시스템다이내믹스를 활용한 도시개발밀도의 적정성 평가 모델 구축 연구

Establishment of the Measurement Model about the Adequate Urban Development Density using System Dynamics

전 유 신
(중앙대학교 도시 및 지역계획학과 박사)
문 태 훈
(중앙대학교 도시 및 지역계획학과 교수)

Abstract

The purpose of this dissertation is to build a development density control model and estimate optimum developmental density level for a sustainable urban growth management. To develop the model, system dynamics modeling approach was used. The model was developed to analyze how urban growth, transition, and decay occur depending on the interaction among population, houses, industry structure, land and urban infrastructure such as road, water supply, and sewage treatment facilities. The model was applied to Anyang city to estimate optimum density level. Extensive computer simulation was conducted to find out the maximum numbers of population, industry structure, houses, and cars that can be adequately sustained with the current Anyang city's infrastructure capacity.

The computer simulation result shows that the city is overpopulated by some 90,000 people. It was analyzed that 20% increase of existing capacity of urban infrastructure is necessary to support current population of Anyang city. To reduce the population to the adequate level whereby the current urban infrastructure can sustain, the current city regulation on floor to area ratio needs to be strengthened at least 20% to 35%.

Keywords : 개발밀도, 기반시설, 도시동태모델, 도시성장관리, 시스템다이내믹스, 한계용량(Development Density, Facility, Urban Dynamics Model, Urban Growth Management, System Dynamics, Carrying Capacity)

Ⅰ. 서 론

1. 연구배경 및 목적

전 국토면적의 약 14% 정도의 한정된 면적에 90%정도[1]의 인구가 모여 살고 있다. 과도한 도시의 성장은 도시공간 내에서 인간활동의 과밀과 혼잡을 야기하고 있으며, 이러한 과밀과 혼잡은 심각한 사회문제로 인식되고 있다. 이에 정부는 과도한 개발로 인한 주거환경 저해, 교통체증 등을 방지하기 위해 주거·상업·공업지역 같이 이미 개발이 완료되어 기반시설의 추가설치가 곤란한 지역은 기반시설의 수용능력 범위 내에서 개발이 이루어지도록 건폐율과 용적률의 허용한도를 규제할 수 있는 개발밀도관리제도(국토의이용및관리에관한 법률 제66조)를 도입하였다[2].

도시성장관리를 위한 개발밀도의 조절은 과밀로 인한 도시활동의 혼잡을 제거함으로써 쾌적하고 살기 좋은 도시환경 조성과 도시개발을 도모하여 궁극적으로는 지속가능한 개발을 이루고자 함이다. 그러나, 도시가 성장곡선[3]에서 어느 위치에 있으며, 개발압력을 수용할 수 있는 도시용량이 어느 정도 남아 있는지를 진단하고 판단하는 것이 그리 쉬운 일이 아니다. 이는 도시가 마치 살아있는 유기체처럼 도시를 구성하고 있는 모든 요소들이 서로 얽혀 있어 현재의 상황을 설명하는데 여러 가지 제약요건들이 많기 때문이다.

따라서, 본 연구는 도시의 인구, 주택, 산업, 토지, 기반시설 각 부문별 요소의 상관관계가 도시개발밀도에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하여 도시의 한계용량 범위 내에서 수용가능한 도시의 적정규모를 산정하고 이를 현재 도시의 개발밀도현황과 비교 분석해 봄으로써 해당 도시 개발밀도 수준의 적정성을 평가해 보고자 한다. 또한, 도시관리의 궁극적인 목표인 지속가능한 개발을 달성하기 위한 정책적 함의를 시나리오별 시뮬레이션 분석을 통해 찾아보고자 한다.

이를 위한 연구방법으로는 시스템다이내믹스 방법을 적용한 도시동태모델(Urban Dynamics Model)을 기반으로 도시기반시설(도로, 상수도, 하수도)과 건축밀도 부문을 추가

---

1) 1984년 73.2%에서 2001년 88.1%로 증가한 도시화율에서 알 수 있듯이 우리나라 도시 및 수도권의 인구집중과 산업화는 필연적으로 각종 환경 규제의 완화, 산림 파괴, 자동차 증가 및 교통체증, 대기오염, 쓰레기 과다 배출, 수질 악화를 초래할 수밖에 없는 사회문제를 양산하고 있다.

2) 건설교통부. 2001. 국토이용및계획에관한법률안(Ⅰ) 입법참고자료집(과천:건설교통부). pp. 552-553.

3) 한 국가의 도시화 추세는 대체적으로 3단계로 구분되며, S자형의 성장곡선이 된다. 도시화 수준이 매우 낮으면서 도시화율의 증가속도도 매우 완만한 초기단계에서 도시화가 급속히 진행되는 가속화 단계를 거쳐, 도시화율의 증가속도가 극히 저하되는 종착단계를 이룬다(http://home.pusan.ac.kr/~ds5ijr/city/city211.htm).

하여 도시의 한계용량범위 내에서 수용가능한 도시규모를 산정할 수 있는 모델을 구축한 후 이 모델을 기반으로 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 모의실험방식을 활용하였다.

모델은 해당 도시의 도시성장 패턴과 현황을 보여줌으로써 과연 지속가능한 발전을 위하여 연구대상의 도시가 현재 어느 정도의 위치에 와 있는지를 모니터링하고 평가할 수 있는 기반을 제공하도록 구축하였다. 구축된 모델은 현재의 개발정도와 여건에 따라 도시 내 개발활동의 속도와 용량 등의 조절을 통해 지속가능한 도시환경을 조성하고 관리하기 위한 성장관리계획이나 도시관리정책의 방향설정을 위한 토대를 제공할 수 있을 것이다. 구축된 모델을 사례대상도시인 안양시에 적용하여 현재의 개발밀도 수준을 평가해 보고, 향후 개발밀도 관리를 위한 정책대안별 시뮬레이션 분석을 통해 본 모델의 타당성과 적용가능성을 검토해 보았다.

2. 선행연구 검토

도시 내 개발밀도관리방안에 관한 연구는 크게 도시성장관리를 위한 개발밀도관리기법의 활용성에 관한 연구와 제한된 도시환경 속에서 지속가능한 도시개발을 위해 해당도시의 적정 수준을 관리하기 위한 방안을 마련하는 연구로 구분할 수 있다.

전자의 연구는 박재길[4]과 최막중[5]을 들 수 있다. 박재길은 수립된 각종 계획의 사례를 통해 현행의 개발밀도 통제수단인 용적률이 과도하게 책정되어 있다는 문제점을 제기하고, 이를 해결하기 위한 개발밀도 규제수단의 개선방안을 광역적, 도시적 차원에서 제시하였다. 최막중은 기반시설수용용량 등의 제약조건에 따른 개발밀도와 토지이용밀도 산정을 통해 기성시가지 내 각종 도시기반시설용량의 제약 하에서 허용 가능한 도시개발규모를 포괄적으로 산출해 낼 수 있는 운용모형(operational model)을 체계화하였다.

도시의 한계용량 범위 내에서 지속가능한 도시개발방안을 마련하기 위한 연구는 이창우[6]와 문태훈[7]의 연구가 있다. 이창우는 서울시 환경용량을 평가하고, 한계수용능력을 초과하는 개발에 대한 규제방안과 토지이용규제제도의 정비방안을 제시하였다. 문태훈은 기존의 도시동태모델과 Box Model을 기반으로 환경모델을 결합하여 정책시나리오에 따라 서울시의 환경용량의 변화량을 측정함으로써 지속가능한 발전을 위한 정책적 함의를 도출하

4) 박재길·김의식 외. 2001. 도시성장관리를 위한 개발밀도에 관한 연구(안양 : 국토연구원)

5) 최막중. 1999. "기반시설 제약조건하에서의 도시개발용량과 토지이용밀도", 국토계획 제34권 제3호 : pp61-72.

6) 이창우. 1999. 서울시 환경용량평가에 관한 연구(서울 : 서울시정개발연구원)

7) 문태훈·홍민선. 2001. "지탱가능한 발전을 위한 서울시 환경용량의 산정과 정책적 함의". 국토계획 제36권 제4호 : pp263-264.

고 정책수행을 위한 다양한 방안을 제시하였다.

그러나, 개발밀도관리기법을 활용하여 도시성장관리를 도모하고자 하였던 선행연구는 과도하게 개발되어 있는 밀도를 조정하기 위한 제도적 개선방안을 제시하는데 그치고 있어, 개발밀도 통제가 도시성장관리에 어느 정도의 효과가 있는지 계측할 수 없는 한계가 있다. 기반시설의 한계용량 범위 내에서 개발범위를 산정하고자 하였던 연구 또한 도시 내 단위지역을 대상으로 한 개발밀도관리방안을 제시하고 있어 도시의 성장과 보전을 목적으로 하는 도시성장관리의 궁극적인 목표를 달성하기에는 한계가 있다.

이에 본 연구는 도시의 지속가능한 개발을 도모하기 위해서는 무엇보다도 객관적인 도시진단이 선행되어야 하므로, 도시의 한계용량 범위 내에서 수용 가능한 적정도시규모를 산정하고 현재 도시현황과의 비교를 통해 해당 도시의 개발밀도 수준을 평가할 수 있도록 하였다. 적정도시규모와 현재 개발되어 있는 도시규모와의 비교치는 도시의 성장관리를 위한 지표로 활용될 수 있다. 이를 토대로 도시성장관리를 위한 기본방향을 설정하고 도시의 여건과 특성에 맞는 최적의 정책대안을 선택할 수 있도록 지원하고자 한다.

Ⅱ. 도시개발밀도의 도시관리적 기능

1. 도시개발밀도의 개념적 정의

일반적으로 개발밀도는 해당면적에 대한 개발규모를 나타내는 것으로 우리는 흔히 건폐율과 용적률을 사용하여 해당지역 또는 공간에 대한 개발밀도를 설명한다. 건폐율과 용적률은 개발의 정도를 설명하는 요소로 사용될 수 있으나 도시성장관리의 수단으로 개발밀도를 활용하고자 할 때에는 보다 세부적이고 확대된 개념의 정립이 필요하다.

이때의 '개발밀도'는 도시 또는 시가지로 개발하는 토지에 대한 '물량 또는 활동량의 분포정도'를 비교하는 수치로 정의될 수 있으며, 물량의 분포정도를 파악하기 위해서는 인구, 세대수, 녹지면적, 건축면적 등 다양한 요소가 고려될 수 있고, 활동량의 분포정도를 측정하기 위해서는 고용자수, 통행량 등이 포함될 수 있다[8]. 본 연구에서는 도시의 개발의 양과 속도의 조절을 위한 개발밀도 측정지표로 인구, 주택, 산업체의 규모와 자동차 수를 사용하였다.

8) 박재길·김의식 외. 2001. 전게서 : pp10-11.

2. 도시관리를 위한 도시개발밀도의 기능과 역할

오늘날 대부분의 도시들이 안고 있는 도시문제는 과다한 인구집중으로 인한 과밀개발과 혼잡, 도시공간의 외연적 확산에서 비롯된다. 우리나라의 경우에는 도시공간의 외연적 확산방지효과는 개발제한구역의 지정과 관리를 통해 일정부분 그 효과가 인정되고 있으므로 도시공간의 외연적 확산 방지보다는 도시내부공간에 대한 개발과 성장의 양과 속도의 조절을 통해 도시를 관리하는 것이 효율적이라고 판단된다.

도시성장관리차원에서 본다면 개발밀도는 일정 환경수준 이상의 시가지를 형성하도록 유도하거나 규제하여 과밀에 의한 외부 불경제를 방지하고 도시의 저밀확산을 억제하는 기능을 수행한다. 일정수준 이상의 환경으로 개발되도록 개발의 범위를 개략적으로 제시하는 역할을 수행하며, 오픈스페이스 확보 등 쾌적성 유지를 위한 최소요건을 설정함과 아울러 앞으로 공급이 필요한 기반시설이나 커뮤니티 시설의 규모를 판단하게 한다. 또한, 개발밀도는 타 지역에 대비하여 해당지역의 토지이용강도를 상대적으로 비교하는 지표가 된다. 또한 시가지 현황 및 환경을 판정·평가하는 척도가 되기도 하며, 인구와 공공·편익시설간의 조화를 도모하는 지표로서 기능도 한다.

도시내부공간의 지속적인 관리를 위한 다양한 프로그램과 기법들 가운데 개발밀도의 통제와 관리기법을 활용하고자 하는 이유는 개발밀도가 도시성장 과정과 현황을 모니터링하고 현재의 개발 정도와 양, 수준 등을 측정할 수 있는 지표로 활용될 수 있는 동시에 도시개발의 통제기능으로서도 활용할 수 있기 때문이다.

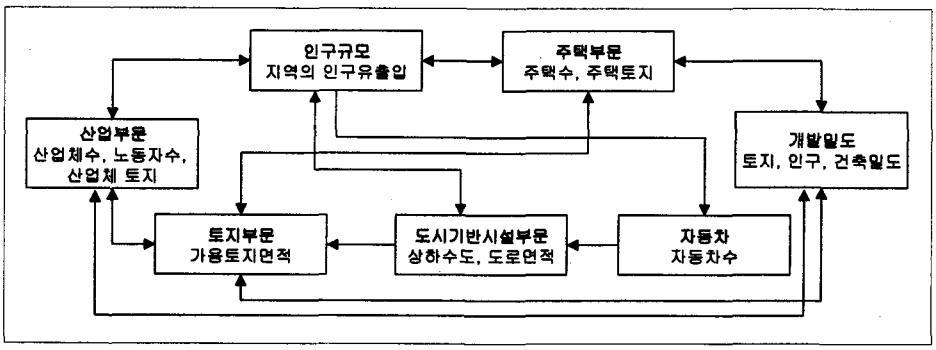
Ⅲ. 도시개발밀도의 적정성 측정을 위한 모델 구축

1. 모델개념도

시스템다이내믹스를 활용하여 도시개발밀도의 적정성을 측정할 수 있는 모델을 구축하는 목적은 한정된 토지공간이 주어졌다고 가정했을 때 일정한 삶의 질을 유지하면서 지속가능한 개발을 유도하기 위한 도시개발 방향을 설정하기 위해서이다. 이는 산업활동, 주택 및 기반시설 등 주어진 도시의 한계용량 범위 내에서 수용 가능한 인구, 주택, 산업체의 규모와 자동차 수 등의 적정규모를 동태적으로 파악하여 산정해 주고 이를 통해 해당도시의 개발정도를 진단할 수 있도록 도와줄 것이다.

본 연구에서 구축한 개발밀도의 적정성 평가를 위한 모델의 개념도는 크게 인구, 주택,

산업, 토지, 기반시설 및 개발밀도의 하위시스템으로 구성되어 있으며 각 부문은 상호영향을 주고받는 역동적인 관계를 갖는다. 여기서 인구, 주택, 산업, 토지는 기존의 도시동태모델을 활용하였으며, 기반시설(도로, 상수도, 하수도)과 개발밀도부문은 선행연구들의 이론적 내용을 기반으로 하여 새로이 추가하였다. 모델개념도는 [그림 1]과 같다.

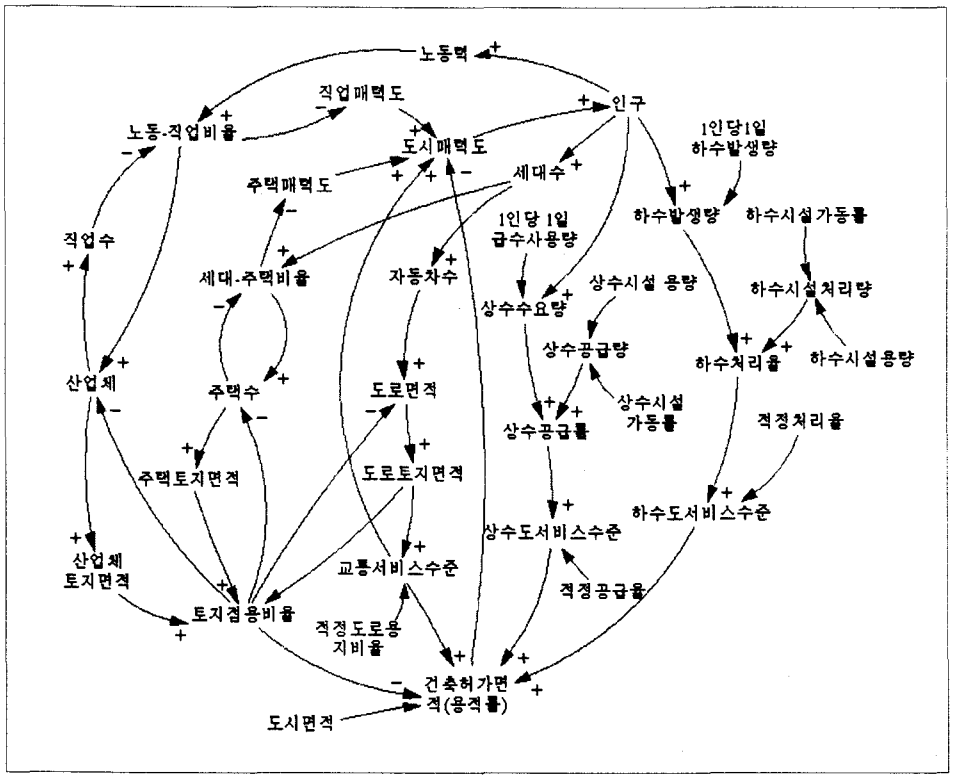


[그림 1] 도시개발밀도 적정성 평가를 위한 모델 개념도

2. 인과지도

도시의 인구증가는 도시 내 주택과 건물의 건설을 촉진하고, 주택과 산업체 등 각종 건물의 증가는 생활환경에 필요한 다양한 도시기반시설에 대한 수요를 증가시킨다. 도시는 지속적으로 증가하다가 어느 일정 시기에 도달하게 되면 성장이 둔화되고 일정 수준에서 균형을 이루게 되는데 이는 기본적으로 도시의 가용토지가 한정되어 있기 때문이다.

도시성장과 개발밀도에 영향을 미치는 주택, 산업건설 등의 도시활동과 도시기반시설서비스간의 상관관계를 개념적으로 도식화하기 위해 작성한 인과지도는 인구와 주택, 산업체, 토지, 도시기반시설(상수도, 하수도, 도로)로 구분하였으며 [그림 2]와 같다. 이 가운데 '도시매력도'는 부문별 인과관계에 있어 공통적으로 사용되는 개념으로 본 모델의 핵심개념이다. 주변의 인구를 끌어들이고 이를 지탱할 수 있는 사회 및 경제적인 힘을 의미하는 도시매력도는 직업, 주택, 교통서비스, 개발정도에 따른 혼잡도 등의 여러 요인들이 상호 작용하여 인구의 전출입을 결정하는 원동력이 된다.



[그림 2] 도시성장관리를 위한 개발밀도관리모델의 인과지도

1) 인구

도시인구는 자연증가율과 전출·입 등과 같은 사회적 요인의 영향에 의하여 변화한다. 인구의 자연증가율은 도시인구의 평균연령, 소득수준에 영향을 받지만 평균연령과 소득수준의 영향을 일단 제외하면 인구의 자연증가율은 원래 그 도시 내의 인구의 크기에 비례한다고 볼 수 있다.

전출·입에 의한 인구의 유출입은 도시활동의 여러 요인에 의해 영향을 받는다. 고용기회가 풍부하여 구직 가능성이 높은 경우, 양호한 주거환경과 주택구입이 용이한 경우 등은 도시매력도를 높여 인구를 유입시키는 요인으로 작용하게 된다. 반면에 일자리가 부족하여 취업이 어렵거나 주택부족으로 인해 상대적으로 주택가격이 상승하여 양호한 주거환경을 얻을 기회가 적어지고 도시기반시설 공급이 원활하지 못해 발생하는 혼잡 또는 과밀로 인한 생활환경의 악화는 도시매력도를 감소시켜 인구유입을 억제하는 요인이 된다.

2) 산업체

인구가 증가하게 되면 노동력은 풍부해진다. [그림 2] 인과지도에서 도시에서 직업사정의 매력도를 나타내는 변수는 노동-직업비율(labor force to job ratio)이다[9]. 이 값이 1보다 작은 경우는 직업의 수가 노동인구보다 많아 고용의 기회가 많다는 것을 의미하는 것으로 이는 구직 측면에서의 도시매력도를 높여 인구유입을 촉진시키는 요인으로 작용한다. 그러나 인구의 급속한 증가는 노동-직업 비율을 높이게 되면서 이값이 1보다 커지게 되면 직업의 수보다 노동인구의 수가 크므로 직장이 모자라는 사태가 발생하게 되고 이는 구직측면에서의 도시매력도를 저하시켜 인구유입을 억제하는 요인으로 작용하게 된다.

산업체 입장에서 보면, 노동-직업비율이 1보다 큰 경우는 직업의 수보다 노동인구가 더 많아, 노동력이 풍부하고 임금도 저렴하게 되는 상황이므로 산업체 증설의 호기가 된다. 산업체의 수가 증가되면 더 많은 일자리가 창출되어 이제는 인구유입이 촉진되는 상황으로 변하게 된다. 산업체의 성장은 노동-직업비율이 클수록 가속화되지만, 이 경우 도시 직장사정의 악화는 도시로의 인구유입을 억제하므로 인구유입과 산업체의 성장은 상호상쇄(trade-off) 관계에 놓여 있는 것으로 볼 수 있다.

3) 주택

도시의 거주인구가 증가할수록 주택수요를 증가시켜 도시의 가용토지 내 주택이 차지하는 면적비율을 높이게 된다. 주택공급의 원활성은 [그림 2] 인과지도에서 세대-주택비율(household to house ratio)로 표시되고 있는데, 세대수보다 주택수가 많을 경우에는 주택이 풍부하므로 주택사정이 좋아 주택 매력도가 높아지고 이는 도시매력도를 증가시켜 인구유입을 촉진시키는 요인으로 작용한다. 그러나, 한정된 도시토지로 인해 증가하는 세대수의 주택수요를 충족시키는 지속적인 주택공급이 사실상 불가능해지면서 세대-주택비율은 점차 높아진다. 주택수보다 이를 필요로 하는 세대수가 많아진다는 것은 주택부족의 상황과 집값의 상승을 의미하는 것이고 이는 주택 측면에서의 도시매력도를 저감시켜 도시로의 인구유입을 억제하는 요인으로 작용한다.

4) 토지

도시의 한정된 토지용량 내에서 지속적인 산업체와 주택 건설은 도시 내 토지에서 산업체와 주택의 토지점유율을 증가시키고, 가용토지의 면적을 점차 줄이게 된다. 가용토지면적의 감소는 기존의 산업체와 주택을 철거하지 않는 한, 결국 주택과 산업체의 추가적인

9) 노동인구/직장의 수

건설을 제약하는 요인으로 작용하게 된다. 산업체의 토지점유율이 낮을 때에는 지역의 기반시설이 약하거나 입지비용이 많이 들어 산업체들의 입지가 억제된다. 반대로 산업체의 토지점유율이 아주 높아 가용토지가 부족하게 될 때 역시 산업체의 증가가 억제된다. 주택의 경우도 이와 마찬가지이기는 하나, 토지이용 형태에 있어 가용토지가 부족한 경우, 주택건설이 산업체 건설보다 우선되도록 모델링 되었다. 이는 가용토지면적이 작아질수록 적은 규모의 짜투리 땅들이 많이 발생할 것이고 적은 규모의 토지에는 산업체보다 주택의 입지가 상대적으로 더 용이할 것이기 때문이다. 그리고 주택과 비교하여 큰 토지를 필요로 하는 산업체는 주택보다 신규건설이 더 억제될 것이기 때문이다.

5) 도시기반시설[10]

본 연구의 모델에서는 도시매력도를 구성하는 요인으로 직업사정, 주택사정 이외에 도시기반시설의 여건을 환경적 요인으로 도시매력도에 영향을 미치는 중요한 요인으로 포함하였다. 도시기반시설이 도시매력도에 영향을 미치게 되고 도시매력도의 증감이 주변지역으로부터의 인구유입에 영향을 미치게 되는 것이다.

교통기반시설의 경우, 인구가 증가하면 세대수가 증가하고, 이에 따라 자동차 수도 증가하게 된다. 자동차 수의 증가는 도로수요를 증가시킨다. 교통여건이 좋은 도시는 도시매력도가 높아지게 되고, 반대로 과도하게 집중된 인구와 부족한 도로로 인하여 도시교통이 혼잡하고, 교통서비스 수준이 열악한 경우, 도시매력도는 저하된다.

상하수도 기반시설도 마찬가지 논리로 도시매력도에 영향을 미친다. 인구증가는 상·하수도 시설에 대한 수요를 증가시키고 상·하수도 시설용량과 시설가동률에 의해 상수도와 하수처리의 서비스 수준이 결정될 것이다. 인구규모에 적절한 상수공급과 하수처리 서비스가 이루어지는 경우 이것은 도시기반시설의 매력도를 증가시켜 전체적인 도시매력도를 증가시키도록 할 것이지만 적절한 서비스 수준에 미달할 경우 도시기반시설의 매력도를 저하시키고 이것은 결국 도시매력도를 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.

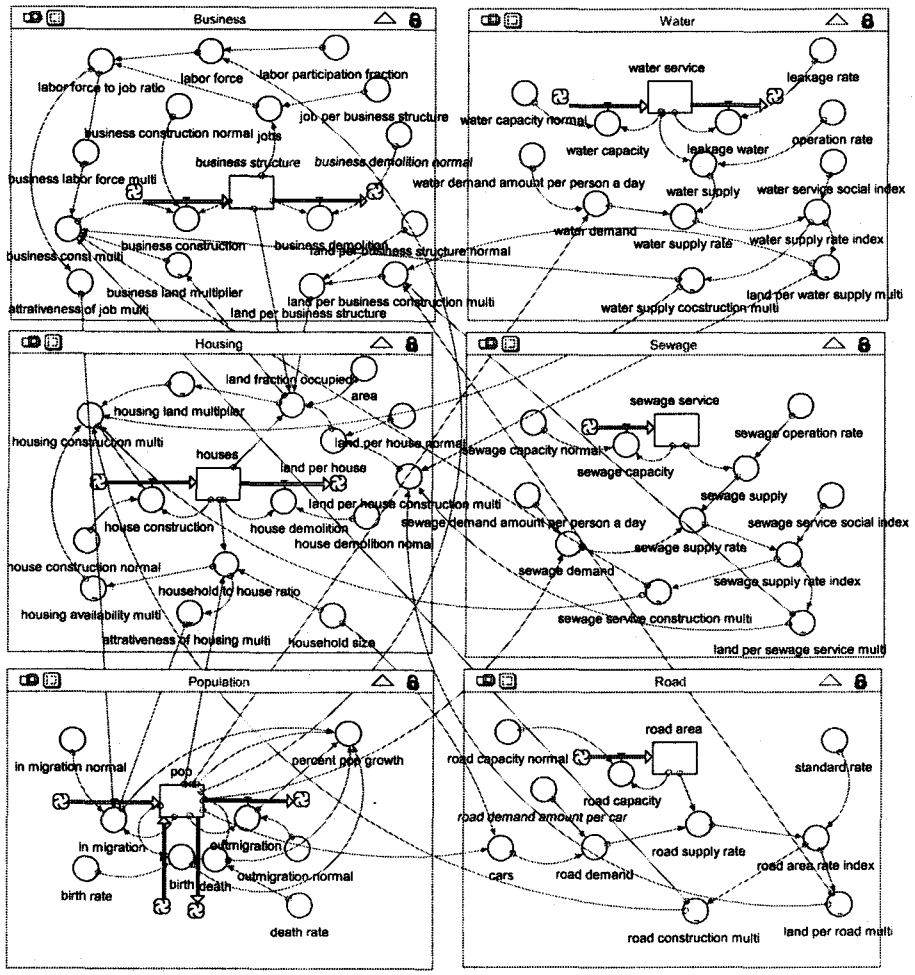
---

10) 본 연구에서는 도로, 상수도 및 하수도시설을 도시기반시설의 대상시설물로 한정하였다. 이는 현행 개발밀도관리구역을 지정할 수 있는 대상시설물을 과밀유발이 높을 것으로 판단되는 도로, 상수도, 하수도 및 학교로 규정하고 있는 근거에 따라 선정한 것(국토의계획및이용에관한법률시행령 제63조)이지만, 학교시설의 경우에는 여타의 시설과는 달리 기반시설에 대한 수요의 범위가 비교적 한정되어 있는 특징이 있다고 판단되어 제외하였다.

3. 흐름도(Stock-Flow Diagram)

1) 개요

개발밀도관리모델 구축과정은 각 부문별 인과지도를 작성한 후 작성된 인과지도를 컴퓨터 상에서 시뮬레이션 할 수 있도록 구체화된 시뮬레이션 모델로 전환시켜야 하는데 이를 흐름도(Stock-Flow Diagram)라 하며, [그림 3]과 같다. 본 연구에서는 스텔라(STELLA)[11]를 활용하여 흐름도를 작성하고, 시뮬레이션을 통해 균형값을 도출하였다.



[그림 3] 개발밀도관리모델의 흐름도(Stock-Flow Diagram)

11) 'System Thinking Environment Laboratory for Loop Analysis'의 축약어로서 그래픽한 모델링을 강조하여 초보자들로 쉽게 수행할 수 있는 시스템다이내믹스 패키지 중의 하나이다.

2) 주요변수의 설명

(1) 산업체 건설[12)]

도시 내 산업체 수는 저량변수인 산업체 수(business structure)에 의하여 표시되며, 산업체 수의 증가는 유량변수인 산업체 건설률(business construction)과 퇴출율(business demolition)에 의하여 결정된다. 산업체 건설률은 두 개의 보조변수에 의하여 결정되는데, 정상산업체건설률(business construction normal)과 산업체건설승수(business construction multiplier)이다.

산업체건설승수(business construction multiplier)는 노동력이 산업체 건설에 미치는 영향(business labor force multiplier)과 가용토지면적이 산업체 건설에 미치는 영향(business land multiplier), 도시기반시설인 상수도(water supply construction multiplier : WSCM)와 하수도(sewage supply construction multiplier : SSCM) 및 도로(road construction multiplier : RCM)가 산업체 건설에 미치는 영향의 정도에 의해 결정된다. 산업체건설승수값이 1보다 높은 값을 나타낼 때에는 산업체의 건설은 증가하지만 값이 1보다 낮으면 산업체의 건설은 둔화되기 시작한다. 산업체수의 증감은 스텔라에서 아래 식으로 계산되었다.

L business_structure(t) = business_structure(t - dt) + (business_construction - business_demolition) × dt

R business_construction = business_structure×business_const_normal ×business_const_multi

A business_const_multi = business_labor_force_multi×business_land_multi ×RCM×SSCM×WSCM

(참조. R: Stock equation, R: Rate equation, A: Auxiliary equation)

(2) 주택건설

도시 내 주택 수는 저량변수인 주택수(houses)에 의하여 표시되며 주택 수의 증가는 유량변수인 주택의 건설률(house construction)과 철거율(house demolition)에 의하여 결정된다. 주택건설률 역시 산업체 건설률과 마찬가지로 두 개의 보조변수에 의하여 결정되는데, 정상주택건설률(house construction normal)과 주택건설승수(house construction multiplier)이다.

주택건설승수(housing construction multiplier)는 주택구입의 용이성(housing availability multiplier)과 토지가 주택건설에 미치는 영향(housing land multiplier) 및 도로, 상·하수도 등

12) 도시성장과 개발밀도간의 상관관계를 설명하기 위해 구축된 본 모델을 설명하는 주요변수는 도시성장의 정도를 설명하는 산업체부문과 주택부문으로 구분하여 설명하였으며, 이외 변수들의 수식은 부록을 참고하기 바란다.

의 도시기반시설이 주택건설에 미치는 영향의 정도에 의해 결정된다. 산업체 건설승수와 마찬가지로 주택건설승수 역시 1보다 높은 값을 나타낼 때에는 주택건설이 증가하게 되고 값이 1보다 낮으면 주택건설은 둔화되기 시작한다. 주택수의 증감은 아래 식으로 표현되었다.

L houses(t) = houses(t - dt) + (house_construction - house_demolition) × dt

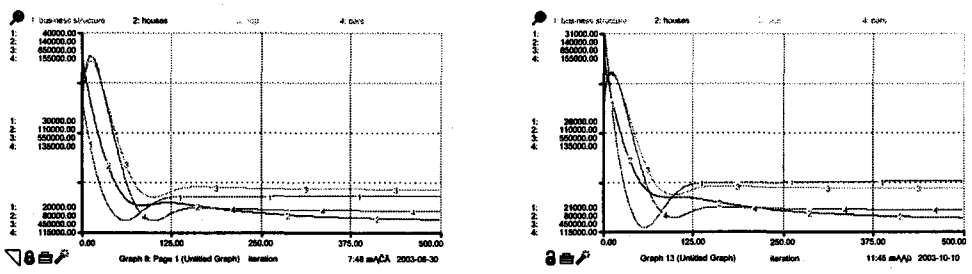
R house_construction = houses×house_const_normal× housing_const_multi

A housing_const_multi = housing_availability_multi×housing_land_multi × RCM × SSCM × WSHCM

4. 모델의 타당성 평가

테이블 함수의 변화를 통해 구축한 개발밀도의 적정성 측정을 위한 모델의 민감도를 분석하였다. 측정모델은 기존의 도시동태모델을 기반으로 도시기반시설부문과 도시기반시설의 한계용량이 도시성장에 어떠한 영향을 미치는가를 규명하기 위해 수립한 모델로 다양한 테이블 함수를 사용하였다. 그러나, 모델타당성을 분석하기 위해서는 기존 도시동태모델에서 제시하고 있는 테이블 함수를 제외하고, 본 연구를 위해 추가적으로 사용한 상수도, 하수도, 도로가 도시개발밀도에 미치는 영향에 관한 테이블 함수(WSLPM, SSLPM, RLPM)와 주택 및 산업체 건설에 미치는 영향에 관한 함수(WSCM, SSCM, RCM)만을 대상으로 하였다.

함수값의 변화는 미치는 영향정도에 따라 강약으로 구분하여 시행하였으며, 테이블 함수 그래프 값의 변화를 통해 도출한 민감도 분석의 Base Run 그래프와 테이블함수의 변화값을 변화시키기 이전의 그래프는 [그림 4]과 같다.



[그림 4] Base Run 그래프(좌)와 테이블함수변화에 따른 Base Run그래프(우)

[그림 4]의 그래프에서도 나타나듯이 개발밀도 적정성 측정모델은 테이블 함수의 변화값을 통해 시뮬레이션을 수행하였어도 기존의 Base Run과 유사한 형태로 변화추이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 개발밀도관리모델이 비교적 타당성 있게 구축된 모델로 모델을 활용하여 도출한 적정개발밀도 측정값이 비교적 합리적인 값이라고 할 수 있다.

Ⅳ. 사례대상도시의 도시개발밀도의 적정성 평가

1. 사례대상도시 선정배경

개발밀도의 적정성 평가를 위한 모델의 적용 대상을 안양시로 하였는데 수도권 내 도시 중 안양시를 본 연구의 사례대상도시로 선정한 배경은 다음과 같다.

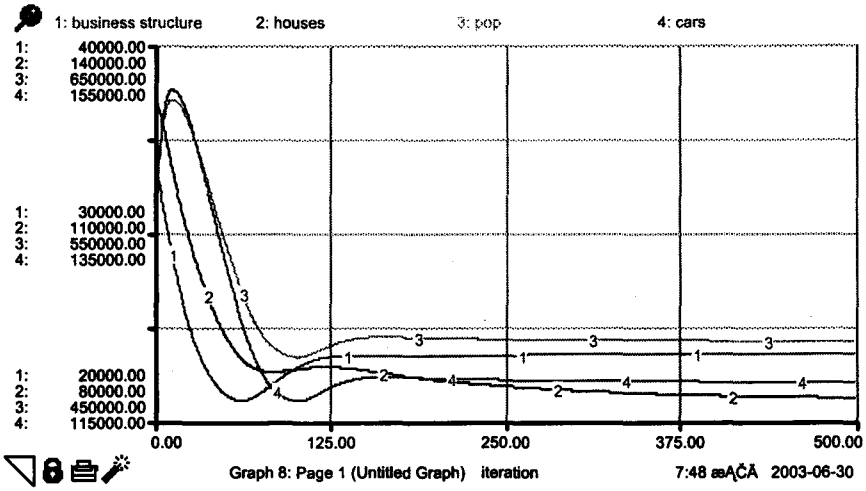
안양시는 안양역사를 중심으로 일찍이 발단된 구시가지와 신도시(평촌) 개발로 신구도시가 공존하는 도시공간구조를 갖고 있다. 구시가지는 도시계획적 개발이 아닌 국도를 따라 자연적으로 발생한 도심지역으로 기반시설들의 확충이 사실상 거의 불가능한 상황이다. 반면 신도시지역은 도시계획에 따라 개발된 지역으로 현재에도 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 안양시의 이러한 특성은 일정수준 이상의 개발이 완료되어 향후 도시관리 목표가 도시공간구조의 적절한 조화와 균형을 유도하기 위한 도시성장관리에 있다고 보여지며, 도시성장관리를 실천하기 위해서는 해당도시의 개발현황을 객관적으로 진단하고 이에 따른 방향을 설정해야 한다는 본 연구의 목적에 따라 사례대상도시로 적정하다고 판단되었다.

2. 도시개발밀도 적정성 측정모델의 Base Run

Base Run은 안양시의 2000년 12월 현재 도시기반시설이 제공할 수 있는 최대 서비스 규모 내에서 수용 가능한 인구, 주택, 산업체 및 자동차 수를 찾기 위한 것이다. 이는 안양시가 적정수준의 기반시설서비스 수준을 유지하기 위한 개발밀도를 산정하는 과정으로 기반시설의 한계용량범위 내에서 수용 가능한 도시규모를 말한다. "적정수준 이상"이라 함은 쾌적한 삶을 위해 기반시설이 제공해야 하는 서비스 수준을 의미한다. 본 연구에서는 도로의 서비스기준은 주거지역 최소한의 도로률인 20%와 자동차 1대당 최소면적(600㎡)을, 상·하수도 시설은 보급률 100% 유지를 적용하였다.

[그림 5]는 이상의 기준을 만족시키기 위해 안양시가 수용할 수 있는 사업체의 수, 주택의 수, 인구의 규모, 그리고 자동차의 양을 시뮬레이션 말기의 균형상태에서 보여주고 있

다. 그림 에서 시뮬레이션 250시점에서 각 변수값들은 대체로 균형을 이루기 시작하나 주택수는 계속해서 조금씩 감소하고 있다. 그러나, 시뮬레이션 500시점에서의 값들은 비교적 안정적인 추세를 나타내고 있어 이 시점의 값을 Base Run의 균형값으로 보았다.



[그림 5] 안양시를 대상으로 한 모델의 Base Run 그래프

현재 안양시의 도시기반시설 규모는 도로면적이 약 4.896㎢, 상·하수도 시설의 1일 공급량은 약 300,000㎥, 시설가동률은 약 70% 정도이며, 인구 583,240인, 산업체 32,976개, 주택 130,560채, 차량 141,106대의 실측값을 가지며, 이는 Base Run의 초기값[13]에 해당한다. [표 1]의 초기값은 현재 안양시 각 부문별 변수의 실측값을, 균형값은 안양시의 도로, 상수도, 하수도 시설용량의 범위 내에서 수용 가능한 도시규모를 의미한다.

[표 1] Base Run의 초기값과 균형값

구 분	인 구	산업체	주 택	차 량
초기값(안양시 현재규모)	583,240	32,976	130,560	141,106
균형값(안양시 적정규모)	491,580	23,467	83,344	118,930

[표 1]을 통해 우리는 안양시가 기반시설용량 범위 내에서 수용 가능한 최대 도시개발밀

13) 안양시의 2000년 12월 현재의 실측값을 의미하는 것으로 통계연보(안양시, 2001)와 홈페이지 (http://www.anyang.go.kr)를 활용하여 추출한 값들이다.

도는 인구 약 491,580명, 산업체 23,467개, 주택 83,344채, 차량 118,930대 임을 알 수 있다. 초기값과 균형값 간의 차이는 현재 해당 도시의 개발상태를 설명할 수 있는 값으로 활용될 수 있다. 인구의 경우 초기값이 균형값보다 약 9만 여명 이상이 높게 나타나는데 이것은 안양시가 현재 기반시설의 용량 보다 약 9만 여명의 인구가 초과되어 거주하고 있음을 의미하는 것으로 도시기반시설의 용량을 초과하여 개발되어 있다고 설명할 수 있다.

3. 시뮬레이션 분석과 정책적 함의

개발밀도관리모델을 활용하여 도출할 수 있는 정책적 함의는 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 이를 두 가지 측면에서 활용하였다. 첫째는 소극적 정책으로 현재의 도시규모를 충족시키기 위한 도시기반시설의 증설량의 산정에 관한 것이며, 둘째는 적극적 정책으로 현재의 개발규모를 적정규모로 유도하기 위해 현재 제정되어 있는 용도지역별 용적률의 상한선 조정에 관한 것이다.

1) 소극적 정책 : 현재의 인구 수용방안(도시기반시설 증설)

소극적 정책으로 설명될 수 있는 [시뮬레이션 1]은 도시기반시설의 증설을 통해 현재의 도시규모를 수용하는 방안이다. [표 2]는 구축된 개발밀도의 적정성을 측정하기 위한 모델에 상하수도 시설용량과 도로용량을 다양하게 변화시킬 때 수용가능 인구규모의 변화를 보고 현재 안양시에 가장 근접하는 용량의 증가가 어느 부분에서 얼마나 이루어져야 할 것인지를 찾기 위한 다양한 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다.

[표 2]를 보면, 도시기반시설의 용량을 개별적으로 어느 한 부분만을 증가시켜서 현재의 도시규모를 충족시킬 수 있는 최적의 시나리오는 없다. 다만, 인구와 차량부문에 있어 가장 근사치에 근접한 시나리오는 상수도와 도로의 용량을 현재보다 약 20% 증가시켰을 경우이다. 또는 상하수도와 도로의 용량을 현재보다 20% 증가시키는 경우 최대수용인구가 약 60만으로 현재의 도시규모를 비교적 여유 있게 수용할 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 현재 상·하수도 및 도로의 용량으로는 안양시의 도시규모를 수용하기에는 한계가 있음을 의미하며, 보다 쾌적하고 지속가능한 개발을 영위하기 위해서는 도로, 상수도, 하수도를 모두 포함하는 도시기반시설의 확대와 용량의 증가가 수반되어야 함을 의미한다.

[표 2] 도시기반시설용량 증설 시나리오별 수용가능 인구

구 분	인 구	산업체	주 택	차 량
초기값(안양시 현재규모)	583,240	32,976	130,560	141,106
균형값(안양시 적정규모)	491,580	23,467	83,344	118,930
상수도시설용량 10% 증가	503,859	24,053	85,417	121,901
상수도시설용량 20% 증가	510,801	24,385	86,578	123,580
하수도시설용량 10% 증가	495,914	23,675	84,055	119,979
하수도시설용량 20% 증가	497,802	23,766	84,352	120,436
도로면적 10% 증가	523,017	24,967	88,689	126,536
도로면적 20% 증가	551,345	26,318	93,507	133,389
상·하수도시설용량 10% 증가	508,321	24,268	86,151	122,980
상·하수도시설용량 20% 증가	519,010	24,780	87,927	125,566
상수도시설용량, 도로면적 10% 증가	540,759	25,814	91,658	130,829
상수도시설용량, 도로면적 20% 증가	584,500	27,902	99,104	141,411
하수도시설용량, 도로면적 10% 증가	527,436	25,179	89,410	127,605
하수도시설용량, 도로면적 20% 증가	560,920	26,778	95,068	135,706
상·하수도시설용량, 도로면적 10% 증가	546,128	26,071	92,571	132,127
상·하수도시설용량, 도로면적 20% 증가	600,351	28,661	101,743	145,246

기반시설은 자연재해에 대비하기 위해 항상 일정수준 이상의 잠재가동률을 보유하고 있어야 하므로 시설가동률의 지속적인 증가를 통해 도시의 개발량을 수용하는 것은 한계가 있다. 따라서 기반시설의 증설을 통한 도시성장관리를 유도하는 것이 또 하나의 대안이 될 수 있다. 그러나, 도시기반시설의 증설을 통해 현재의 도시규모를 유지하고자 하는 대안은 기반시설이 증설되면 그에 따른 인구가 유입하게 되어 또 기반시설의 증설에 요구되는 현상이 순환되어 나타날 것으로 생각된다. 이는 도로증설을 통해 교통체증 문제 해결하고자 하였던 기존의 개발위주 도시관리정책처럼 적정한 도시개발밀도를 유지하고 관리하는데 있어 근본적인 문제를 해결하는 데에는 한계가 있다. 또한, 기반시설의 증설이 곤란한 지역을 대상으로 개발밀도관리구역을 지정하여 운영하고자 하는 현행 개발밀도관리구역제도의 목적과는 다소 상충되고 있어 보다 다각적인 정책적 대안이 마련되어야 한다.

2) 적극적 정책 : 개발밀도의 적정수준 유지방안(용적률의 강화)

소극적 정책과는 달리 적극적 정책에 해당하는 [시뮬레이션 2]는 현재의 도시규모를 적정도시규모로 유도하기 위해 현재의 용적률을 어느 정도 규제해야 하는지에 관한 것이다. 적정개발밀도를 유지하기 위한 개발밀도 규제시나리오별 수용가능인구 도출과정은 다음과 같다.

안양시 주거지역면적을 대상[14]으로 공공용지(40% 적용)를 제외한 대지면적[15]에 안양시 조례에서 규제하고 있는 세분화된 주거지역별 용적률의 상한선을 적용하여 실질적으로 건축이 가능한 건축연상면적(용적률 적용)을 산출하고 이를 대상으로 인구 1인당 적정거주면적(25㎡)을 적용[16]하여 수용 가능한 인구를 도출하였다. 개발밀도 규제시나리오별 수용가능인구는 [표 3]과 같다.

[표 3] 개발밀도 규제시나리오별 수용가능 인구

구 분	면적 (㎢)	안양시 조례		개발밀도 규제시나리오별 수용가능인구(인)					
		건폐율 (%)	용적률 (%)	규제 없음	10%강화	20%강화	30%강화	35%강화	40%강화
전용주거	0.02	50이하	100이하	400	360	320	280	260	240
일반주거	14.68	60이하	200이하	704,640	634,176	563,712	493,248	458,016	422,784
준주거	0.52	60이하	400이하	49,920	44,928	39,936	34,944	32,448	29,952
합 계	15.22	-	-	754,960	679,464	603,968	528,472	490,724	452,976
90%거주				679,463	611,518	543,571	475,625	441,652	407,678
80%거주				603,968	543,571	483,174	422,778	392,579	362,381

"규제 없음" 시나리오는 안양시의 조례에서 규정하고 있는 용적률의 상한선을 준용하여 주택을 건축한다고 가정할 경우[17] 최대한 수용 가능한 인구(754,960명)를 의미하는 것으로

14) 현재 관련법에서는 개발밀도관리구역의 지정대상은 주거지역, 상업지역, 공업지역을 대상으로 하고 있으나, 본 연구에서는 인구감소의 실질적인 효과를 가져올 수 있는 주거지역만을 대상으로 하였다. 이는 상업지역과 공업지역의 경우 실질적인 거주인구를 추출하는데 용이하지 않기 때문이기도 하다.

15) 건축가능면적은 주거지역별 대지면적에 공공용지율 40%를 적용하여 이를 제외한 면적을 대상으로 하였다. 공공용지율은 도시계획 수립시 30%를 적용하는 것이 일반적이나, 안양시 조례에서 규정한 최대 건폐율(60%)을 제외한 비율을 공공용지율로 환산하여 적용하였다. 공공용지는 주거지역내 생활환경 조성을 위해 요구되는 도로, 학교, 근린생활시설 등의 입지를 위한 대지를 의미한다.

16) 1인당 적정주거면적은 수도권 중부지역의 밀도관리를 위해 제시한 값을 활용하였으며 이에 관한 사항은 박재길(2001 : p63) 참조

현재 안양시의 인구(583,240명)와 비교해 볼 때, 조례에서 규정하고 있는 용적률이 현실보다 과도하게 책정되어 있음을 알 수 있다.

개발밀도 규제시나리오별 수용 가능한 인구를 살펴보면, 안양시의 거주인구가 모두 주거지역에 거주한다고 가정할 경우 현재의 용적률보다 약 35%이상 강화되어야 적정인구에 도달할 수 있다. 90%이상 거주할 경우에는 약 30%, 80% 이상이 거주할 경우에는 약 20% 정도의 용적률 강화를 통해 적정인구에 도달할 수 있다. 이러한 결과는 개발밀도관리모델이 제시하고 있는 적정인구규모를 달성하기 위해서는 현재의 용적률에 대한 규제가 최소 20%에서 최대 35%가 강화되어야 함을 의미한다. 그러나, 현재 안양시의 경우에는 도시기반시설의 한계용량에 비해 약 9만 명 이상의 인구가 과도하게 집중되어 있는 상황이지만 이러한 현상이 안양시의 전반적인 도시공간구조상에서 발생하는 것인지, 특정지역에 과도하게 집중되어 나타나는 현상인지는 보다 세밀한 공간구조분석을 통해 진단해야 한다. 적정개발밀도 관리를 위해서는 개발의 정도와 기반시설의 증설계획 수립여부를 분석하여 현재 해당지역의 개발정도가 과밀하게 개발되었는지 또는 향후 개발의 여지가 있는지를 판단하여 지역별 여건과 특성에 적합한 개발밀도관리방안이 다양하게 제시되어야 한다.

V. 결 론

개발밀도는 도시성장의 정도를 측정하거나 향후 바람직한 방향으로 도시를 관리하기 위한 지렛대로 활용될 수 있는데 해당도시의 개발수용능력이 어느 정도인지를 측정하는 것은 객관적이고 합리적인 도시관리를 위해 반드시 선행되어야 하며, 이에 본 연구는 도시성장관리를 위해 해당도시 현재의 개발정도를 설명하고 향후 일정수준 이상의 삶의 질을 유지하기 위해서는 어느 정도의 혼잡과 과밀이 해소되어야 하는지를 규명하기 위해 개발밀도지표를 활용하였다. 이 때의 개발밀도는 개발의 정도를 측정하고 규제하는 수단으로서 역할을 수행하는데, 본 연구에서는 현재의 개발정도를 측정하기 위해서는 인구수, 주택수, 산업체수 및 자동차 수를 활용하였으며 도시성장의 통제를 위해서는 건폐율과 용적률을 활용하였다.

도시성장관리를 위해 개발밀도기법을 활용하는 것은 도시의 한계용량과 개발밀도간의 상관관계가 도시성장에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 설명을 보다 객관적이고 용이하게

17) 건축가능면적은 주거지역별 대지면적에 안양시 조례에서 규정한 최대 건폐율을 적용하여 도출하여 전체면적 가운데 주택가능 대지면적은 건폐율 적용비율 만큼의 대지면적으로 산정하였다. 이는 건폐율 적용 이외의 대지면적은 도로, 학교, 근린생활시설 등의 입지면적으로 활용될 것이라는 가정 때문이다.

할 수 있도록 해 준다.

도시기반시설의 한계용량과 주어진 한계용량 내에서 다양한 활동들간의 상호연계관계를 규명하기 위해 본 연구에서 활용한 시스템다이내믹스 기법은 단선적이 아닌 순환적인 측면에서의 인과관계 설명이 가능하고 정태적 분석이 아닌 동태적 분석이 가능하도록 지원한다. 이는 통계적인 추정이 단기적으로 유효한 계량경제학적 접근방법을 보완하여 변수의 장기적이고 동태적인 변화를 예측하고 그 원인을 설명하는데 효과적으로 활용될 수 있어 복잡한 도시성장의 인과관계를 설명하는데 효과적이라 판단된다.

그러나, 도시성장관리를 위한 개발밀도관리방안을 마련하기 위해 시스템다이내믹스 기법을 활용하여 개발밀도관리모델을 구축하는 과정에서 도시성장과 개발밀도 인과지도의 각 부문별 요인들간의 상관관계와 연구진행을 위해 요구되는 다양한 개념들을 단순화[18]하여 적용함으로써 발생한 한계도 내재되어 있음을 밝힌다.

18) 모델은 현실의 사상을 합리적이고 논리적인 근거를 바탕으로 단순화, 개념화하여 현상을 설명할 수 있도록 하는 것이라고 생각된다.

[참고문헌]

건설교통부. (2001). 「국토이용및계획에관한법률안(I) 입법참고자료집」, 건설교통부.

박재길·김의식 외. (2001). 「도시성장관리를 위한 개발밀도에 관한 연구」, 국토연구원.

안건혁 외. (1995). 「신시가지의 적정개발밀도 및 용도별 면적배분 기준」, 국토개발연구원.

이병기. (1999). 「도시계획의 새로운 패러다임」, 경실련 도시개혁센터, 보성각.

이양재. (1996). 「서울시 성장관리기법의 도입에 관한 연구」, 서울시정개발연구원.

이창우. (1999). 「서울시 환경용량평가에 관한 연구」, 서울시정개발연구원.

문태훈. (2002). 도시동태모형을 이용한 도시성장관리정책의 평가, 「한국시스템다이내믹스 연구」, 제3권 제2호: 5-28.

———. (2002). 시스템다이내믹스의 발전과 방법론적 위상, 「한국시스템다이내믹스 연구」, 제3권 제1호: 61-78.

———·홍민선. (2001). 지탱가능한 발전을 위한 서울시 환경용량의 산정과 정책적 함의, 「국토계획」, 제36권 제4호: 245-267.

최막중. (1999). 기반시설 제약조건하에서의 도시개발용량과 토지이용밀도, 「국토계획」, 제34권 제3호: 61-73.

하성규 외. (1999). 「지속가능한 도시개발론」, 보성각.

한국토지공사. (2002). 「국토이용체계 개편에 따른 세부운영방안 마련을 위한 기반시설연도 제도 운영방안 연구」, 건설교통부.

Alfeld, L. E. & A. K. Graham. (1976). Introduction to Urban Dynamics. Cambridge Massachusetts. Wright-Allen Press.

Chinitz, Benjamin. (1990). Growth Management. *Journal of American Planning Association.* 56(1).

Daniel Clark. (1995). Growth Management Techniques In City Of Carlsbad. *Journal of Urban Planning and Development.* 121(1).

Knaap, Gerrit, Ding, Chengri, Hopkins, Lewis D. (2001). Management Urban Growth for the Efficient Use of Public Infrastructure. *International Regional Science Review.* Vol. 24 Issue 3.

Takashi Onishi. (1994). A Capacity Approach for Sustainable Urban Development : An Empirical Study. *Regional Studies.* 28(1) : pp39-51.

[부록 : Equation]

□ 인구부문

pop(t) = pop(t - dt) + (in_migration + birth - out migration - death) × dt

INIT pop = 583,240

in_migration = pop × attractiveness_of_housing_multi × in_migration_normal × attractiveness_of_job_multi

birth = pop × birth_normal

out migration = pop × out migration_normal

death = pop × death_normal

birth_normal = 0.03

death_normal = 0.015

in_migration_normal = 0.1

out migration_normal = 0.07

percent_pop_growth = PCT((birth + in_migration - death - out migration) / pop

□ 산업체부문

business_structure(t) = business_structure(t - dt) + (business_construction - business_demolition) × dt

INIT business_structure = 32,976

business_demolition_normal = 0.025

jobs = business_structure × job_per_business_structure

job_per_business_structure = 4.78

business_construction = business_structure × business_construction_normal × business_const_multi

business_demolition = business_structure × business_demolition_normal

business_construction_normal = 0.07

business_const_multi = business_labor_force_multi × business_land_multiplier × RCM × SSCM × WSCM

labor_force = pop × labor_participation_fraction

labor_force_to_job_ratio = labor_force / jobs

labor_participation_fraction = 0.27

land_per_business_structure = LPBSCM × LPBSN

LPBSCM = RLPM × SSLPM × WSLPM

LPBSN = 0.0002

attractiveness_of_job_multi = GRAPH(labor_force_to_job_ratio) (0.00, 2.00), (0.2, 1.95), (0.4, 1.80), (0.6, 1.60), (0.8, 1.35), (1.00, 1.00), (1.20, 0.5), (1.40, 0.3), (1.60, 0.2), (1.80, 0.15), (2.00, 0.1)

business_labor_force_multi = GRAPH(labor_force_to_job_ratio) (0.00, 0.2), (0.2, 0.25), (0.4, 0.35), (0.6, 0.5), (0.8, 0.7), (1.00, 1.00), (1.20, 1.35), (1.40, 1.60), (1.60, 1.80), (1.80, 1.95), (2.00, 2.00)

business_land_multiplier = GRAPH(land_fraction_occupied) (0.00, 1.00), (0.1, 1.15), (0.2, 1.30), (0.3, 1.40), (0.4, 1.45), (0.5, 1.40), (0.6, 1.30), (0.7, 0.9), (0.8, 0.5), (0.9, 0.25), (1, 0.00)

□ 주택부문

houses(t) = houses(t - dt) + (house_construction - house_demolition) × dt

INIT houses = 130,560

house_construction= houses × house_construction_normal × housing_construction_multi

house_demolition = houses × house_demolition_normal

area = 58.52

household_size = 3.1

household_to_house_ratio = (pop/household_size) / houses

house_construction_normal = 0.07

house_demolition_normal = 0.015

housing_construction_multi = housing_availability_multi × housing_land_multiplier × RCM × SSCM × WSHCM

land_fraction_occupied = (business_structure × land_per_business_structure + houses× land_per_house) / area

land_per_house = LPHCM × LPHN

LPHCM = RLPM × SSLPM × WSLPM

LPHN = 0.000

attractiveness_of_housing_multi = GRAPH(household_to_house_ratio) (0.00, 1.40), (0.2, 1.40),

(0.4, 1.35), (0.6, 1.30), (0.8, 1.15), (1.00, 1.00), (1.20, 0.8), (1.40, 0.65), (1.60, 0.5), (1.80, 0.45), (2.00, 0.4)

housing_availability_multi = GRAPH(household_to_house_ratio) (0.00, 0.1), (0.2, 0.2), (0.4, 0.35), (0.6, 0.5), (0.8, 0.7), (1.00, 1.00), (1.20, 1.35), (1.40, 1.60), (1.60, 1.80), (1.80, 1.95), (2.00, 2.00)

housing_land_multiplier = GRAPH(land_fraction_occupied) (0.00, 0.4), (0.1, 0.7), (0.2, 1.00), (0.3, 1.25), (0.4, 1.45), (0.5, 1.50), (0.6, 1.50), (0.7, 1.40), (0.8, 1.00), (0.9, 0.5), (1, 0.00)

□ 상수도부문

water_service(t) = water_service(t - dt) + (water_capacity - leakage_water) × dt

INIT water_service = 267,000,000 × 365

water_capacity = water_service × water_capacity_normal

leakage_water = water_service × leakage_rate

leakage_rate = 0.0

operation_rate = 0.8

waterer_supply_rate_index = water_supply_rate / water_service_social_index

water_capacity_normal = 0.0

water_demand = pop × water_demand_amount_per_person_a_day × 365

water_demand_amount_per_person_a_day = 313

water_service_social_index = 100

water_supply = water_service × operation_rate

water_supply_rate = (water_supply / water_demand) × 100

WSCM = GRAPH(waterer_supply_rate_index) (0.00, 0.00), (0.2, 0.05), (0.4, 0.14), (0.6 0.31), (0.8, 0.56), (1.00, 1.00), (1.20, 1.21), (1.40, 1.32), (1.60, 1.36), (1.80 1.39), (2.00, 1.40)

WSLPM = GRAPH(waterer_supply_rate_index) (0.00, 1.81), (0.2, 1.67), (0.4, 1.53), (0.6 1.32), (0.8, 1.15), (1.00, 1.00), (1.20, 0.8), (1.40, 0.62), (1.60, 0.46), (1.80 0.32), (2.00, 0.19)

□ 하수도부문

sewage_service(t) = sewage_service(t - dt) + (sewage_capacity) × dt

INIT sewage_service = 300,000,000 × 365

sewage_capacity_normal = 0.000

sewage_demand = pop × sewage_demand_amount_per_person_a_day × 365

sewage_demand_amount_per_person_a_day = 276

sewage_operation_rate = 0.8

sewage_service_social_index = 100

sewage_supply = sewage_service × sewage_operation_rate

sewage_supply_rate = (sewage_supply / sewage_demand) × 100

sewage_supply_rate_index = sewage_supply_rate / sewage_service_social_index

SSCM = GRAPH(sewage_supply_rate_index) (0.00, 0.00), (0.2, 0.05), (0.4, 0.14), (0.6, 0.31) (0.8, 0.56), (1.00, 1.00), (1.20, 1.21), (1.40, 1.32), (1.60, 1.36), (1.80, 1.39) (2.00, 1.40)

SSLPM = GRAPH(sewage_supply_rate_index) (0.00, 1.80), (0.2, 1.65), (0.4, 1.49), (0.6 1.30), (0.8, 1.14), (1.00, 1.00), (1.20, 0.86), (1.40, 0.68), (1.60, 0.52), (1.80 0.35), (2.00, 0.21)

□ 도로부문

road_area(t) = road_area(t - dt) + (road_capacity) × dt

INIT road_area = 4.896

road_capacity = road_area × road_capacity_normal

road_demand = cars × road_demand_amount_per_car

road_demand_amount_per_car = 0.00002932

road_supply_rate = (road_area / road_demand) × 100

standard_rate = 16

RCM = GRAPH(road_area_rate_index) (0.00, 0.00), (0.2, 0.05), (0.4, 0.14), (0.6, 0.31), (0.8 0.56), (1.00, 1.00), (1.20, 1.21), (1.40, 1.32), (1.60, 1.36), (1.80, 1.39), (2.00 1.40)

RLPM = GRAPH(road_area_rate_index) (0.00, 1.80), (0.2, 1.65), (0.4, 1.49), (0.6, 1.30) (0.8, 1.14), (1.00, 1.00), (1.20, 0.88), (1.40, 0.66), (1.60, 0.52), (1.80, 0.35) (2.00, 0.21)