technology factor=1)

수원으로 역할하도록 하는 경우를 가정한 시물레이션이다. 또 여기서 기술의 발전에 따른 이산화질소의 배출량의 감축은 없다고 가정하였다. 균형점에서 서울시의 이산화질소 농도는 50 ppb를 달성하고 있으며 표1에서 보여지듯이 대기질 50 ppb를 목표로 하는 경우 서울시의 환경용량은 인구규모 약 800만명, 사업체의 수 약 120만개, 주택수 약 115만호, 차량대수 170

만대 정도이며 토지이용은 녹지면적 310 Km², 택지면적 176 Km², 사업체 면적 약 95 Km²가 적정 토지이용 패턴이라고 분석되고 있다.

이 경우 도시의 모습은 세대수-주택 비율 1.82에서 보여지듯이 세대수에 비교하여 주택수가 부족한 상황이며 노동-직업비율은 0.64로 노동자의 수에 비교하여 직업의 수가 많아 직장사정은 양호한 상태의 도시로 분석되고

있다.

2. 녹지와 기술수준이 변화하는 경우 모델의 형태

도시의 대기질에 영향을 미치는 두가지 인위적인 요인은 오염물질의 배출량과 녹지에 의한 오염물질의 흡착이다. Base Run에 이어 이 두가지 요소를 변화시킬 때, 즉 녹지를 변화시키거나 기술수준을 변화시킬 때 나타나는 서울시 환경용량의 변화를 살펴보았다. 우선 첫 번째 실험(Test1)은 녹지를 시뮬레이션 초기 값인 현재 서울시의 녹지면적에 고정시키고 변화시키지 않을 경우를 가정하였고 두 번째 실험(Test2)은 녹지를 초기값에 고정시키되 기술변화로 이산화질소 배출량이 20% 감축되는 경우를 가정하였다. 그리고 세 번째 실험(Test3)은 녹지가 변화하고 기술변화로 이산화질소의 배출량도 20% 감축한다고 가정하고 시뮬레이션

하였다.

녹지가 확대되지 않고 동시에 기술수준도 동일하여 배출량의 변화가 없는 경우 서울시의 대기질은 55.99 ppb로 목표 대기질을 달성하지 못하게 된다. 그러나 기술변화로 이산화질소의 배출량이 20% 감축할 수 있다면 추가적인 녹지면적의 증가 없이도 서울시의 대기질은 목표치인 50 ppb를 초과 달성할 수 있어 최대규모의 인구를 수용할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 녹지면적의 변화가 허용되는 Test3에서 녹지면적의 증가가 일어나지 않고 있는 것은 이미 배출량의 감소로 목표 대기질을 서울시가 달성하고 있는 상태이기 때문에 추가적인 녹지면적의 확대가 목표 대기질의 달성을 위하여 필요 없었다는 의미이다. 이 경우 서울시의 모습은 여전히 세대수-주택의 비율이 높아 주택 부족 현상이 있는 반면 노동-직업의 비율은 낮아 직업사정은 양호한 것으로 나타나고 있다.

표2. 녹지와 기술이 변화하는 경우 서울시 환경용량의 변화

	초기값	Base Run 균형값*	Test1	Test2	Test3
인구	10,321,496	8,060,481	9,799,562	9799562	9799569
사업체	663,293	1,203,878	1,457,211	1457211	1457211
주택	1,968,054	1,155,908	1,408,465	1408465	1408465
차량	2,196,062	1,714,996	2,085,013	2085013	2085013
사업체부지 Km2	52.24	94.82	114.77	114.77	114.77
택지면적 Km2	300.43	176.45	215.01	215.01	215.01
녹지면적 Km2	253.28	311.79	253.28	253.28	253.28
NO2 in ppb	56.79	50	55.99	49.28	49.28
환경지수	1.14	1.00	1.12	0.99	0.99
세대수-주택비율	1.27	1.82	1.81	1.81	1.81
노동-직업수비율	1.07	0.64	0.64	0.64	0.64

*Base Run : 녹지가 대기질에 따라 변화하고 기술변화가 없다고 가정했을 때 (Green Space test=1, Technology factor=1)

Test1: 녹지를 초기값에 고정시키고 변화시키지 않을 경우

Test2: 녹지를 초기값에 고정시키되 이산화질소 배출량 20% 감축하는 경우

Test3: 녹지가 변화하고 이산화질소 배출량을 20% 감축한다고 가정할 때 2. 녹지와 기술수준이 변화하는 경우 모델의 형태

요약하면, 기술수준의 향상으로 현재 서울시의 이산화질소 배출량을 20%정도 감축할 수 있다면 서울시는 추가적인 녹지면적의 확대 없이도 목표 대기질 50ppb를 달성할 수 있으며 이때 서울시의 환경용량은 인구규모 약 980만 명, 사업체 약 145만개소, 주택 약 140만호, 차량 200만대의 규모이며 토지이용은 사업체부지면적 114Km², 택지면적 약 215Km², 녹지면적 250Km²의 배분으로 나타나고 있다.

3. 목표대기질을 30 ppb로 하는 경우

서울시의 대기질 목표를 30 ppb로 하는 경우 서울시의 환경용량은 다음 몇가지 경우로 나누어 분석된다.

첫째, 배출량의 감소없이 녹지면적의 증대만을 통하여 서울시의 대기질을 향상시키는 경우 (Test 4) 서울시의 환경용량은 적정인구규모 200만명, 사업체 수 34만 개소, 주택 27만 호, 차량 43만대 등으로 급격한 환경용량의 감소에

직면한다. 이것은 서울시의 현재 대기질 보다 획기적인 대기질의 개선을 위해서는 녹지의 확충을 통한 방법으로는 한계가 있다는 것을 의미한다. 현 서울시의 인구가 1032만명인 것을 감안한다면 대기질을 30 ppb로 향상시키기 위하여 인구의 규모를 200만명 선으로 줄이는 것은 현실적으로 불가능한 일이기 때문이다.

둘째, 녹지면적도 증가시키지 않고 배출량도 감소시키지 않을 경우 (Test 5) 목표 대기질을 달성할 수는 물론 없다. 셋째, 녹지를 증가시키고 기술의 변화로 이산화질소의 배출량을 20% 줄이는데 성공하는 경우(Test 6) 서울시의 인구는 최대한 280만명 선까지는 수용이 가능한 것으로 분석되고 있다. 이 경우 대기질은 목표 대기질을 달성하고 있으나 녹지면적이 서울시에서 큰 비중을 차지하게 되어 사업체 면적과 택지면적으로 압박함으로써 적정 인구규모를 크게 억제하고 있는 것이다.

넷째, 녹지면적을 그대로 두고 배출량을 20% 감소시키는 경우 서울시의 대기질은 목표

표4. 목표 대기질 30 ppb인 경우 서울시의 환경용량

	초기값	Base Run 균형값*	Test4	Test5	Test6	Test7
인구	10,321,496	8,060,481	2040032	9547640	2803709	9727559
사업체	663,293	1,203,878	342651	1442759	439725	1452303
주택	1,968,054	1,155,908	278864	1413337	392739	1410532
차량	2,196,062	1,714,996	434049	2031412	596533	2069693
사업체부지 Km ²	52.24	94.82	26.99	113.63	34.63	114.38
택지면적 Km ²	300.43	176.45	42.57	215.75	59.95	215.32
녹지면적 Km ²	253.28	311.79	513.66	253.28	488.58	253.28
NO2 in ppb	56.79	50	29.37	55.29	30.04	49.12
환경지수	1.14	1.00	0.98	1.84	1.0	1.64
세대수-주택비율	1.27	1.82	1.91	1.76	1.86	1.80
노동-직업수비율	1.07	0.64	0.57	0.63	0.61	0.64

Test4: 녹지면적이 변하고 기술변화가 없을 경우

Test5: 녹지면적이 변하지 않고 기술변화가 없을 경우

Test6: 녹지면적이 변하고 기술변화가 있는 경우

Test7: 녹지면적이 변하지 않고 기술변화가 있는 경우

표5. 목표대기질이 40 ppb인 경우 서울시의 환경용량

	초기값	Base Run 균형값*	Test 8	Test 9	Test 10
인구	10,321,496	8,060,481	5151317	9803894	6433971
사업체	663,293	1,203,878	773688	1457578	963113
주택	1,968,054	1,155,908	736638	1408295	921607
차량	2,196,062	1,714,996	1096025	2085935	1368930
사업체부지 km ²	52.24	94.82	60.93	114.8	75.85
택지면적 km ²	300.43	176.45	112.45	214.98	140.69
녹지면적 km ²	253.28	311.79	409.69	253.28	366.53
NO2 in ppb	56.79	50	40.00	49.29	40
환경지수	1.14	1.00	1.00	1.23	1.0
세대수-주택비율	1.27	1.82	1.82	1.81	1.82
노동-직업수비율	1.07	0.64	0.64	0.64	0.64

Test 8: 녹지를 변화시키고 기술변화가 없는 것으로 가정할 때
 Test 9: 녹지를 변화시키지 않고 기술변화가 있는 것으로 가정할 때
 Test 10: 녹지를 변화시키고 기술변화가 있는 것으로 가정할 때

대기질을 달성하지 못한다. 대기질의 목표가 50 ppb 였을 때와는 달리 이산화질소 배출량의 20% 감축을 통해서도 30 ppb라는 대기질 목표를 달성할 수 없다는 것이다. 서울시가 대기중 이산화질소 농도 30 ppb라는 대기질 목표를 달성하기 위해서는 20% 이상의 획기적인 이산화질소 배출량의 감소를 기술적으로 이룩하던지 그렇지 않으면 표4에서 보여지는 바와 같이 환경용량내로 대폭적인 도시규모의 축소가 불가피하다고 볼 수 있다.

4. 목표대기질을 40 ppb로 하는 경우

대기중 이산화질소 농도를 서울시의 환경기준과 동일한 40ppb를 목표로 하는 경우 서울시의 환경용량은 아래와 같이 분석된다. 첫째, 기술발전을 통한 이산화질소 배출량의 감축이 없고 녹지의 확충만을 통하여 대기질 개선을 도모할 때(Test 8) 목표 대기질 40 ppb를 달성하는 상태에서 서울시의 환경용량은 인구규모 515만, 사업체 77만개소, 주택 73만호, 차량 100만대 등이며 토지이용은 사업체 부지 61

km², 택지면적 112 km², 녹지면적 409 km² 로 나타나고 있다.

둘째, 녹지의 변화없이 기술변화를 통한 배출량의 변화만 있는 경우(Test 9)에는 서울시의 목표 대기질이 달성되지 못함을 보여주고 있다. 50ppb가 목표인 경우와 달리 40ppb가 목표인 경우에도 역시 녹지의 변화없이 배출량의 20% 감소만으로는 목표 대기질 40ppb를 달성할 수 없음을 보여주고 있다. 기술발전만으로 목표 대기질 40ppb를 달성하기 위해서는 20% 이상의 이산화질소의 배출량 감소가 필요하다는 것을 의미한다. 셋째, 녹지를 증가시키고 동시에 20% 배출량의 감소를 달성하는 경우(Test 10) 서울시의 환경용량은 인구규모 640만명, 사업체수 96만개소, 주택 92만호, 차량 136만대 등으로 분석되고 토지이용은 사업체 부지 76 km², 택지면적 140 km², 녹지면적 366 km² 등으로 나타나고 있다.

IV. 정책적 함의 및 활용과제

환경용량은 일정한 삶의 질을 지속적으로

표6. 대기질 목표 변화에 따른 서울시 환경용량의 변화

목표대기질		인구	사업체	주택	사업체부지	택지면적	녹지면적
대기질 50 ppb	녹지확대	800만	120만	115만	94	176	311
	배출량감소	980만	145만	140만	114	215	253
	녹지확대 배출량감소	980만	145만	140만	114	215	253
대기질 40 ppb	녹지확대	515만	77만	73만	61	112	409
	녹지확대 배출량감소	640만	96만	92만	76	141	367
대기질 30 ppb	녹지확대	204만	34만	28만	27	43	514
	녹지확대 배출량감소	280만	44만	39만	35	60	489

유지할 수 있는 수준에서 지역이 지탱할 수 있는 인간활동의 수준이다. 따라서 지역의 환경용량은 여러 요인에 의하여 영향 받는다. 지역의 환경적인 조건은 물론 삶의 질의 목표, 기술수준에 밀접한 영향을 받는다. 삶의 질의 목표가 높을수록 지역이 지탱할 수 있는 인간활동의 수준은 억제되어야 할 것이며 기술수준이 아주 높아져 오염물질의 배출이 감소된다면 청정기술 덕분에 지역이 지탱할 수 있는 인간활동의 수준은 그만큼 높아질 것이며 따라서 환경용량도 늘어난다고 볼 수 있다.

서울시의 환경용량 역시 서울시의 환경상태, 서울시가 목표로 하는 삶의 질(여기서는 이산화질소의 농도로 표현되는 대기질의 수준)이 어느 정도인가, 그리고 기술수준은 어느 정도인가에 따라 변화한다. 서울시의 환경상태는 외부에 의하여 유입되는 이산화질소의 양과 서울시에서 발생하는 이산화질소의 양, 이산화질소들이 화학적 반응에 의하여, 그리고 건성침착에 의하여 감소되는 양에 의하여 결정된다. 이 과정은 Box Model을 이용한 시스템다이나믹스 모델로 서울시의 환경상태를 추정하였다. 또, 서울시가 목표로 하는 삶의 질은 서울시가 일반적으로 정하는 것이 아니라 시민들과 서울

시의 미래비전에 대한 합의에 의해 결정되는 것이라 본다면 본 연구에서 제시된 50 ppb, 40 ppb, 30 ppb 등 대기질의 목표치는 몇가지 예시에 불과하다 할 수 있다. 지금까지 시뮬레이션의 결과들을 종합하면 표6과 같다.

첫째, 서울시가 현재 우리나라 환경기준치인 이산화질소의 대기질 50 ppb를 목표로 한다면 현 서울시의 인구규모는 서울시의 환경용량에 크게 벗어나지는 않고 있음을 알 수 있다. 기술발전으로 인한 이산화질소 배출량의 감소가 전혀 없는 경우 서울시의 환경용량은 인구 800만, 사업체 120만 주택 115만 정도로 분석되고 있다. 물론 이 경우에도 현 서울시의 인구는 1030여 만 명으로 환경용량의 지탱가능한 인구규모 보다 약 230 만 명이 초과되고 있음을 알 수 있다. 녹지면적은 310 Km², 택지면적은 176 Km², 사업체 부지면적은 약 94 Km² 정도로 나타나고 있다.

둘째, 서울시가 이산화질소의 배출량을 20% 줄일 수 있다면 녹지의 확충 없이도 대기질 목표 50ppb를 달성할 수 있으며 이 경우 서울시의 환경용량은 크게 증가한다. 서울시의 환경용량은 인구 980만, 사업체 145만, 주택 140만 호의 규모로 나타나고 있다. 인구의 수용규모

가 늘어난 것은 배출량의 감소로 인하여 녹지의 확충 없이도 대기질 목표를 달성할 수 있으므로 녹지로 전환되던 토지가 이제는 사업체와 주택에 이용될 수 있기 때문이다.

셋째, 이산화질소의 대기중 농도 40 ppb를 대기질의 목표로 설정한다면 서울시의 환경용량은 그에 상응하게 축소한다. 더 높은 삶의 질을 유지하기 위해서 인간활동의 수준이 그만큼 축소되어야 한다는 것이다. 배출량의 감소가 전혀 없고 녹지의 확대에만 의존하는 경우를 상정한다면 서울시의 환경용량은 인구 515만 정도로 나타나고 있으며 녹지의 확대와 배출량의 감소가 동시에 가능할 경우 서울시의 환경용량은 인구 640만명 정도로 분석되고 있다. 이 경우 배출량의 20% 감소만으로 서울시의 환경목표치를 달성할 수 없다. 따라서 배출량의 감소만으로 서울시 대기질의 목표치를 달성하기 위해서는 배출량의 감소가 20%를 훨씬 상회할 수 있어야 한다.

넷째, 대기질의 목표치가 30 ppb 로 가계되면 서울시의 환경용량은 급격히 축소한다. 이 경우 서울시의 환경용량은 인구규모 200만-280만명 규모로 축소하는데 이산화질소 배출량의 감소가 없는 경우 200만 명이, 배출량의 감소가 이루어지는 경우 280만 명 정도로 적정 인구규모가 분석되었다. 이 경우도 배출량의 감소만으로는 목표 대기질을 달성할 수 없는데 30 ppb라는 목표 대기질을 배출량의 감소로 달성하기 위해서는 20% 이상 대폭적인 이산화질소의 배출량 감소가 이루어져야 한다.

물론 이상의 분석결과들에서 제시된 인구규모, 주택규모, 산업체 규모 등의 수치값으로 표현된 서울시의 환경용량은 본 연구에서 채택한 박스모델의 한계와 분석범위의 한계상 이 값들

을 그대로 서울시의 환경용량으로 추정할 수는 없다. 그러나 이상의 분석결과들은 다음 몇가지 정책적 시사점을 제공한다.

첫째, 서울시는 지속적으로 녹지의 확보와 이산화질소 등을 비롯한 오염물질의 배출량을 줄이기 위하여 노력하여야 한다는 점이다. 우선, 환경용량의 분석에서 분명히 나타나고 있듯이 오염물질의 배출억제는 단순히 서울시의 환경상태를 개선하기 위한 것만이 아니라 서울시의 전체적인 환경용량을 증가시키는 수단으로 인식되어야 한다는 점이다. 일정한 대기질을 유지하기 위해서는 도시 내 인간활동의 범위를 축소하던가, 오염물질의 배출량을 축소하던가, 녹지의 규모를 대폭 확충하던가 아니면 서울시로 유입되는 대기질을 개선시키기는 방법들 중 몇 가지를 택할 수밖에 없다.

여기서 오염물질의 배출억제는 서울시의 환경용량을 증대시킴으로써 서울시가 지탱할 수 있는 인구규모의 크기와 사업체의 수를 확대하여 서울시의 도시활력을 유지하는데 결정적인 영향을 미치게 된다는 것이다. 그리고 녹지의 확보는 서울시의 대기질을 향상시키는데 중요한 역할을 할 뿐 아니라 서울시의 환경용량을 증대시킨다는 점이다.

그러나 녹지의 확보로 기대할 수 있는 환경질의 향상에는 한계가 있다. 이는 서울시의 주어진 토지용량 자체에 한계가 있기 때문이며 녹지의 비중이 커질수록 나머지 도시의 활력을 유지하는데 중요한 요소인 사업체의 건설에 필요한 토지면적이 부족해지기 때문이다. 녹지만 확보하고 대기질을 유지하더라도 직업이 없고 주택이 부족한 도시는 더 이상 도시로서의 매력을 상실할 뿐 아니라 환경보호, 경제발전, 사회발전 세가지 축을 중심으로 하고 있는 지탱

표7. 서울시 토지이용패턴의 변화

목표		토지	사업체 부지 %	택지 면적 %	녹지 면적 %
현재의 토지이용상태			8.4	49.9	41.7
목표대기질 50 ppb	녹지확대		15.5	29.1	51.4
	녹지확대 배출량감소		18.8	35.5	41.8
목표대기질 40 ppb	녹지확대		10.1	18.5	67.6
	녹지확대 배출량감소		12.6	23.3	60.7
목표대기질 30 ppb	녹지확대		4.5	7.1	84.9
	녹지확대 배출량감소		5.8	9.9	80.8

가능한 발전의 개념에도 부합되지 않는다. 다만 녹지를 확보하되 녹지로 인하여 사업체와 주택면적의 침식이 최소화 되도록 집약적인, 임목의 집적량이 큰 고밀의 녹지를 개발해 나가는 것에 더 큰 관심을 가질 필요가 있는 것으로 생각된다.

둘째, 정부는 서울시 인구분산 정책을 지속적으로 추진하여야 한다. 사실 정부는 70년대 이래 수도권 인구분산정책을 추진해 왔으나 서울시의 인구는 지속적으로 증가해왔다. 최근 서울시의 인구는 감소추세에 있으나 그간 수도권 인구분산정책이 효과를 보지 못한 중요한 이유중의 하나는 서울시로의 인구집중을 억제하는 규제정책이 주가 되었고 다른 중소도시의 도시 매력도를 향상시키기 위한 노력은 상대적으로 열악하였기 때문이었다. 최근 국제경쟁력의 강화를 이유로 수도권 지역 인구집중억제정책이 완화되고 있으나 수도권 인구분산정책은 지속적으로 추진될 필요가 있으며 정책의 방향은 직접적인 규제위주보다는 타 중소도시의 인구흡입력을 향상시키는 방향에서 추진되어야 할 것이다.

셋째, 서울시 주민들의 삶의 질의 향상을 위해서는 서울시의 토지이용패턴이 대폭 수정되어야 할 것이라는 점이다. 아래 표7은 현재 토지이용 형태와 시뮬레이션에 의한 토지이용패턴을 비교하고 있다. 상황에 따라 공장, 상업용 사업체 부지와 택지, 녹지의 면적비는 다르게 나타나고 있으나 공통적인 것은 택지의 비중보다 녹지의 비중이 더 크다는 점이다. 이러한 현상은 목표 대기질이 높아질수록 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

넷째, 서울시 외곽의 그린벨트는 서울시의 환경용량을 증가시키고 동시에 지탱가능한 도시 발전을 위하여 큰 의미를 지니고 있다. 그린벨트에 대한 규제완화 역시 토지이용권 측면에서 뿐만 아니라 도시의 환경용량과 지탱가능한 발전을 확보한다는 차원에서도 신중히 검토되어야 할 것이다. 또 이 연구에서 검토되지는 않았으나 서울시의 환경용량 문제는 서울시에 국한하기 보다는 경기도와 통합적으로 고려되어야 한다. 이것은 서울시의 정책과 계획, 그리고 행정이 경기도와 밀접한 조정과 협조하에 진행되어야 한다는 것을 의미한다.

다섯째, 환경용량모델을 이용하여 지탱가능성 지표체계를 마련할 수 있으며 이 지표체계는 서울시의 지탱가능성의 정도를 주기적으로 모니터링하는데 활용될 수 있을 것이다.

V. 결론 - 남은 과제들

본 연구가 지닌 한계와 앞으로의 연구과제는 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 서울시의 삶의 질의 수준을 대기질, 그 중에서도 대기중 이산화질소의 농도를 중심으로 서울시의 환경용량을 산정하였다. 당연히 따르는 문제점은

과연 이산화질소의 농도가 서울시의 대기질을 대표적으로 나타낼 수 있는 지표인가 라는 문제이다. 물론 이산화질소는 이동오염원에 의한 도시 대기오염이 심각해지고 있는 상황에서 도시 대기질에 영향을 미치는 중요한 오염물질이다. 그러나 이산화황이나 이산화탄소 등 몇 가지 오염물질들이 추가적으로 모델에 포함되었다면 더 좋은 연구가 되었으리라 생각된다. 앞으로 이 연구는 대기, 수질, 폐기물 등 분야별로 다양한 오염물질들을 포함하는 환경용량 모델로 발전할 수 있을 것이다.

둘째, 이 연구가 서울시의 이산화질소 대기질을 모사하는데 이용한 대기모델은 Box Model 인데 이 모델에 의하면 서울시의 대기질은 풍속, 온도, 유입되는 대기질의 정도, 서울시 이산화질소의 배출량, 화학반응량, 건성침착량 등 여러 요인에 의하여 영향을 받는다. 이 중에서 풍속, 온도, 유입대기질의 농도 등은 여러 조건값으로 변화될 수 있어 여러 조건값 중 가장 대표적이라 판단되는 평균 풍속, 온도, 유입 대기질을 상정하고 이 값으로만 시뮬레이션 하였다. 따라서 이 연구에서 최종결과로 제시된 환경용량은 이러한 가정, 즉, 평균풍속 1.5m/sec, 평균기온 15도, 유입 이산화질소의 평균 농도가 30 ppb인 경우의 환경용량임을 염두에 두어야 하며 이것을 그대로 서울시의 환경용량으로 추정하는 데는 한계가 있다. 그러나 이 문제는 본 연구에서 채택된 연구방법의 타당성을 위협할 정도의 심각한 것은 아닌 것으로 판단된다. 왜냐하면 이러한 조건들의 변화에 따라 최종 환경용량이 얼마나 변화하는가는 쉽게 파악될 수 있으면 반복된 시뮬레이션을 통한 민감도 분석에 의하여 최종 환경용량의 크기는 하나의 수치가 아닌 범위로 제시될

수 있을 것이기 때문이다. 다만 이 연구에서는 제한된 시간과 자원의 부족으로 조건별 시뮬레이션에 의한 광범위한 범위분석은 시행되지 못하였다. 앞으로 보완되어야 할 부분이다.

셋째, 본 모델에서 사용된 각종 파라미터들은 기존의 통계치가 존재하는 범위내에서 최대한의 정확도를 기하려 노력하였다. 그럼에도 불구하고 몇몇 파라미터들은 통계치의 부족으로 best educated guess에 머무른 경우가 있었음을 인정하지 않을 수 없다. 이 파라미터들은 예를 들면 서울시 주택 철거율 (housing demolation rate), 사업체 퇴출률 (industry demolition rate), 주택면적(land per house), 사업체면적(land per industry) 등의 통계치들은 주택의 수명, 도시계획상 택지, 공장부지, 상업용부지 면적 등을 이용하여 추정하는 방식을 취하였다. 따라서 이러한 파라미터들의 정확도와 이 모델에서 사용된 테이블 함수들의 가정에 따라 최종 환경용량의 결과는 달라질 수 있다. 그러나 이 역시 본 연구에서 취한 연구방법에 대한 치명적인 결함은 아니라고 보여진다. 왜냐하면 시스템다이나믹스 모델의 특성상 파라미터의 마이너한 변화가 모델의 행태에 큰 영향을 미치지 않는기 때문이다. 물론 파라미터값의 변화에 따른 환경용량의 범위는 광범위한 민감도 분석으로 역시 환경용량을 하나의 수가 아닌 범위로 제시할 수 있다. 이러한 민감도 분석을 광범위하게 행하지 못한 것은 이 연구의 한계이며 앞으로 보완되어야 할 과제라 할 수 있다.

주1. 도시동태모델은 Alfeld, Louis Edward & Alan K. Graham(1976)의 Urban Dynamics 모델을 서울시에 맞게 파라미터들을 변경하여 사용하였다.

주2. 오니시의 도시에 대한 환경용량 접근은 도시는 무한

히 성장할 수 없으며 쾌적한 삶의 질을 유지하면서 수용할 수 있는 인구의 규모나 경제활동의 규모에는 한계가 있다는 인식에서 출발한다. 도시의 지탱가능성이란 일정한 지역내의 주민들에게 현재는 물론 미래에도 일정한 환경의 한계내에서 쾌적한 삶의 질을 유지할 각종 개발과 서비스를 제공할 수 있는 상태를 말한다. 이렇게 되기 위해서는 도시의 성장, 인구, 경제활동과 도시의 용량이 적절한 균형을 유지할 것이 요구되는 것이며 이러한 적절한 균형의 상태를 유지하는 상태에서의 발전을 지탱가능한 도시개발로 보는 것이다. 도시용량이라는 것은 쾌적한 수준을 유지하면서 도시내에서 수행될 수 있는 모든 활동의 크기로 정의된다(Onishi, 1994:40). 그러나 쾌적한 생활수준이라는 것은 주관적인 문제로서 도시내의 생활이 쾌적한가 아닌가를 객관적으로 판단하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 오니시는 도시의 환경용량을 도시의 각종 시설과 서비스 공급의 한계를 고려하는 방식을 택한다. 이를 위하여 오니시는 도시민 대부분이 도시시설과 서비스를 만족스럽게 사용하는 수준을 결정하고, 미래 도시시설과 서비스에 대한 수요를 근로자와 주거자 인구예측에 기반하여 측정하고, 도시지하철, 도로, 폐기물처리, 전기의 공급, 주택공급, 토지공급 등 도시 시설과 서비스의 공급이 도시주민들의 요구를 어느 정도나 쾌적하게 충족시킬 수 있는가의 관점에서 파악하였다. 이창우(1999)는 서울시의 환경용량을 생태적 발자국 지수 분석과 에머지 분석으로 접근하였다. 생태적 발자국 지수분석에 의하면 1997년을 기준으로 할 경우 서울시의 인구를 부양하기 위해서는 서울시 면적의 742배, 국토면적의 45배가 필요하며, 에머지 분석에 의할 경우 서울시의 적정 인구 수용능력은 약 315만 규모로 추정되었다. 이외에도 이창우(2000)는 불투수 토양피복도 분석을 통하여 서울시 환경용량의 산정을 시도하고 있다. 문태훈(1998, 1999b)은 시스템다이내믹스 모델을 이용한 도시의 환경용량을 산정하기 위한 접근방식을 제시하고 있는데 특정도시에 대한 적용이 아니고 모델의 구축 방법에 대한 연구였으며(1998), 서울시를 대상으로 한 경우에는 대기부문 모델의 타당성이 취약하였다는 한계를 지니고 있다(1999b).

주3. 순환적인 인과관계에 의한 동태적인 현상들은 주변에서도 많이 찾아볼 수 있다. 예를 들면 부족한 도로사정으로 도시의 교통혼잡이 야기될 때 단순한 도로의 확장은 일시적으로 교통혼잡을 완화할 수 있을지는 몰라도 나아진 도로사정이 결국 더 많은 자동차를 유인하여 다시 교통체증을 유발하게 된다던지, 농업의 경쟁력을 제고시키기 위하여 정부가 농산물 보조금을 지불할 때 단기적으로는 경쟁력을 유지시킬 수 있을지는 모르나 장기적으로는 정부의 재정지원이 농촌의 경쟁력 제고 노력을 둔화시켜 결국 농업의 경쟁력을 더욱 약화시키는 결과를 가져오게 되는 것이다.

주4. 박스모델은 물론 여러 한계를 지니며 박스모델의 한계는 곧 본 연구에서 제시된 환경용량모델의 한계라 할 수 있다.

인용문헌

1. 김선희 (1996) "환경용량의 개념과 활용동향" unpublished working paper. 국토개발연구원.
2. 김도훈 문태훈 김동환 (1999) 「시스템다이내믹스」 대영문화사.
3. 문태훈 (1999a) 「환경정책론」 형설출판사.
4. 문태훈 (1999b) "환경용량평가의 적용사례 및 활용방안" pp.23-45. 「서울시 환경용량평가의 의의 및 추진방향에 관한 워크숍」 서울시정개발연구원.
5. 문태훈 (1998) "지속가능한 성장을 위한 환경용량의 산정과 환경지표 개발에 관한 연구" 「한국정책학회보」 제7권 1호.
6. 이창우 (1999) 「서울시 환경용량평가에 관한 연구」. 서울시정개발연구원.
7. 이창우 (2000) 「서울시 환경용량평가에 관한 연구II」. 서울시정개발연구원.
8. Alfeld, Louis Edward & Alan K. Graham. (1976) *Introduction to Urban Dynamics*. MA: Wright-Allen Press, Inc.
9. Daily, Gretchen C. and Paul R. Ehrlich. (1992) "Population, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity: A framework for estimating population sizes and lifestyles that could be sustained without undermining future generations" *BioScience*, November, 1992.
10. Darling, Thomas A. and George P. Richardson. (1990) "A Behavioral Simulation Model of Single and Iterative Negotiations." *Proceedings of the 1990 International System Dynamics Conference*.
11. Fearnside, Philip M. (1985) "A Stochastic Model for Estimating Human Carrying Capacity in Brazil's Trasnamazon Highway Colonization Area" *Human Ecology*. Vol.13.No.3.
12. Forrester, Jay W. (1961) *Industrial Dynamics*. Cambridge, The MIT Press.

13. Forrester, Jay W. (1969) *Urban Dynamics*. Cambridge, The MIT Press.
14. Forrester, Jay W. (1971) *World Dynamics*. Cambridge, Wright-Allen Press.
15. Forrester, Jay W. (1980) "System Dynamics - Future Opportunities." *TIMS Studies in the Management Science* 14. North-Holland Publishing Company.
16. Forrester, Jay W. (1987) "Lessons from System Dynamics Modeling." *System Dynamics Review*. Vol.3. No.2. Summer.
17. Hamilton, H. R. et.al. (1969) *System Simulation for Regional Analysis*. Cambridge, The MIT Press.
18. Hardin, Garrett. (1975) "Carrying Capacity as an Ethical Concept" <http://www.esva.net/~leo/>
19. High Performance. (1994) *Stella, An Introduction to System Thinking*. High Performance Systems Inc.:NH, USA.
20. Johnson, Curtis B. "Some Effects of Data Errors on Econometric Models." *TIMS Studies in the Management Science* 14. North-Holland Publishing Company.
21. Legasto, Jr. Augusto A. and Joseph Maciariello. (1980) "System Dynamics: A Critical Review." *TIMS Studies in the Management Science* 14. North-Holland Publishing Company.
22. Mackellar, F. Landis. (1996) "On Human Carrying Capacity: A Review Essay on Joel Cohen's How many people can the earth support?". *Population and Development Review*. 22(1). March.
23. Mass, Nathaniel J. and Peter M. Senge. (1980) "Alternative Tests for Selecting Model Variables" In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.
24. Mass, Nathaniel (ed). (1974) *Readings in Urban Dynamics* I. MA, Wright-Allen Press Inc.
25. Meadows, Donella H. (1980) "The Unavoidable A Priori." In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.
26. Moon, Taehoon. (1999) "A System Dynamics Analysis of Environmental Carrying Capacity of Seoul Metropolitan Area for a Sustainable Development" *System Thinking for the Next Millennium*. Proceedings of the 17th International Conference of the System Dynamics Society. Wellington, New Zealand.
27. Onishi, Takashi. (1994) "A Capacity Approach for Sustainable Urban Development: An Empirical Study" *Regional Studies*. Vol.28.1. pp.39-51.
28. Peterson, David W. (1980) "Statistical Tools for System Dynamics." In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*. Massachusetts, The MIT Press.
29. Richardson, George P. & A.L. Pugh. (1981) *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*. Cambridge, MA: The MIT Press.
30. Richardson, George P. (1991) *Feedback Thought in Social Science and System Theory*. Philadelphia, University of Pennsylvania Press.
31. Richardson, George P. (1999) "Reflections for the future of system dynamics" *Journal of the Operational Research Society*. Vol.50. pp.440-449.
32. Shelby, Bo and Rick Colvin. (1982) "Encounter Measures in Carrying Capacity Research: Actual, Reported, and Diary Contacts" *Journal of Leisure Research*. Vol.14. No.4.
33. Sterman, John D. (1987) "Testing Behavioral Simulation Models by Direct Experiment." *Management Science*. Vol.33. No.12.

December.

34. Tank-Nielsen, Carsten. (1980) "Sensitivity Analysis in System Dynamics." In Jorgen Randers. (ed.) 1980. *Elements of the System Dynamics Method*.
35. Tarrant, Michael A., Donald B. K. English. (1996) "A Crowding-based Model of Social Carrying Capacity: Applications for Whitewater Boating Use" *Journal of Leisure Research*. Vol.28. No.3. pp.155-168.

접 수 일 : '01. 04. 27