

시스템 다이내믹스 기법을 활용한 성남시 토지이용수요 예측에 관한 연구

A Study on Prediction of Land Use Demand in Seongnam-city Using System Dynamics

이미숙¹⁾ · 신동빈²⁾ · 김창훈³⁾

Yi, Mi Sook · Shin, Dong Bin · Kim, Chang Hoon

Abstract

This study aims to predict the land use demand of Seongnam-city using system dynamics and to simulate the effect of changes in family structure and land use density adjustment policy on land use demand. This study attempted to construct causal loop diagrams and an analysis model. The changes in land use demand over time were predicted through simulation results. As a result of the analysis, as of 2035, an additional supply of 2.08 km² for residential land and 1.36 km² for commercial land is required. Additionally, the current supply area of industrial land can meet the demand. Three policy experiments were conducted by changing the variable values in the basic model. In the first policy experiment, it was found that when the number of household members decreased sharply compared to the basic model, up to 7.99 km² of additional residential land were required. In the second policy experiment, if the apartment floor area ratio was raised from 200% to 300%, it was possible to meet the demand for residential land with the current supply area of Seongnam-city. In the third policy experiment, it was found that even if the average number of floors in the commercial area was raised from four to five and the building-to-land ratio in the commercial area was raised from 80% to 85%, the demand for commercial land exceeded the supply area of the commercial area in Seongnam-city. This study is meaningful in that it proposes a new analytical model for land use demand prediction using system dynamics, and empirically analyzes the model by applying the actual urban planning status and statistics of Seongnam-city.

Keywords : Land Use Demand, Demand Forecasting, System Dynamics, Policy Experiment

초 록

본 연구는 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 성남시의 토지이용수요를 예측하고 가족구조 변화와 토지이용밀도 조정정책이 토지이용수요에 미치는 영향을 모의실험하는데 연구의 목적이 있다. 이를 위해 분석모형을 설계하고 시뮬레이션 결과를 통해 시간의 흐름에 따른 토지이용수요의 변화를 살펴보았다. 분석결과에 의하면, 2035년 기준으로 주거용지는 2.08km², 상업용지는 1.36km²의 추가 공급이 필요하고, 상업용지는 현재 공급면적으로 수요를 충족할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 기본 모형에서 변수값을 변경하여 세가지 정책실험을 실시하였다. 첫 번째 정책실험에서는 가구원수가 기본 모형에 비해 급격히 감소할 경우에는 주거용지가 최대 7.99km² 추가공급이 필요한 것으로 나타났다. 두 번째 정책실험에서는 아파트 용적율이 200%에서 300%로 상향하면 현재의 성남시 주거지역 공급면적으로 주거용지 수요 충족이 가능하였다. 세 번째 정책실험에서는 상업지역 평균층수를 4층에서 5층 상향하고 상업지역 건폐율을 80%에서 85%로 상향하더라도 상업용지의 수요가 성남시 상업지역 공급면적을 초과하는 것으로 나타났다. 본 연구는 시스템 다이내믹스를 활용하여 토지이용수요 예측의 새로운 분석모형을 제시하고, 성남시의 실제 도시계획 현황 및 통계를 적용하여 모형을 실증하였다는데 연구의 의의가 있다. 향후 성남시 토지이용수요 예측 및 분석 모형의 정교화를 위한 후속연구가 이루어져야 할 것이다.

핵심어 : 토지이용수요, 수요 예측, 시스템 다이내믹스, 정책 실험

Received 2022. 07. 26, Revised 2022. 08. 11, Accepted 2022. 08. 17

1) Member, Dept. of Urban Information Engineering, Anyang University (E-mail: mslee0414@anyang.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Urban Information Engineering, Anyang University (E-mail: dbshin@anyang.ac.kr)

3) Dept. of Industrial Engineering, Adjunct professor, Hanyang University (E-mail: chang88@hanyang.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

무분별한 난개발을 방지하고 토지자원을 효율적으로 이용하여 도시의 질서 있는 성장을 유도하고 도시 기능을 확보하기 위해 각종 토지이용을 체계적으로 관리할 필요가 있다. 기존에는 성장하는 도시인구를 수용하기 위해 계획인구를 설정하고 용도별 토지수요를 산정하여 도시기본계획의 부문별 계획으로 토지이용계획을 수립해서 토지이용을 관리해 왔다. 법정 도시계획에 주로 활용되는 전통적인 원단위법에 의한 토지이용수요 예측은 인구증가 시대에는 계획적 도시개발과 쾌적한 도시환경 유도 측면에서 의미가 있었다. 하지만, 저출산·고령화 등 최근의 사회·경제적 환경 변화로 인해 토지이용수요 추정 방식에도 변화가 필요하다.

현재 토지이용수요의 추정은 장래 목표연도의 인구 및 경제활동 규모 예측을 통하여 이루어진다(Korea Planning Association, 2015). 따라서 인구구조의 변화와 인구감소 그리고 4차 산업혁명이라는 새로운 패러다임 하에서 토지이용과 관리, 도시계획, 토지 및 주택정책 수립의 기초가 되는 토지이용수요를 예측하기 위한 새로운 방법론이 모색되어야 한다(Cho *et al.*, 2019). 특히 과거의 수요 추정방법으로는 목표연도의 인구를 설정하고 산정식에 따라 토지이용수요를 추정할 수는 있지만, 사회·경제적 여건의 변화를 반영하여 시간의 흐름에 따라 동태적으로 변화하는 인구와 토지수요를 예측하는 데는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 계획인구 추정을 통해 용도별 토지이용수요를 추정하는 기존 방식을 상황 변화에 맞게 수정·보완하여 시간의 흐름에 따른 토지이용수요 예측을 위한 시스템 다이내믹스 모형을 구축하고, 이를 바탕으로 인구구조의 변화와 토지이용밀도의 변화가 토지이용수요에 어떠한 영향을 미치는지 모의실험을 하고자 한다.

본 연구의 공간적 범위는 성남시로 설정하였다. 성남시는 1970년대 초 서울시 철거민 집단이주를 시작으로 1990년대 분당신도시 입주에 따른 양적 성장기를 거쳐 2000년대 판교신도시 건설을 통한 전면적인 도시공간구조의 개편이 진행된 도시이므로(An, 2008), 도시의 성장기-안정기-쇠퇴기라는 동태적인 과정을 예측하는데 적합하다고 보았다. 장기적인 인구 변화와 도시공간구조의 변화를 예측하기 위하여 시간적 범위는 2010년부터 2050년까지로 설정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 시스템다이내믹스 기법

시스템다이내믹스는 1961년 Forrester 교수가 산업체 재고

량과 노동력의 불안정한 변화, 시장점유율의 감소문제들을 다룬 '산업동태론'을 발표한 이후에 기업경영과 공공정책, 공학 등의 분야에 광범위하게 활용되고 있다(Moon, 2007). 시스템다이내믹스는 동태적이고 순환적인 인과관계의 시각으로 컴퓨터 모델을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변화해 나가는지를 컴퓨터상에서 실험해 보는 방법론이자 현상을 바라보는 시각이며 준거틀이다(Moon, 2002; Yi *et al.*, 2020).

요약하면, 시스템 다이내믹스는 시스템의 구조를 모델화하여 이를 컴퓨터에서 시뮬레이션하여 정책효과를 분석하는 방법론이다(Kim, 2004). 시스템 다이내믹스 모델링에 사용되는 인자들은 수준변수(level variable), 변화율변수(rate variable), 보조변수(auxiliary variable), 상수(constant), 테이블함수(table function) 등이 있다.

수준변수는 시스템에서 해당 요소의 수준이나 상태(state)를 보여주는 변수로 시간이 흐르면 누적적으로 증가하거나 감소하는 속성이 있다. 수준변수에 관한 수식은 Eq. (1)과 같이 적분식으로 표현된다. 여기에서 L 은 수준변수이고 R 은 변화율변수이다.

$$L(t) = L(0) + \left(\int iR(t)dt - \int oR(t)dt \right) \quad (1)$$

Where iR represents the inflow of rate variable, and oR represents the outflow of rate variable.

변화율변수는 수준변수의 증가나 감소에 직접적으로 영향을 주면서 수준변수에 변화를 가져오는 변수이다. 변화율변수에 관한 수식은 Eq. (2)와 같이 미분방정식으로 표현된다.

$$R(t) = \frac{dL(t)}{dt} = iR(t) - oR(t) \quad (2)$$

모델링에 사용되는 수준변수와 변화율변수들의 연결 관계를 수식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다. 이것이 시스템 다이내믹스 기법에서 시뮬레이션 모델(stock and flow diagrams) 방정식의 수학적 알고리즘이라고 할 수 있다.

$$L(t) = L(t - dt) + dt \times [iR - oR] \quad (3)$$

보조변수는 변화율변수에 직접적이거나 간접적으로 영향을 미치는 모든 변수를 의미한다. 상수는 시간이 흘러도 변하지 않는 값을 갖는 요소를 말한다. 테이블함수는 두 변수간의 관계가 수식이 아니라 그래프로 표현되는 변수를 말한다.

2.2 토지이용수요 예측

토지이용은 도시활동의 공간적인 표현이며, 공간의 여러 요인들이 서로 복잡하게 얽혀있는 현상이 지표, 지상, 지하의 공간에서 발생하는 현상으로 토지이용은 일종의 공간이용이다 (Korea Planning Association, 2015). 토지를 계획적으로 이용하기 위해서는 미래의 사회·경제적 변화를 예측하여 이러한 환경 변화에 대응하는 토지이용수요를 추정할 필요가 있다.

일반적으로 계획 대상지역의 토지이용에 대한 수요 추정은 다음과 같은 3단계로 거쳐 이루어진다(Fig. 1). 첫 번째 단계에서는 목표연도의 인구 및 경제활동 규모 및 공간분포를 예측한다. 두 번째 단계는 기능별 도시활동을 영위하기 위한 주택, 공장, 상업·업무용 건물, 녹지 등에 대한 수요를 도출하고, 용도별·입지별 토지이용의 집약도(intensity)를 나타내는 토지이용밀도를 결정하는 단계이다. 세 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 예측된 인구 또는 경제활동 규모를 두 번째 단계에서 설정한 밀도지표로 나누어서 용도별 토지수요 면적을 산출하게 된다.

현재 법정 도시계획에서 제시하고 있는 토지이용수요는 주거용지, 상업용지, 공업용지로 나누어 추정하고 있으며, 각각의 용지 특성을 반영한 수요 산정식이 있다(Lim and Lee, 2016). 주거용지는 인구밀도 기준과 주택호수 기준의 두가지 방식이 많이 활용되고 있으며 두 값의 최저값을 활용하거나 평균치를 활용한다. 상업용지 추정은 이용인구에 의한 방법과 3차산업 종사자 수에 의한 방법 두가지가 활용되고 있으며 이 두 값의 최저값이나 평균값을 선택하기도 하고 한 가지 방식으로만 추정하는 경우도 있다. 공업용지의 경우에는 종사자수에 따른 공업용지 추정방법이 주로 활용되고 있다(Korea Planning Association, 2015; Lim and Lee, 2016). 이러한 기존의 토지이용수요 산정방식은 인구 성장형 시대에 급격하게 증가하는 도시인구를 수용하고 계획적인 토지이용 및 관리를 하기에 적합한 수요예측 방법이었다. 현재 우리나라는 인구 저성장 시대를 지나 실질적으로 인구감소 시대에 직면하였기 때문에 과거 폭발적 인구 증가와 고도의 압축성장기에 적합했던 현행의 토지이용수요 추정방식에 대한 재검토가 필요한 시

점이다(Cho *et al.*, 2019).

2.3 선행연구

토지수요예측 방법론에 관한 연구는 Lee(2009)와 Lim and Lee(2016)의 연구가 대표적이다. Lee(2009)는 도시성장관리 차원에서 도시의 토지수요 예측을 위한 방법론을 제시하고 수원시를 사례도시로 선정하여 토지수요 예측방법을 적용하였다. 인구와 고용 증가로 인한 토지수요를 기성시까지 내에서 공급이 가능한 물량을 감안하여 신규 개발이 필요한 토지수요량을 예측하는 방법을 제시하였는데 의의가 있다.

Lim and Lee(2016)는 인구저성장 등 계획수립여건 변화를 반영한 토지수요추정 방안을 제시하였다. 도시기본계획에서 토지이용수요 추정방법을 사례 중심으로 분석하고 문제점을 도출하였으며, 인구저성장시대에 적합한 주거, 상업, 공업용지 수요추정에 활용된 지표들을 비교분석하여 토지이용수요 추정에 대한 개선방안을 제시하였다. 그러나, 인구규모, 도시의 성장 가능성, 도시특성, 정책적 의지에 따라 도시별로 토지이용계획이 맞춤형이어야 한다는 제도개선 방안을 제시하고 있을 뿐, 환경변화에 따른 새로운 토지이용수요 추정방안을 제시하고 있지는 않다.

시스템 다이내믹스를 활용하여 토지이용 변화나 토지이용수요를 예측하는 동태모형을 개발한 연구도 일부 진행되었다. An(2009)은 도시의 동태적 특성을 기본 전제로 하여 성남시를 대상으로 용도지역의 변경에 따른 도시의 다양한 하위 시스템이 장기적으로 어떻게 변화할 것인지를 규명하고자 하였다. 시스템다이내믹스를 활용하여 용도지역관리모형을 구축하고 그린벨트 해제 확대적용, 용적률 완화 확대적용, 그린벨트 변경시 사업용지 개발 확대에 대한 정책실험을 통해 성남시의 하위 시스템의 변화추이를 분석하였다. 인구, 산업경제, 주택, 환경, 교통, 토지이용 등과 같은 하위 시스템간의 상호작용을 분석모형에 반영하였다는 데 연구의 의의가 있지만, 하위 시스템에 반영된 변수가 적고 개념을 단순화하여 적용하였다는데 연구의 한계가 있다(An, 2009).

Cho *et al.*(2019)은 사회·경제 구조 변화를 반영할 수 있는

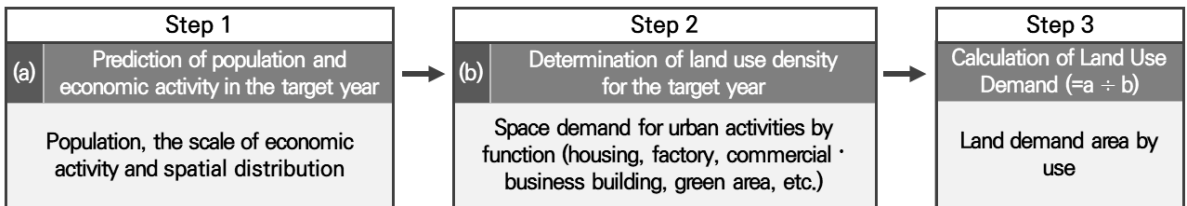


Fig. 1. The process of estimating land use demand (Korea Planning Association, 2015)

미래 토지이용수요 예측 동태모형을 개발하여 2050년까지 토지이용수요 변화를 전망하였다. 또한 주택공급정책과 경제상황별 토지이용수요의 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 이러한 연구는 사회경제 구조의 복잡성과 변동성에 따라 변화하는 토지이용수요를 동태적으로 시뮬레이션 할 수 있는 시스템 다이내믹스 모형을 개발하였다는데 연구의 의의가 있다. 그러나 도시기본계획과 토지이용계획이 시·군이라는 도시 단위로 수립되는데 비해서, Cho *et al.*(2019)의 연구는 공간적 범위를 도시 규모가 아니라 전국을 대상으로 하여 인구, 주택, 토지이용수요를 전망하였다는 점에서 도시의 토지이용계획에 반영하기에는 한계가 있다.

3. 토지이용수요 예측 모형 설계

3.1 인과지도

본 연구에서는 토지이용수요를 주거용지, 상업용지, 공업용지, 녹지에 대한 수요로 구분하였다. 인구와 주거용지 수요간의 인과관계는 Fig. 2와 같이 3개의 양의 피드백루프와 3개의 음의 피드백루프로 구성되어 있다. R1은 인구가 증가하면 출생이 증가하고 출생자수가 증가하면 다시 인구가 증가하는 양의 피드백루프이다. B1은 인구가 증가하면 사망자수도 증가하고 사망자수가 늘어나면 인구는 감소하여 인구가 균형을 유지하는 음의 피드백루프이다.

인구가 증가하면 가구수가 늘어나고 이에 따라 주택수요도 상승한다. 주택수요가 증가하면 시간지연이 존재하지만 결국 주택수도 증가하게 되어 전입이 증가하고 결과적으로 도시의 인구가 늘어나게 된다. 이러한 양의 피드백루프를 인과지도 R2로 표현하였다.

주택수요와 주택수는 수요와 공급을 의미하여 시간지연이 있는 균형루프이다. 주택수요가 증가하면 주택을 공급하는데 시간지연이 존재하지만 결국 주택수가 증가하여 주택수요를 충족시켜서 결과적으로 주택수요는 감소하게 되는 음의 피드백루프(B2)이다.

가구수 증가나 주택수요 증가로 인해 주거용지 수요가 증가하게 되면 토지이용수요가 증가하게 된다. 하지만 도시내 가용토지에는 한계가 있기 때문에 가용토지 면적에 비해서 토지수요가 증가하게 되면 결과적으로 토지수요에 비해 주거용지로 지정되는 토지면적은 감소하게 된다. 주거용지로 배분되는 토지면적이 감소하면 주거용지 수요는 더욱 증가하게 된다.(R3 참조)

B3은 인구와 주거용지간의 관계를 나타내는 피드백루프이며, Fig. 2에서 굵은 선으로 표시되어 있다. 도시의 인구가 증

가하면 가구수도 늘어나고 주택수요가 증가하게 된다. 주택수요의 증가는 주거용지 수요의 증가로 연결되고 이로 인해 토지이용수요도 증가한다. 그러나 도시의 가용토지 면적은 한정되어 있으므로 가용면적에 비해 토지수요가 증가하면 결과적으로 주거용지로 지정되는 면적은 줄어들게 된다. 이는 주택수의 감소를 초래하고 이로 인해 전입자수가 줄어들어 도시의 인구는 감소하게 된다. 따라서 가용토지 면적의 제약으로 인해서 인구는 처음에는 증가하지만 일정 수준 이상이 되면 주거용지 면적의 한계로 인해 인구가 더 이상 증가하지 않는 균형 또는 정체 단계에 진입하게 된다.

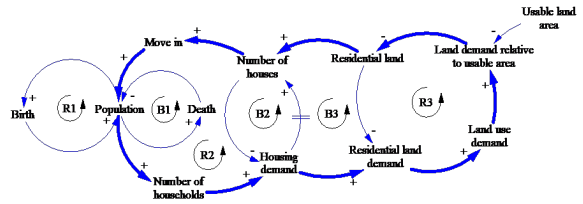


Fig. 2. Causal loop diagram of population and residential land demand

주거용지 뿐만 아니라 상업용지, 공업용지, 녹지는 모두 가용토지 면적이라는 제약이 존재하기 때문에 한정된 토지를 예상 수요에 따라 배분하는 구조이다. Fig. 3의 R4는 3차산업 종사자수에 따라 상업용지의 수요가 결정되고 토지이용수요가 증가하지만 가용면적에 비해서 토지수요가 증가하게 되면 상업용지로 지정되는 토지는 감소하고, 이로 인해서 상업용지의 수요는 다시 증가하는 양의 피드백루프이다. Fig. 3에서 R5의 공업용지 수요는 2차산업 종사자수의 증감에 따라서 증가하거나 감소하지만, 피드백루프의 구조와 성격은 R4와 동일하다.

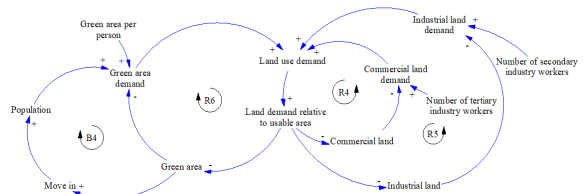


Fig. 3. Causal loop diagram of commercial, industrial, and green area demand

1인당 녹지면적의 목표치와 인구수에 의해 녹지 수요가 결정된다. 녹지수요가 증가하면 토지이용수요가 증가하고 도시의 가용면적의 한계로 인해 녹지수요에 비해 녹지가 감소하면 녹지수요는 다시 증가하게 된다.(R6 참조) B4는 도시 내 녹지

가 증가하면 전입자수가 증가하여 인구가 늘고 녹지수요가 상승하지만, 토지이용수요의 증가와 가용면적의 한계로 인해 결과적으로 녹지가 감소하여 전입이 감소하고 인구 증가가 정체되는 균형루프를 나타내고 있다.

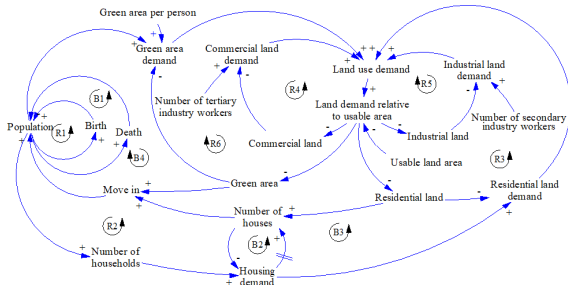


Fig. 4. Total causal loop diagram of land use demand

앞서 설명한 인과지도를 합쳐서 토지이용수요에 관한 전체 인과지도를 작성하면 Fig. 4와 같다. 전체 인과지도는 4개의 음의 피드백루프와 6개의 양의 피드백루프로 구성되어 있다. 다음에서는 이러한 인과지도를 토지이용수요 예측을 위한 Stock-Flow 다이어그램으로 변환하고 수식을 입력하여 시뮬레이션 모형을 설계하고자 한다.

3.2 모형의 설계

인과지도를 바탕으로 성남시 토지이용수요 예측을 위한 시뮬레이션 모형을 구축하기 위해 시스템 다이내믹스 분석 도구인 Powersim studio 10을 활용하여 Fig. 5와 같은 Stock-Flow 다이어그램을 작성하였다. 부문별 인과지도를 모두 반영한 전체 인과지도인 Fig. 4를 Fig. 5와 같은 분석모형으로 변환하기 위하여 변수를 속성에 따라 수준변수, 변화율변수, 보조변수,

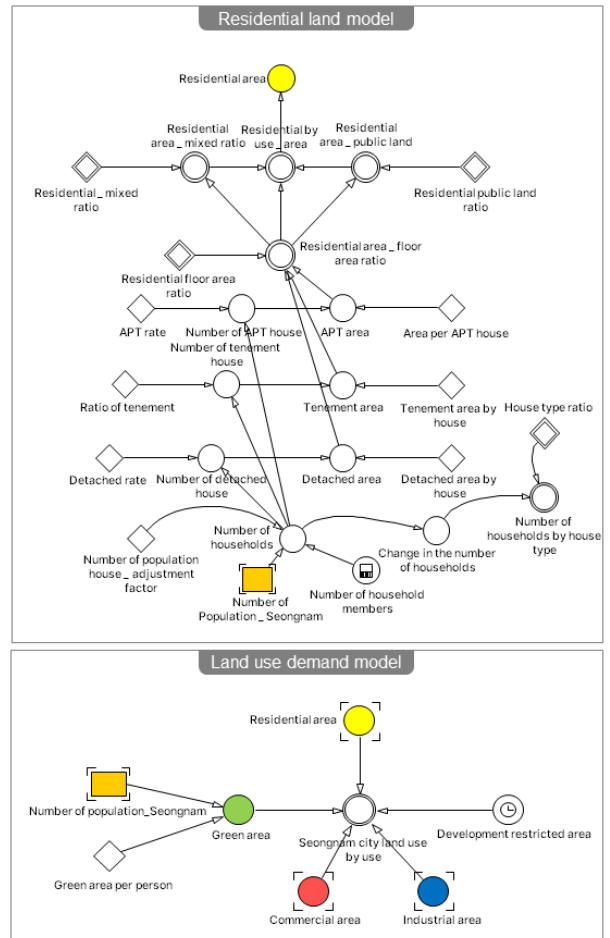
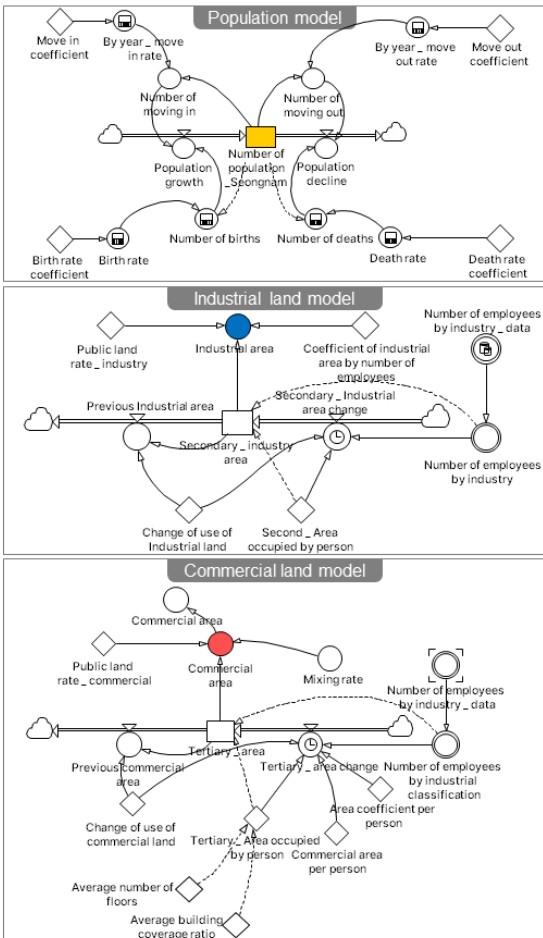


Fig. 5. Stock-flow diagrams of Seongnam-city land use model

상수, 테이블함수 등으로 구분하였다. 먼저 시간이 흐르면 누적적으로 증가하거나 감소하는 속성을 가진 변수인 수준변수에 해당되는 성남시 인구, 상업지역 면적, 공업지역 면적 등을 모형에 반영하였다. 다음으로 수준변수의 증가나 감소에 직접적으로 영향을 주는 변수인 변화율변수와 출생율, 사망률, 전입율, 전출율, 가구수와 같은 테이블 함수를 추가하고, 그 외의 변수는 보조변수와 상수로 처리하여 Stock-Flow 다이어그램을 완성하였다.

램을 완성하였다.

분석을 위하여 본 연구에서는 인구모형, 주거용지 모형, 상업용지 모형, 공업용지 모형, 토지이용수요 모형으로 구분하여 전체모형인 성남시 토지이용수요 예측 모형을 구축하였다.

변수값은 국가통계포털, 국토교통부 통계이음, 성남통계연보, 성남시 홈페이지, 2035년 성남시 도시기본계획(Seongnam

Table 1. The equations of population model and residential land model

Model name	Equations
Population model	<ul style="list-style-type: none"> • Number of population_Seongnam = 996,524 • Population growth = Number of moving in + Number of births • Population decline = Number of deaths + Number of moving out • Number of births=INIT(Number of population_Seongnam)*Birth rate • Number of deaths=INIT(Number of population_Seongnam)*Death rate • Number of moving in=Number of population_Seongnam * By year_move in rate • Number of moving out=Number of population_Seongnam * By year_move out rate • By year move in rate = IF(TIME>2020, 0, 1) * Move in rate_2010[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME)))] • By year move out rate = IF(TIME>2020, 0, 1) * Move out rate_2010[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME)))] • Move in coefficient = -0.2912795971253 • Move out coefficient = -0.2512168050668 • Birth rate coefficient = -0.04418633069157 • Death rate coefficient = 0.02067721236596
Residential land model	<ul style="list-style-type: none"> • APT area = Number of APT house * APT area per house • Number of households by house type = Change in the number of households * House type ratio • Detached area = Number of detached house * Detached house area by house • Tenement area = Number of tenement house * Tenement house area by house • Number of households_house = Number of population house_adjustment factor * Number of population_Seongnam / Number of household members • Residential loss rate = 0.58% • Floor land ratio_adjustment factor = 0.62215*((-0.5*LN((NUMBER(TIME)-2009))*0.0002, 0.001, 0.001))+0.82215 • Number of population house_adjustment factor = 0.98531 • Detached rate = 15% • Ratio of tenement = 25% • APT rate = 60% • Residential area = ARRSUM(Residential by use_area) • Residential mixed ratio = { 10, 10, 10 } % • Residential floor area ratio = { 200, 150, 100 } % • Residential public land ratio = { 30, 30, 30 } % • Residential area_floor area ratio = {APT area, Tenement area, Detached area} / Residential floor area ratio * Floor land ratio_adjustment factor • Number of APT house = Number of households_house * APT rate • Number of detached house = Number of households_house * Detached rate • Number of tenement house = Number of households_house * Ratio of tenement • Residential area_public land = Residential area_floor area ratio * (Residential public land ratio) • Residential area_mixed ratio = Residential area_floor area ratio * (Residential_mixed ratio) • Residential by use_area = Residential area_floor area ratio + Residential area_public land + Residential area_mixed ratio • APT area per house = 85 • Tenement house area by house = 85 • Detached house area by house = 165

-city, 2020)의 통계 및 현황자료를 참고하여 수치를 입력하였다. 인구모형에서 성남시 인구는 2010년 기준으로 996,524명으로 초기값을 설정하였다. 2010년부터 2020년까지 성남시 출생률, 사망률, 전입율, 전출율은 국가통계포털의 시군구 데이터를 입력값으로 사용하였고, 2021년부터는 10년간의 추세를 반영한 출생률 계수, 사망률 계수, 전입율 계수, 전출율 계수를 도출하여 변수값 설정에 활용하였다(Table 1).

주거용지 모델에서는 2035년 성남시 도시기본계획에서 설정한 값에 따라 주거용적율, 주거유형비율, 호당 면적, 주거공공용지율, 주거혼합율을 입력하였다. 주거용적율은 단독주택

100%, 연립주택 150%, 아파트 200%로 설정하였으며 주거유형 비율은 단독비율 15%, 연립비율 25%, 아파트 비율을 60%로 구성하였다. 호당 면적은 단독주택 165㎡, 연립주택 85㎡, 아파트 85㎡로 하였고, 주거공공용지율은 30% 그리고 주거혼합율은 10%로 설정하였다.

상업용지 모델도 2035년 성남시 도시기본계획의 토지이용수요 예측을 위한 설정값을 준용하여 상업지역의 평균층수는 4층, 평균건폐율은 80%, 종업원 1인당 바닥면적은 14㎡, 공공공지율은 35%로 설정하였다. 세부 모형별로 변수의 구체적인 수식과 입력값은 Tables 1 and 2와 같다.

Table 2. The equations of commercial land model, industrial land model, and land use demand model

Model name	Equations
Commercial land model	<ul style="list-style-type: none"> • Previous commercial area = Tertiary_area * Change of use of commercial land • Tertiary_area = Number of employees by commercial classification[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME))),3] * Tertiary_Area occupied by person • Tertiary_area change = Number of employees by commercial classification[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME)+1)),3] * Tertiary_Area occupied by person*Change of use of commercial land*Area coefficient per person_commercial • By year commercial area by number of employees = (Tertiary_area * (1+Public land rate_commercial)) * Coefficient of commercial area versus number of employees + (4972650-1487754) • Public land rate_commercial = 0.35 • Tertiary_area occupied by person = 14/(Average number of floors * Average building coverage ratio) • Average number of floors = 4 • Average building coverage ratio = 80% • Commercial area = IF(TIME>2020, 0, 1) * Tertiary_commercial area[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME)))] • Change of use of commercial land = 1 • Area coefficient per person = 1 • Coefficient of commercial area versus number of employees = 1
Industrial land model	<ul style="list-style-type: none"> • Previous industrial area = Secondary_industrial area * Change of use of industrial land • Secondary_industrial area = Number of employees by industry[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME))),2] * Second_area occupied by person • Secondary_industrial area change = Number of employees by industry[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME)+1)),2] * Second_area occupied by person * Change of use of industrial land • Industrial area = (Secondary_industrial area * (1+Public land rate_industry)) * Coefficient of industrial area by number of employees + 187951 • Coefficient of industrial area by number of employees = 0.069505546 • Public land rate_industry = 0.4 • Second_area occupied by person = 226.6 • By year_industrial area = IF(TIME>2020, 0, 1) * Secondary_industrial area[INDEX(INTEGER(NUMBER(TIME)))] • Change of use of industrial land = 1
Land use demand model	<ul style="list-style-type: none"> • Seongnam city land use by use = {Development restricted area, Development restricted area + Green area, Development restricted area + Green area + Industrial area, Development restricted area + Green area + Industrial area + Commercial area, Development restricted area + Green area + Industrial area + Commercial area + Residential area} • Green area per person = 6 • Green area = Number of population_Seongnam * Green area per person* 106662895/5979144

3.3 기본 모형의 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 시뮬레이션 시작년도를 2010년으로 설정하고 2050년까지 시간의 흐름에 따른 변수값의 변화 패턴을 파악하고자 하였다. 따라서 2010년을 기준으로 변수의 초기값을 입력한 다음에 40년간의 변화 추이를 분석하였다. 본 연구의 시뮬레이션 결과값과 2010년부터 2020년까지의 실제 통계치를 비교하여 모형의 타당성을 검증하기 위해 2010년을 시뮬레이션 시작시점으로 하였다. 또한 2021년 이후의 장기적인 패턴을 파악하기 위해 시뮬레이션 종료시점을 2050년으로 설정하였다. 주요변수의 시뮬레이션 결과는 Fig. 6과 같다.

시뮬레이션 결과에 의하면 성남시 인구는 2012년에 1,003,920명으로 최고치에 도달한 이후로는 계속해서 감소하는 것으로 나타났다. 성남시 인구는 2025년에는 953,484명이고 2035년 930,755명에서 2050년에는 858,825명까지 시뮬레이션 결과값이 감소하고 있다(Fig. 6). 그러나 2035년 성남시 도시기본계획에서는 목표연도의 계획인구가 계속해서 증가하도록 설정하여 2025년 계획인구는 1,054,000명, 2030년에는 1,075,000명, 2035년에는 1,082,000명으로 추정하고 있다. 이는 본 연구의 시뮬레이션 결과와는 상당한 차이가 있다. 저출산·고령화 현상의 장기화로 인구감소 시대에 직면하고 있는 현 시점에서는 인구추정 및 계획인구 설정에서 인구

가 지속적으로 증가할 것이라는 전망은 재검토 되어야 할 것이다. 즉, 인구증가 시대에 만들어진 수요 전망치에 대한 전면적인 점검이 필요하다.

주거용지의 수요는 계속해서 증가하다가 2042년에 정점을 이루고 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 시뮬레이션 결과에 의하면 2020년 주거용지 수요는 30,521,687㎡이고, 2030년에는 32,277,176㎡, 2040년에는 33,237,986㎡, 2050년의 주거용지 수요는 32,847,744㎡로 도출되었다. 인구가 감소함에도 불구하고 주거용지의 수요가 즉각적으로 감소하지 않고 증가하였다가 2040년 정도부터 줄어드는 이유는 1인가구 증가와 같은 사회현상을 반영하여 가구원수가 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 것으로 변수값을 설정하였기 때문이다. 가구원수가 2010년 2.55명에서 시작해서 2050년까지 1.91명으로 감소하게 되면, 이로 인해 가구수가 증가하여 주택수요가 증가하고 결국 주거용지의 수요도 증가할 수밖에 없다. 그러나 전체적인 인구가 감소하고 있으므로 가구원수가 감소하더라도 장기적으로 보면 주거용지 수요는 감소하는 경향을 보이게 된다.

상업용지의 시뮬레이션 결과값을 보면, 2020년 상업용지 수요는 5,865,763㎡이고 2030년은 6,330,751㎡, 2040년에는 6,886,554㎡, 2050년에는 7,550,905㎡로 지속적으로 증

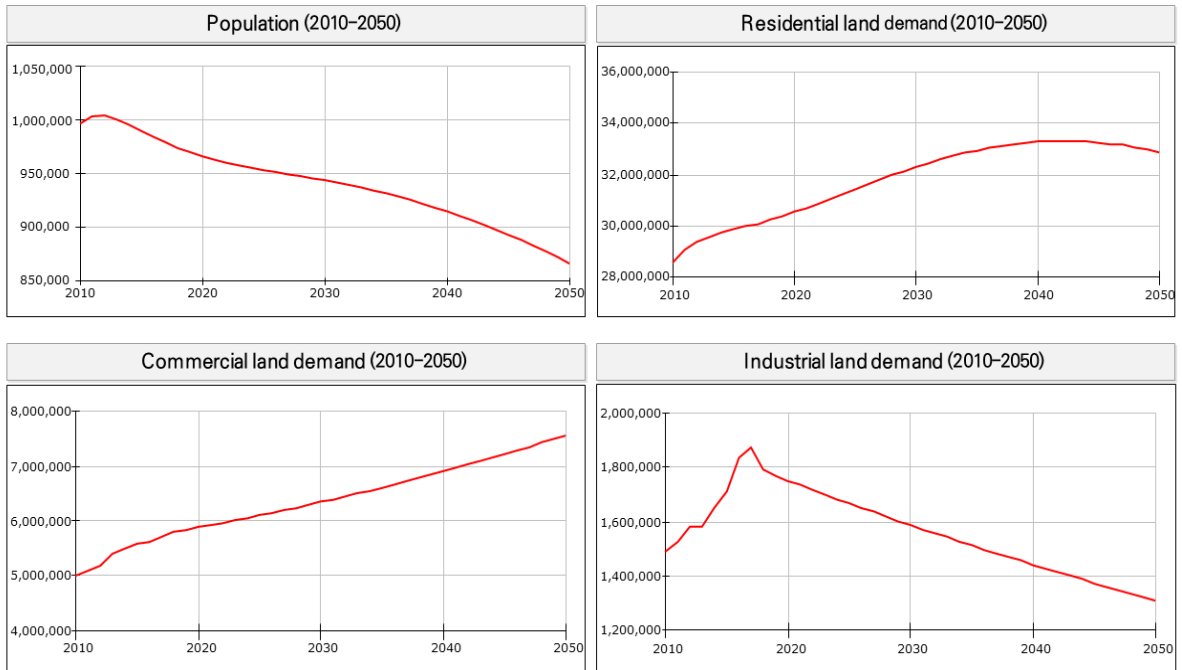


Fig. 6. Simulation results of Seongnam-city land use model

가하고 있다⁴⁾. 그에 비해 공업용지 수요는 2020년 1,748,270 m², 2030년 1,584,886m², 2040년 1,438,611m², 2050년에는 1,307,652m²로 2017년 이후로는 계속해서 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이러한 결과는 성남시가 「수도권정비계획법」상 과밀억제권역에 해당되어 공업용지의 신규지정이 불가능한 실정이라는 현실을 반영하고 있으며, 도시지역 내 첨단 산업 업종으로의 전환 및 고도화와 복합적 토지이용 등 현대적인 산업구조로의 전환이라는 성남시 도시기본계획의 기본 방향과도 부합된다고 할 수 있다.

시스템 다이내믹스 모형의 토지이용수요 예측 결과와 2035년 성남시 도시기본계획의 수요 추정 결과를 비교해보면 Table 3과 같다. 2035년을 기준으로 성남시 도시기본계획상의 주거용지 수요는 34.08km², 상업용지 수요는 6.47km², 공업용지는 1.79km²로 수요면적을 산정하였다. 본 연구 결과는 2035년을 기준으로 주거용지의 수요면적은 32.91km², 상업용지는 6.57km²,

공업용지는 1.5km²로 수요를 예측하였다. 주거용지 수요면적에서 1.17km² 정도의 차이를 보이는데, 이는 2035년의 계획인구와 본 연구의 인구 예측치간의 격차로 인한 결과라고 해석할 수 있다. 2020년 공급면적을 기준으로 본 연구의 2035년 토지이용수요 예측값을 비교해보면, 주거용지는 2.08km², 상업용지는 1.36km²의 추가 공급이 필요한 것으로 분석결과가 도출되었다.

Fig. 7은 성남시의 용도별 토지이용수요를 누적하여 그래프로 표현한 것이다. 개발제한구역, 녹지, 공업지역, 상업지역, 주거지역의 수요면적을 모두 더한 값은 2030년 188,870,582m², 2040년 186,918,657m², 2050년 181,303,435m²로 계속해서 감소하고 있다. 그에 비해서 시가화 용지에 해당되는 주거용지, 상업용지, 공업용지를 합산한 값은 증가하는 경향을 보인다. 시뮬레이션 결과 2030년 40,192,813m², 2040년 41,563,151m², 2050년 41,706,301m²로 시가화 용지의 수요는 2020년에 비해서 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3. Comparison of demand estimation results by land use

(unit : m²)

Category	Demand estimation of City Master Plan(2035)	Demand forecasting in this study ①	Supply area ②	Required area ①-②
Residential land	34,080,000	32,913,178	30,831,545	2,081,633
Commercial land	6,470,000	6,596,266	5,238,153	1,358,113
Industrial land	1,790,000	1,509,727	1,744,254	-234,527
Total	42,340,000	41,019,171	37,813,952	3,205,219

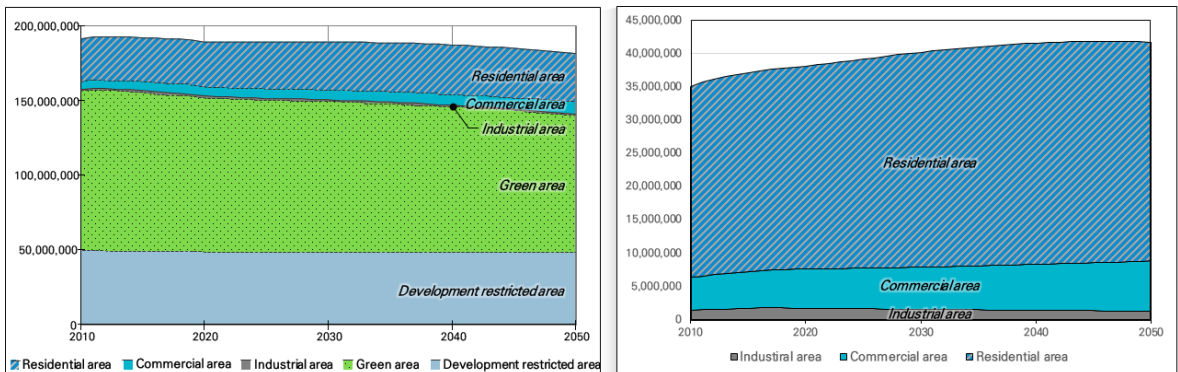


Fig. 7. Seongnam-city land use demand estimation

4) 상업용지의 수요가 주거용지나 공업용지에 비해 꾸준히 증가하는 이유는 상업용지의 수요 추정식에 3차산업 종사자수를 반영하였기 때문인 것으로 판단된다. 성남시 통계 데이터를 보면, 2010년부터 2019년까지 3차산업 종사자수가 전체 업종별 종사자수의 80% 이상을 차지하고 있으며 지난 10년간 성남시의 3차산업 종사자수는 144,087명이 증가하여 2010년에 비해 36%나 증가하였다. 본 시뮬레이션 결과는 이러한 최근의 추세와 전체 산업에서 3차산업이 차지하는 비중이 반영되어 상업지역의 수요가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다고 볼 수 있다.

3.4 모형의 타당성

본 연구 모형의 타당성 검사는 모형의 시뮬레이션 결과가 현실 시스템의 행태와 동일한 특성을 나타내는지 알아보기 위해 절대평균오차비율(MAPE: Mean Absolute Percentage Error)을 적용하였다(Lewis, 1982). MAPE 값을 구하기 위한 수식은 Eq. (4)와 같다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{X_t - F_t}{X_t} \right| \times 100 \quad (4)$$

Where X_t is the actual value and F_t is the forecast value.

Lewis(1982)의 해석기준에 의하면, MAPE가 10% 미만이면 매우 정확한 예측이고, 10% 이상 20% 미만이면 우수한 예측이고, 20% 이상 50% 미만이면 합리적 예측이고, 50% 이상이면 부정확한 예측으로 본다(Yi *et al.*, 2020). 본 연구에서는 2010년부터 2020년까지의 실제값과 시뮬레이션 결과값을 비교하여 MAPE를 도출하였다.

타당성 검사 결과에 의하면 성남시 인구의 MAPE는 0.6%, 주거용지의 MAPE는 1.77%, 상업용지의 MAPE는 8.2%, 공업용지의 MAPE는 2.8%로 나타나 MAPE 값이 모두 10% 미만이므로 예측의 정확도가 높고 모형이 타당하다고 할 수 있

다. Fig. 8과 같이 모형의 주요변수의 10년간 실제값과 시뮬레이션 결과값이 비교적 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 성남시 토지이용수요의 정책실험 결과

4.1 정책실험 개요

장래 토지이용에 대한 수요추정은 일차적으로 각종 도시 활동의 근원으로서 인구 및 경제활동 규모에 대한 전망을 통해 이루어진다. 각 기능별 도시활동에 따른 주택, 공장, 상업·업무용 건물, 녹지 등의 수요는 최종적으로 이에 소요되는 토지면적으로 전환되는데, 구체적인 용도별 토지수요는 도시공간구조상 각 도시활동 분포의 집약도, 즉 토지이용밀도에 따라 달라진다(Korea Planning Association, 2015). 이에 본 연구에서는 가족 구조의 변화와 토지이용밀도의 증가로 인해 장래 토지이용수요가 어떻게 변화하는지를 모의실험 하고자 한다. 구체적인 실험 내용은 다음과 같다.

첫째, 핵가족화에 이은 1인가구의 증가라는 사회현상을 반영하여 가구원수가 기본 모형에 비해 더 급격하게 감소할 경우에 토지이용수요의 변화를 모의실험하였다. 이를 위하여 Fig. 9와 같이 가구원수의 입력값을 변경하였다. 기존의 가구원수는 2010년 2.55명에서 2050년 1.99명으로 서서히 감소하

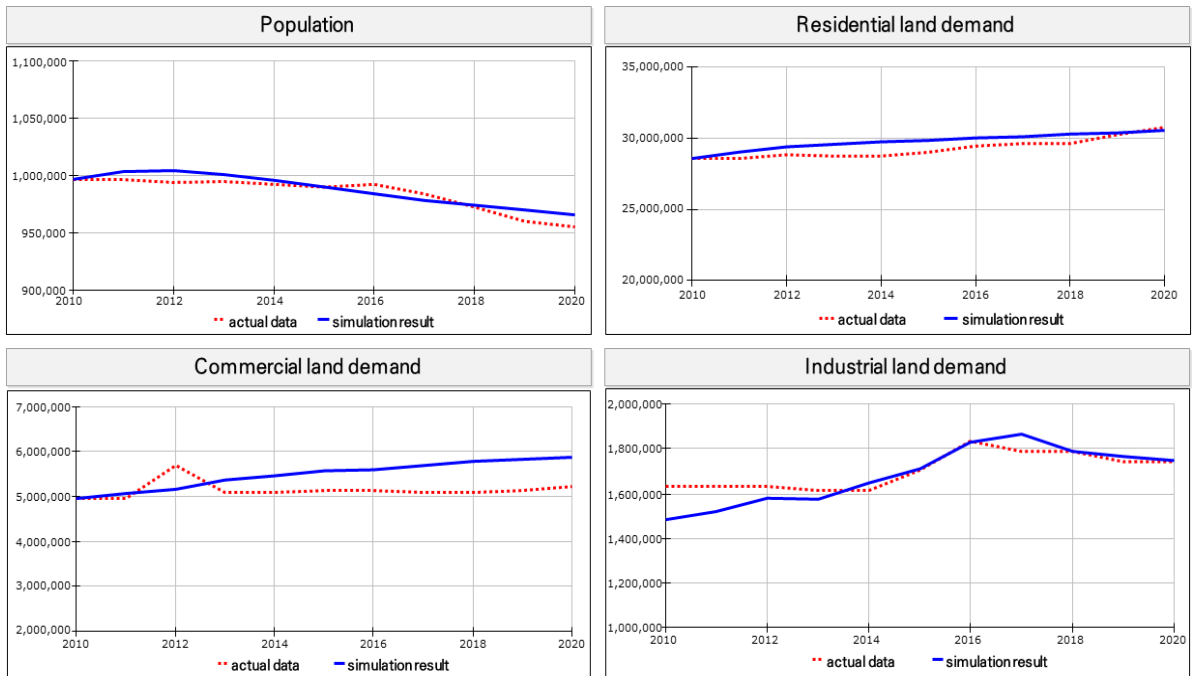


Fig. 8. Actual data and simulation results of key variables

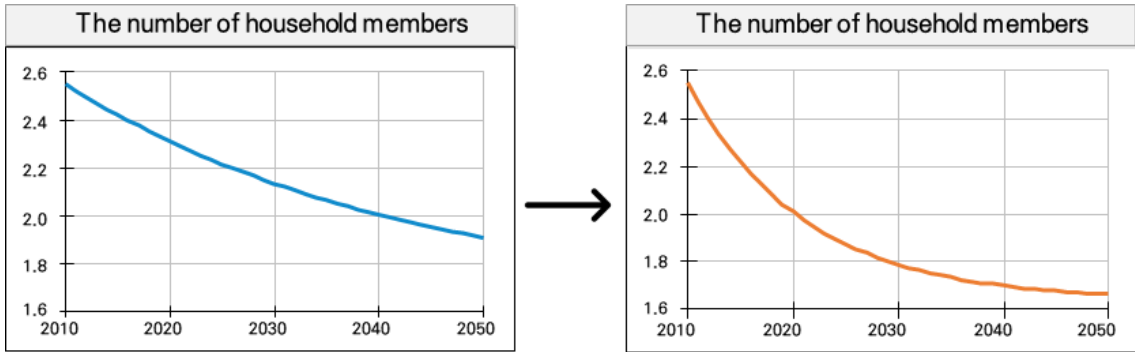


Fig. 9. Decrease in the number of household members over time

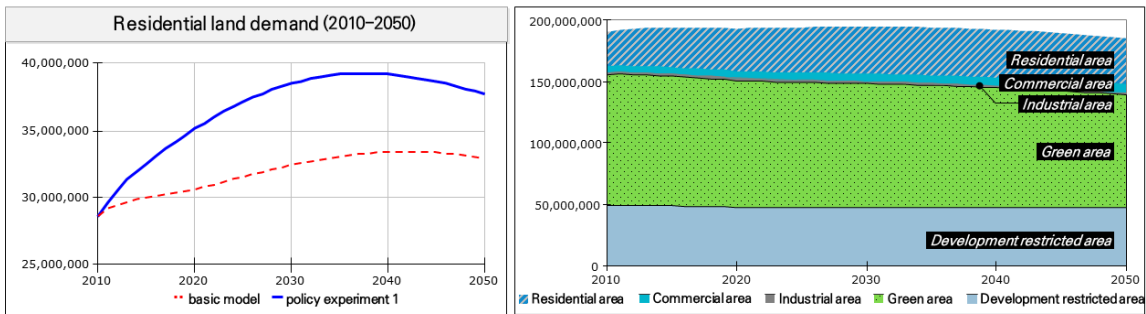


Fig. 10. Results of policy experiment 1

는 것으로 변수값을 입력하였을 경우에 비해서, 정책실험 1에서는 2010년 2.55명에서 2050년 1.66명으로 가구원수가 급격히 감소하는 것으로 변경하였다.

둘째, 주거지역의 토지이용밀도를 증가시키기 위해서 정책실험 2에서는 주거용적을 중에서 아파트 용적율을 기존 200%에서 300%로 변경하여 토지이용수요의 변화를 살펴보았다. 셋째, 상업지역의 토지이용밀도를 상향할 경우의 수요면적 변화를 분석하기 위하여 기본 모형에서는 상업지역 평균층수 4층, 상업지역 평균건폐율 80%로 설정하였던 것을 정책실험 3에서는 상업지역 평균층수 5층, 평균건폐율 85%로 변경하였다.

4.2 정책실험 결과

가구원수의 감소로 인한 장래 토지이용수요의 변화를 살펴보기 위한 모의실험 결과는 Fig. 11과 같다. 기본 모형에서는 주거용지 수요가 2020년 30.52km², 2030년 32.28km², 2040년 33.24km², 2050년 32.85km²인데 비해서, 정책실험 1에서는 주거용지 수요가 2020년 35.13km², 2030년 38.52km², 2040년 39.19km², 2050년 37.68km²로 예측되었다(Fig. 10). 시뮬레이션 결과

에 의하면, 주거용지 수요면적이 기본 모형에 비해 최대 6.2km² 증가하는 것으로 나타났다. 성남시 2022년 실제 주거지역 면적은 31.20km²이기 때문에, 주거용지 수요가 정점에 이르는 2040년을 기준으로 주거용지는 약 7.99km²의 추가 공급이 필요할 것으로 예상된다.

성남시 홈페이지의 일반현황을 보면, 2022년 기준으로 성남시 계획면적은 141.82km²이며 세부적으로 주거지역 31.20km², 상업지역 5.24km², 공업지역 1.74km², 녹지지역 103.54km², 미지정 0.10km²로 구성되어 있다. 현재 성남시의 개발제한구역은 약 47.67km²이므로, 계획면적과 개발제한구역을 합산한 전체 면적은 189.49km² 정도가 된다. Fig. 11의 토지이용수요의 전체 합산 면적을 보면 2030년 195.11km², 2040년 192.87km², 2046년 189.33km², 2050년 186.13km²로 2045년까지 수요면적이 성남시 전체 면적인 189.49km²를 초과하므로 수요를 충족하기 위해서는 개발제한구역의 해제 및 용도변경 등의 대책이 필요할 것으로 보인다.

다음으로 용도별·입지별 토지이용의 집약도를 의미하는 토지이용밀도가 증가할 경우의 토지이용수요 변화를 정책 실험하였다. 정책실험 2에서는 주거용적율에서 아파트 용적

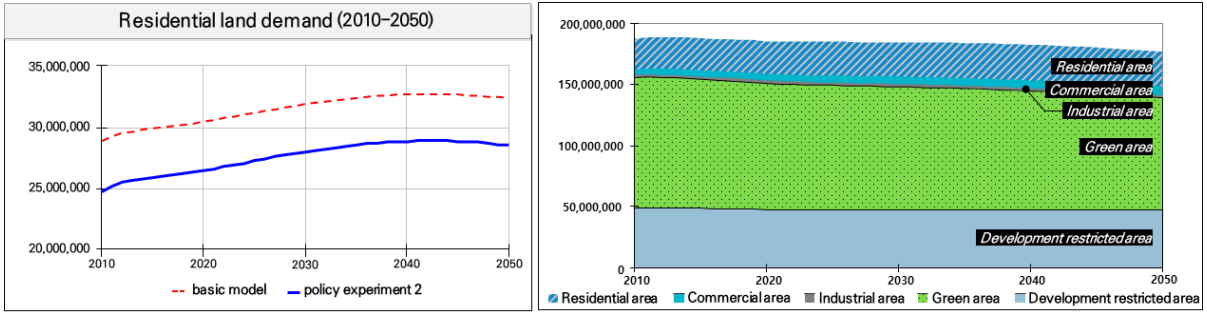


Fig. 11. Results of policy experiment 2

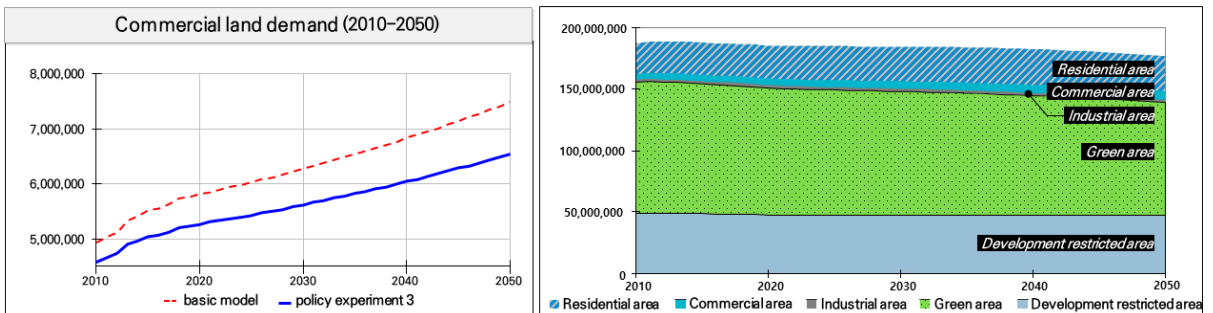


Fig. 12. Results of policy experiment 3

율을 200%에서 300%로 증가시킬 경우의 토지이용수요의 변화를 살펴보았다. 기본 모형에 비해서 주거용지 수요가 최대 4.4km² 정도 감소하는 것으로 결과값이 도출되었다. 시뮬레이션 결과에 의하면, 주거용지를 상향정책 시행시 주거용지 수요는 2030년 28,015,719m², 2040년 28,849,363m², 2050년 28,510,425m²가 될 것으로 예상된다(Fig. 11). 2022년 기준 성남시 실제 주거지역 면적은 31.20km²이다. 이 면적을 기준으로 기본모형은 2024년부터 주거용지 수요가 공급면적을 초과하는데 비해서 정책실험 2에서는 현재 성남시 주거지역 공급면적으로 주거용지 수요가 충족되는 것으로 나타났다.

마지막으로 상업지역 평균층수 4층, 상업지역 건폐율 80%에서 상업지역 평균층수 5층, 상업지역 건폐율 85%로 변경하였을 경우의 토지이용수요의 변화를 정책실험하였다. 분석결과에 의하면, 평균층수 및 건폐율 상향으로 상업용지 수요는 기본모형에 비해 최대 1km² 정도 감소하였다(Fig. 12). 상업용지 수요는 2030년 5.63km², 2040년 6.05km², 2050년 6.55km²로 점차 증가하는 것으로 나타났다.

2022년을 기준으로 실제 성남시 상업지역 면적은 5.24km²이므로, 상업용지 수요에 대한 시뮬레이션 결과값에 비해 상업지역 공급면적이 부족한 실정이다. 그러므로 상업지역의 평균

층수를 5층으로 설정하고 건폐율을 5%p 상향하더라도 상업용지의 추가 공급이 필요할 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구는 성남시를 대상으로 2050년까지 시간의 흐름에 따른 인구 변화와 용도별 토지이용수요를 예측하는 시스템 다이내믹스 모형을 구축하고, 가족구조의 변화와 토지이용밀도 조정정책의 효과를 모의실험하는 데 연구의 목적이 있다. 이를 위하여 인과지도를 구축하고 변수를 수준변수, 변화율변수, 보조변수 등으로 변환하여 Stock/flow 다이어그램을 작성하고 통계치와 수식을 입력하여 시뮬레이션 모형을 구축하였다.

분석결과 성남시 인구는 2012년부터 계속해서 감소하여 2035년 93만명, 2050년에는 86만명까지 감소하는 것으로 예측되었다. 주거용지 수요는 2040년에 정점을 이루고 그 이후에는 안정·정체기에 접어드는 것으로 수요예측 결과가 나타났다. 상업용지 수요는 지속적으로 증가하여 2050년에는 7.55km²가 되는데 비해 공업용지 수요는 계속 감소하여 2050년에는 1.31km²로 예측되었다. 따라서 공업용지를 제외한 주거용지

나 상업용지는 현재 공급면적에서 추가 공급이 필요할 것으로 예상된다.

정책실험 결과는 다음과 같다. 첫째, 1인가구의 증가 등으로 인해 가구원수가 급격히 감소할 경우에 주거용지 수요가 최대 7.99km² 증가하여 성남시 계획면적을 초과하게 되므로 수요 충족을 위해 개발제한구역 해제 등이 이루어져야 한다. 둘째, 아파트 용적율을 200%에서 300%로 상향조정하면 주거용지 수요가 2040년 28.85km², 2050년 28.51km²로 예상되어 현재 성남시 주거지역 면적으로 주거용지 수요 충족이 가능하다. 셋째, 상업지역 평균층수를 4층에서 5층으로 설정하고 상업지역 건폐율을 80%에서 85%로 변경하면 상업용지 수요는 2040년 6.05km², 2050년 6.55km²로 예상되어 상업용지의 추가 공급이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구모형과 시뮬레이션 결과는 도시인구 추정 및 토지이용수요 예측에 활용될 수 있고, 토지이용밀도 조정정책이 실제로 어느 정도 효과가 있는지를 시계열적으로 분석하는데 유용하다. 그러나 주택수요와 주거용지 수요가 인구나 가구수에 의해 결정되기도 하지만 주택가격, 학군, 교통여건 등에 의해서도 영향을 받는데 본 연구모형에는 이러한 변수가 반영되어 있지 않아서 분석에 한계가 있다. 향후 소득수준, 주택가격과 같은 경제적 요인과 교육여건, 교통의 편리성, 치안과 같은 주거환경요인 등을 분석모형에 반영할 수 있도록 토지이용수요를 예측하는 모형 및 방법론에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년 한국연구재단의 이공분야 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2021R1F1A1046719)

References

- An, C.H. (2009), *A Study about Impact of the Urban Dynamics on Land Use Change Using System Dynamics*, Ph.D. dissertation, Kyungwon University, Seongnam, Korea, 136p.
- Cho, Y.S., Song, W.H., and Lee, J.P. (2019), Development of land demand prediction model depending on changes in social and economic system structure, *Korean System Dynamics Review*, Vol. 20, No. 2, pp. 41-67. (in Korean with English abstract) <https://doi.org/10.32588/ksds.20.2.3>
- Kim, D.H. (2004), *Systems Thinking*, Sunhaksa Co., Seoul, Korea.
- Korea Planning Association (2015), *Land Use Planning*, Bosunggak, Seoul, Korea.
- Lee, H.Y. (2009), Methods for estimating land need and its empirical analysis for urban growth management, *Journal of the Korean Urban Geographical Society*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-30. (in Korean with English abstract)
- Lewis, C.D. (1982), *Industrial and Business Forecasting Methods*, Butterworth Scientific, Boston, M.A.
- Lim, J.Y. and Lee, Y.W. (2016), *Improvement of Land Use Demand Prediction in Low Population Growth Period*, KRIHS Publication No. 979-11-5898-162-4, KRIHS, Anyang, Korea, pp. 1-108.
- Moon, T.H. (2002), Issues and methodological status of system dynamics, *Korean System Dynamics Review*, Vol. 3, No. 1, pp. 61-77. (in Korean with English abstract)
- Moon, T.H. (2007), *Sustainable City from a System Thinking*, Jipmoondang Co., Seoul, Korea.
- Seongnam-city (2020), *Seongnam City Master Plan in 2035*, Seongnam Urban Planning Division, Seongnam, Korea, pp. 1-498.
- Yi, M.S., Yeo, K.H., and Kim, C.H. (2020), The effect analysis of smart city planning on urban dynamics using system dynamics method, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 38, No. 1, pp. 57-67. (in Korean with English abstract) <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.1.57>