

시스템 다이내믹스를 이용한 스마트도시계획이 도시동태성에 미치는 영향 분석 – 안양시를 중심으로

The Effect Analysis of Smart City Planning on Urban Dynamics Using System Dynamics Method - Focused on Anyang-city, Korea

이미숙¹⁾ · 여관현²⁾ · 김창훈³⁾

Yi, Mi Sook · Yeo, Kwan Hyun · Kim, Chang Hoon

Abstract

Recently, smart cities are attracting attention as a solution for a plethora of urban problems, including transportation, environment, safety, and energy. However, despite a substantial body of research dealt with the concept, trends, policy, and legal institutions of smart cities, few researchers have examined how the smart city services influence the cities from the dynamic perspective that considers the entire cycle of a city, including its growth, stagnation, and decline. Thus, it is vital to understand how the city changes with time from the view that a city is a system of sub-elements—population, industry, transportation, environment, housing, and land—closely interacting together. Within this context, this study explores how the urban dynamics of Anyang-city develop for the long term using the System Dynamics method and analyzes the effect of smart city project investment on the dynamics of Anyang-city. According to the result, Anyang-city is a “mature and stable” type, and its population is expected to decrease slowly by 2040. Specifically, the Anyang-city population will be reduced to 553,000 by 2030. It was analyzed that the number will decrease to 543,000 by 2040. It was also found that the investment in smart city projects in Anyang, based on the Plan for Anyang Smart City, would have the following effects: easing population decline, increasing number of businesses, improving urban safety index, and increasing average driving speed. The population will grow by 4,000 and the number of businesses will increase by 761 than before budget investment. The result of this paper is expected to contribute to identifying and predicting the effect of smart city policies from a long-term perspective.

Keywords : Smart City, System Dynamics, Urban Dynamics, Policy Effects

초 록

최근 스마트도시는 교통, 환경, 안전, 에너지 등 다양한 도시문제를 해결하기 위한 대안으로 주목받고 있다. 그러나 스마트도시의 개념, 동향, 정책 및 법제도에 관한 연구는 활발히 이루어지는데 비해서, 도시의 성장·정체·쇠퇴 과정 등 전 단계를 고려한 동태적 관점에서 스마트도시 서비스가 실제로 도시에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 도시를 인구, 산업, 교통, 환경, 주택, 토지 등의 하위 구성요소들이 상호간에 밀접하게 상호작용 하는 하나의 전체 시스템으로 보는 시각을 바탕으로, 도시가 시간의 흐름에 따라 어떻게 변화하는지 파악할 필요가 있다. 이에 본 연구는 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 안양시의 도시동태성이 장기적으로 어떠한 행태로 나타나는지 규명하고, 안양시의 스마트도시계획 등 관련 사업예산 투자가 도시동태성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 분석결과, 안양시는 성숙·안정형 도시에 해당되며 2040년까지 인구가 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 구체적으로 안양시 인구는 2030까지 55만3천명 수준으로 감소하고 2040년까지 54만3천명 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 안양시 스마트도시계획(안)에 따라 스마트도시 사업예산을 투입하면 투자하지 않을 경우에 비해서 인구감소 완화, 사업체수 증가, 도시안전지수 개선, 평균 주행속도 개선 등의 효과가 있는 것으로 나타났다. 인구는 2040년 기준으로 예산 투입 이전보다 4000명 정도 증가하고 사업체수는 761개 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과는 장기적인 관점에서 스마트도시 관련 정책의 효과를 파악하고 예측하는데 활용될 수 있다.

핵심어 : 스마트도시, 시스템 다이내믹스, 도시동태성, 정책효과

Received 2020. 02. 21, Revised 2020. 02. 24, Accepted 2020. 02. 27

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

2) Corresponding Author, Dept. of Public Administration, Professor, Anyang University (E-mail: motelkh@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

최근 안양시는 향후 10년간의 안양시 스마트도시 기본계획을 수립하고 33개의 스마트도시 서비스 구축 로드맵을 제시하였다. 계획 내용을 보면, 4차 산업혁명의 신기술을 활용해 교통, 관광, 환경, 복지 등의 분야에 인공지능과 빅데이터, IoT, VR과 드론 등이 적용될 예정이다⁴⁾. 안양시는 시민이 체감할 수 있는 스마트도시 서비스를 통해 활력 증진 균형도시, 시민 행복 포용도시, 도시통합 성장도시 구현을 목표로 하고 있다.

스마트도시는 교통, 환경, 에너지 등 다양한 도시문제를 해결하기 위한 대안으로 국내외에서 각광 받고 있다. 스마트도시 서비스는 교통정체를 해소하고 범죄를 예방하며, 환경오염을 최소화함으로써 도시를 사람들이 생활하기에 더 쾌적하고 안전하며 친환경적으로 만들 수 있다(Lee and Kim, 2019). 그러나 이러한 스마트도시 서비스가 실제로 도시의 성장과 쇠퇴를 포함한 도시동태성(urban dynamics)에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 기존에는 스마트도시의 효과를 도시의 성장단계, 정체단계, 쇠퇴단계 등 전 단계를 고려한 도시의 생애주기 관점에서 고찰하기 보다는 스마트도시의 개념, 정책 및 법제도에 대한 연구가 주를 이루었다.

도시는 다양한 구성요소들이 상호작용하는 복합적인 시스템에 해당된다. 따라서 도시를 인구, 경제, 주택, 토지, 교통 등의 하위구조가 상호간에 밀접한 상호작용을 하는 하나의 전체 시스템으로 보는 시각과 이에 입각한 정책 효과 실험이 필요하다. 도시의 인구, 경제, 주택, 토지, 교통, 환경문제들이 시간의 흐름에 따라 어떻게 변화하고 있으며 어떤 인과관계 속에서 역동적으로 변해 나가고 있는지 파악하여야 한다(Moon, 2007).

이에 본 연구에서는 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 안양시를 대상으로 도시 시스템의 하위 구성요소와 이들간의 인과관계를 파악하고, 도시의 인과순환적 피드백루프에 의해서 도시동태성이 장기적으로 어떠한 행태로 나타나는가를 규명하고자 한다. 또한 본 연구에서 규명한 인과순환적 피드백구조를 시뮬레이션 모형으로 구축하고 정책 모의실험을 수행하여 안양시의 스마트도시계획 등 관련 사업예산 투자가 안양시의 도시동태성에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하는데 연구 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 시스템 다이내믹스

시스템 다이내믹스는 1950년대 말 MIT의 포리스트(Jay Forrester) 교수가 개발한 학문이며, 시스템의 구조를 모델화하여 이를 컴퓨터에서 시뮬레이션함으로써 정책효과를 분석하는 방법론이다(Kim, 2004; Yi, 2018). 컴퓨터 시뮬레이션의 연구방법이 보편화되면서 시스템 다이내믹스는 현재 산업체의 경영전략, 수요예측, 에너지 및 환경문제, 의사결정 도구 등 모든 산업분야에서 폭넓게 응용되고 있다(Kim *et al.*, 1999; Oh and Byun, 2016).

시스템 다이내믹스는 동태적이고 순환적인 인과관계를 바탕으로 현상을 이해하고 설명하거나 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모형을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변화하는지를 컴퓨터상에서 실험해보는 방법론이자 현상을 바라보는 시각이며 증거틀이라고 할 수 있다(Moon, 2002a). 즉, 시스템 다이내믹스는 사회시스템을 포함한 모든 시스템의 역동적인 변화 메커니즘을 비선형적인 피드백 시스템으로 파악하고 이를 컴퓨터 시뮬레이션함으로써 시스템의 역동성을 분석하고자 하는 방법이다(Choi, 2003).

이러한 시스템 다이내믹스를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션은 다음의 몇 단계로 이루어진다(Richardson, 1981; Moon, 2002a). 우선 분석의 목적에 합당한 모델 작성을 위해 그 목적에 맞게 문제를 인식하고 정의한다. 두번째 단계에서는 문제를 피드백 시각(feedback perspective)에서 개념화 시킨다. 이 단계에서는 특정 문제를 야기시키는 여러 원인들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 피드백 시각에서 나타내는 인과지도(causal loop diagram)의 작성이 중요한 과제가 된다. 셋째, 이러한 개념화를 바탕으로 실제로 정책분석에 이용될 컴퓨터 모델을 작성한다. 넷째, 작성된 모델에서 보여지는 주요변수들의 행태를 중심으로 모델의 타당성을 평가한다. 모델의 타당성이 입증되면 마지막으로 이 모델을 이용하여 정책대안에 대한 분석을 행하게 된다. 특히 정책대안의 분석단계에서는 구축된 모델을 바탕으로 각종 정책대안을 모의실험하면서 최적의 대안을 찾아내는데 주력한다(Moon, 2002a). 이러한 여섯 단계의 연구과정은 한방향으로 전개되는 것이 아니라 시스템을 분석하다보면 이전 단계로 돌아가 이전의 틀을 바꾸어야 하는 경우도 빈번하게 발생하므로 각 단계는 상호보완적인 단계로 수행되고 진행되어야 한다(Park, 2008).

4) <http://www.anyang.go.kr> (last date accessed: 4 February 2020)

2.2 스마트도시계획

「스마트도시 조성 및 산업진흥 등에 관한 법률(이하 스마트도시법)」의 정의에 의하면, 스마트도시는 도시의 경쟁력과 삶의 질의 향상을 위하여 건설·정보통신기술 등을 융·복합하여 건설된 도시기반시설을 바탕으로 다양한 도시서비스를 제공하는 지속가능한 도시를 말한다. 또한, 스마트도시서비스는 스마트도시기반시설 등을 통하여 행정·교통·복지·환경·방재 등 도시의 주요 기능별 정보를 수집한 후 그 정보 또는 이를 서로 연계하여 제공하는 서비스로 정의하고 있다.

스마트도시계획은 스마트도시법 제8조에 의해 수립하는 법정계획이며, 스마트도시건설사업의 근간이 되는 계획으로서 스마트도시의 건설을 위하여 반드시 수립하여야 하는 계획이다. 스마트도시계획에서는 특별시·광역시·시·군의 스마트도시건설을 위한 기본방향과 추진전략, 스마트도시기반시설 및 스마트도시서비스 구축과 운영방안 등을 제시하게 된다. 특히, 스마트도시계획은 도시가 가지고 있는 문제점들을 첨단 정보통신기술과 도시적 관점의 문제 해결방법을 통하여 극복하고, 정보통신기술과 도시공간의 융·복합을 통하여 스마트 도시로 발전을 모색한다 점에서 지자체의 스마트도시 사업 추진시 스마트도시계획의 역할이 매우 크다고 할 수 있다 (Kim and Yi, 2018).

2.3 도시동태모형

도시성장은 인구, 자연환경, 기술발전, 사회조직의 확대 등 상호연관된 요소들간의 상호작용의 결과이다(Moon, 2002b). 도시동태모형은 도시를 산업, 주택, 인구, 토지 등의 하위시스템으로 구분하고 이들 시스템간의 동태적인 역학관계에 의해 도시의 성장과 전이, 쇠퇴를 분석하는 시스템 다이내믹스 접근 방법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 모델이다(Alfeld and Graham, 1976; Kim *et al.*, 1999; Moon, 2002b).

Forrester는 도시는 인구, 고용, 주택, 토지이용, 산업 등 다양한 부문으로 구성된 하나의 체제이며, 도시의 외형적 현상은 이들 구성부문간의 상호작용에 의해 나타나는 결과로서 시간의 흐름에 따라 동태적으로 변화하는 것이라고 보았다(Choi, 2003).

Alfeld and Graham(1976)은 Forrester의 도시동태모델을 발전시켜 도시의 매력도(attractiveness)라는 개념을 핵심적인 개념으로 사용하면서 도시의 성장과 쇠퇴과정을 전체 도시시스템의 관점에서 고찰하였다(Kim *et al.*, 1999), 여기에서 매력도는 고소득층, 중간소득층, 저소득층의 인구들을 주변 지역으로부터 끌어들이고 유입된 계층별 인구를 지탱할 수 있는 사회·경제적인 힘을 말한다. 즉, 도시의 내부구조가 어떻게

도시문제를 일으키는지를 규명하는데 있어 인구, 산업, 주택, 토지이용 등과 같은 변수 외에도 주변지역에서 유입된 고·중·저소득 계층별 인구를 지탱할 수 있는 사회·경제적 매력도를 도시동태성의 핵심요인으로 보았다(Choi, 2003).

Alfeld and Graham은 시스템 다이내믹스를 이용하여 도시동태모형인 Urban 1 Model과 Urban 2 Model을 개발하였다(Moon, 2007). Urban 1 Model은 인구, 산업, 주택이 결합된 도시모형이며, Urban 2 Model은 산업구조의 노후화에 따른 산업구성의 변화, 주택의 노후화에 따른 주택사용 계층의 변화 등을 변수로 추가한 도시모형이다(Park, 2010).

2.4 선행연구

미국의 도시들에서 나타나는 급속한 인구성장과 쇠퇴의 패턴을 매우 다양한 변수들 간의 상호작용 구조를 통해 설명하려는 Forrester(1969)의 연구가 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 도시동태성을 규명하고자 한 최초의 연구이다(Choi, 2003). Alfeld and Graham(1976)은 Forrester의 도시동태모형을 발전시켜 인구, 주택, 산업 이외에 사회·경제적 요인을 추가하여 도시동태모형을 제시하였다. Bertuglia *et al.*(1987)는 사회경제적이고 공간적인 메커니즘을 통하여 서로 상호 작용하는 주택시장, 노동시장, 서비스부분, 토지시장, 교통이라는 다섯 가지의 하부시스템간의 상호작용이 도시동태성을 결정한다고 보았다(Choi, 2003; Park, 2010). 이 외에도 토지이용의 규제에 따른 비공식부문의 동태성을 모형화한 Sancar and Onaran(1997)의 연구, 지속가능한 성장과 환경용량이라는 개념을 도시동태성 모형에 최초로 도입한 Saeed(1998)의 연구 등이 있다.

국내에서는 Alfeld and Graham(1976)이 제시한 Urban 1 Model을 기본으로 다른 변수를 추가하여 모형을 확장하는 연구가 다수 수행되었다(Park, 2010). Urban 1 Model을 활용하여 도시성장관리를 위한 여러 정책수단을 모의실험한 Moon(2002b)의 연구, 기존의 도시동태모형에 도로, 상수도, 하수도 등 기반시설 부문을 추가하여 도시성장관리를 위한 개발밀도관리방안을 제시한 Jeon(2003)의 연구, 서울시 도시동태성의 비선형적 패턴을 분석하고 정책실험을 하기 위해 경제, 교통, 환경 등 하위 시스템간의 상호작용 모형을 구축한 Choi(2003)의 연구가 대표적이다. 본 연구는 기존 Urban 1 Model에 교통, 환경, 안전부문을 추가하여 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 도시동태모형을 구축하고 안양시 스마트도시계획이라는 정책을 모의실험한다는 점에서 기존 연구와의 차별성이 있다.

한편, 스마트도시계획이나 정책에 대한 연구도 활발히 이

루어지고 있다. 스마트도시 구축 관련 정책방향을 분석하고 법제도 현황과 개선방안을 분석한 Lee and Kim(2019)의 연구, 지자체의 스마트도시계획이 국가 차원의 마스터플랜인 스마트도시종합계획과 실제로 연결성이 높은지를 네트워크 분석을 활용하여 파악한 Kim and Yi(2018)의 연구, 국내외 스마트도시 정책의 등장 배경 및 전환과정에 대해 검토 후 지자체의 대응전략을 분석한 Lee and Han(2019)의 연구 등이 최근에 진행되었다. 본 연구는 스마트도시계획과 정책의 파급효과를 분석하기 위하여 시스템 다이내믹스 방법론을 활용하여 정책효과를 시뮬레이션하였다는 점에서 기존 연구와 차별점이 있다.

3. 안양시 도시동태성 분석

3.1 주요 변수의 설정 및 인과지도 작성

본 연구에서는 안양시의 도시동태성을 분석하기 위하여 도시의 하위 구성요소를 인구(population sector), 안전부문(safety sector), 산업부문(industry sector), 주택부문(housing sector), 토지부문(land sector), 환경부문(environment sector), 교통부문(traffic sector)으로 구분하여 주요변수를 도출하였다(Fig. 1).

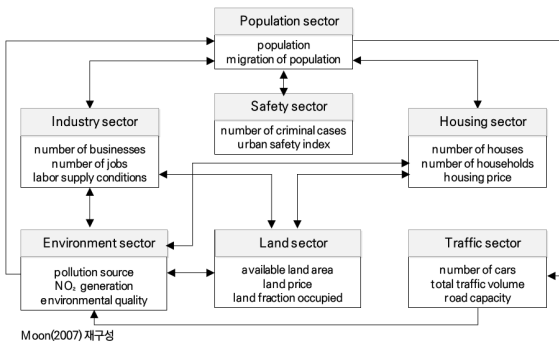


Fig. 1. Sub-elements of urban dynamics model

인구 부문의 주요 변수는 인구, 출생, 사망, 전입, 전출, 가구수 등이며, Choi(2003), Moon(2007), An(2009), Oh and Byeon(2016)의 연구를 참고하여 변수를 도출하고 변수간의 인과관계를 설정하였다. 안전 부문은 범죄발생 건수, 도시안전지수 등의 변수로 구성되며, 행정안전부에서 매년 발표하는 정책자료인 「전국 지역 안전지수」를 기반으로 작성하였다.

산업 부문은 Alfeld and Graham(1976), Jeon(2003), An(2009)의 연구를 반영하여 노동력, 사업체수, 일자리수, 노동력 공급 여건 등을 주요 변수로 선정하고 변수간의 인과관계를 도출하였다.

주택 부문은 Alfeld and Graham(1976)이 제시한 Urban 1 Model을 반영하여 변수명과 인과지도를 작성하였다. 주택 부문은 주택수, 가구수, 주택가격, 주택수요, 주거 매력도⁵⁾ 등이 주요 변수를 이룬다.

토지 부문은 토지수요, 토지가격 등의 변수로 구성되어 있으며, 변수들간의 관계는 Moon(2002b), Jeon(2003), An(2009) 등의 연구를 참고하였다. 환경 부문은 Moon(2007)의 연구를 바탕으로 이동오염원, 고정오염원, 이산화질소 발생량, 환경질 등의 주요 변수를 도출하고 인과지도에 반영하였다. 교통 부문은 Choi(2003)와 An(2009)의 연구를 참고하여 총통행량, 도로용량, 평균주행속도, SOC 투자 등의 변수를 도출하고 인과관계를 설정하였다.

이러한 부문별 주요 변수와 인과관계를 모두 합치면 전체 인과지도를 도출할 수 있다. 도시는 인구, 안전, 산업, 주택, 토지, 환경, 교통 등 하위 구성요소간의 순환적인 인과관계의 상호작용으로 구성된 동태적인 시스템이기 때문에 본 연구에서는 이러한 하위 구성요소들을 종합하여 Fig. 2와 같이 전체 인과지도를 도출하였다.

인구 부문은 Fig. 2에서 피드백루프 B1, B2, R1, R2에 해당된다. 출생이나 전입이 증가하면 인구가 증가하고, 사망이나 전출이 증가하면 인구가 감소하게 된다. 안전 부문의 피드백루프는 B3과 같이 인구가 증가하면 범죄발생이 증가하고 도시안전지수가 악화되며 도시의 매력도가 하락하고 전입이 감소하여 인구가 감소하는 균형루프를 이루고 있다(Fig. 2).

산업부문의 인과순환적 피드백루프는 Fig. 2의 B4, B5, B6에 해당된다. 인구가 증가하여 노동력이 증가하면 노동력 대비 일자리의 수는 줄어들고 일자리를 구하기 어려워지면 결과적으로 도시 매력도도 감소하여 전입 인구가 감소하게 된다. 사업체 수가 증가하여 일자리가 많아지면 노동력 대비 일자리의 수가 증가하여 노동력의 공급이 원활하지 않게 되고 신규 사업체 설립이 감소하여 사업체수는 결과적으로 감소한다.

주택 부문의 피드백 루프는 Fig. 2의 B7, B8, B9, B10, B11, B12가 해당된다. B7은 가구수 대비 주택수가 증가하여 주거매력도가 증가하면 도시매력도가 향상되어 전입이 늘어나고 인구가 증가하게 된다. 이로 인해 결국 가구수가 증가

5) Alfeld and Graham(1976)은 주거 매력도(attractiveness of housing)를 가구수 대비 주택수 비율이 도시로의 전입에 영향을 미치는 정도로 정의하였으며, 이를 주거매력승수(attractiveness of housing multiplier)로 표현하고 변수값을 테이블함수로 제시하였다(Kim et al., 1999; Moon, 2007).

하고 가구수 대비 주택수가 부족하여 주거 매력도가 감소하게 되는 피드백 구조이다. B8은 가구수 대비 주택수가 부족하면 주택가격이 상승하여 진출이 늘어나 인구가 감소하고 가구수가 줄어들어 가구수 대비 주택수가 균형을 이루는 구조이다.

B9는 가구수 대비 주택수가 부족하면 주택의 수요가 증가하고 주택건설이 증가하여 주택수가 늘어나 가구수 대비 주택수가 증가하게 된다. B10은 주택수가 부족하면 용적률 정책을 통해 주택을 건설할 수 있는 면적이 늘어나고 주택을 추가로 건설하여 결과적으로 주택수가 늘어난다. B11은 주택노후화로 인해 주택수가 자연적으로 감소되는 피드백 구조이다.

토지 부문의 피드백 루프는 B13이 해당된다. 인구, 기업체 수나 주택 건설 증가로 토지수요가 증가하면 토지가격이 상승하고 토지가격이 지나치게 높으면 토지수요는 감소한다. B14는 환경부문의 인과순환적 피드백 루프이며, 자동차수가 증가하거나 기업체나 주택의 수가 증가하면 오염물질인 이산화질소 발생량이 증가하고 환경의 질이 나빠져 도시 매력도가 하락하여 전입이 감소하고 인구가 줄어서 자동차수도 감소하고 오염물질 발생량이 줄어드는 구조이다.

교통부문의 피드백 루프는 B15, B16이다. B15는 자동차수가 증가하고 타지역에서 안양시로 유입되는 통행량이 증가하면 도로용량에 비해 통행량이 증가하여 교통흐름이 원활하지 않고 평균 주행속도는 하락하게 되어 결국 총통행량은 감소한다. B16은 평균주행속도가 현저히 낮고 교통정체가 심각하면 도로를 건설하는 등 SOC (Social Overhead Capital)에 투자하여 도로용량이 증가하게 된다. 도로용량이 증가하는데 비해 통행량이 일정하게 유지되면 평균 주행속도는 향상되고 도로건설 등 SOC에 대한 투자는 줄어든다.

3.2 안양시 도시동태성 분석을 위한 시뮬레이션 모형

3.2.1 안양시 도시동태모형 구축

인과지도도를 토대로 Fig. 3과 같이 안양시 도시동태성의 변화 행태를 분석하기 위한 시뮬레이션 모델인 Stock/Flow 다이어그램을 작성하였다. 이를 위해 본 연구에서는 인구모형, 산업모형, 주택모형, 환경모형, 교통모형으로 구분하여 전체 모형을 구축하였다. 인구모형에 도시의 하위 구성요소인 인구 부문과 안전 부문을 포함하였으며, 주택모형에 주택 부문과 토지 부문의 인과지도도를 반영하였다. Fig. 2에서 제시한 인과지도도의 주요 변수를 수준변수, 변화율변수, 보조변수, 테이블 함수로 구분하여 시뮬레이션 모형으로 제작하면 Fig. 3과 같은 다이어그램을 도출할 수 있다. 안양시 도시동태모형은 시스템 다이내믹스 분석툴인 Powersim studio 10을 이용하여 구축하였다. 변수값은 경기데이터드림, 통계청, 국토교통부, 안양시 2030 도시기본계획의 통계 및 현황자료 등을 참고하여 입력하였다. 안양시 도시동태성 시뮬레이션 모델인 Fig. 3의 수식과 입력값은 Tables 1 and 2에 제시하였다.

본 연구에서는 2010년을 시뮬레이션 시작년도로 설정하고 2040년까지 시간의 흐름에 따른 변수들의 변화와 시스템의 행태를 파악하고자 하였다. 따라서 변수의 초기값은 2010년을 기준으로 입력한 후 30년간의 변화 패턴을 분석하였다. 2010년을 시뮬레이션 시작시점으로 선정한 이유는 시뮬레이션 결과값과 2010년부터 2018년까지의 실제 통계값을 비교하여 모형의 타당성을 검증하기 위해서이다. 또한 2020년 이후의 장기적인 패턴을 파악하기 위하여 종료시점을 2040년으로 설정하였다.

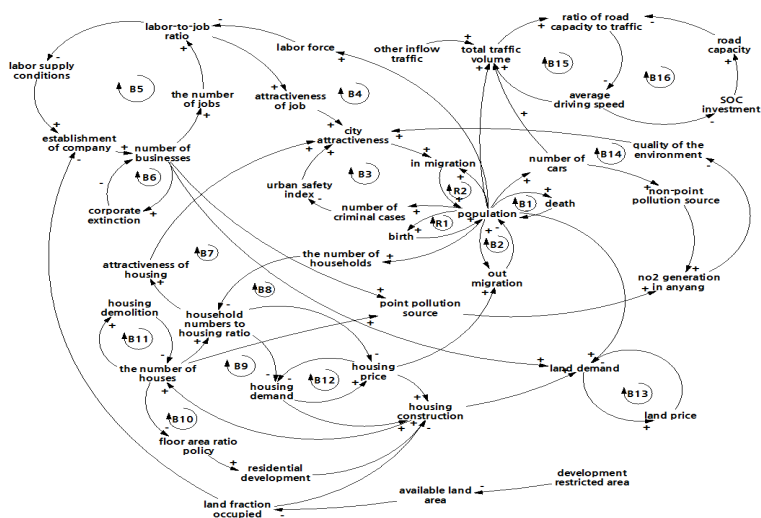


Fig. 2. Causal loop diagram of urban dynamics model

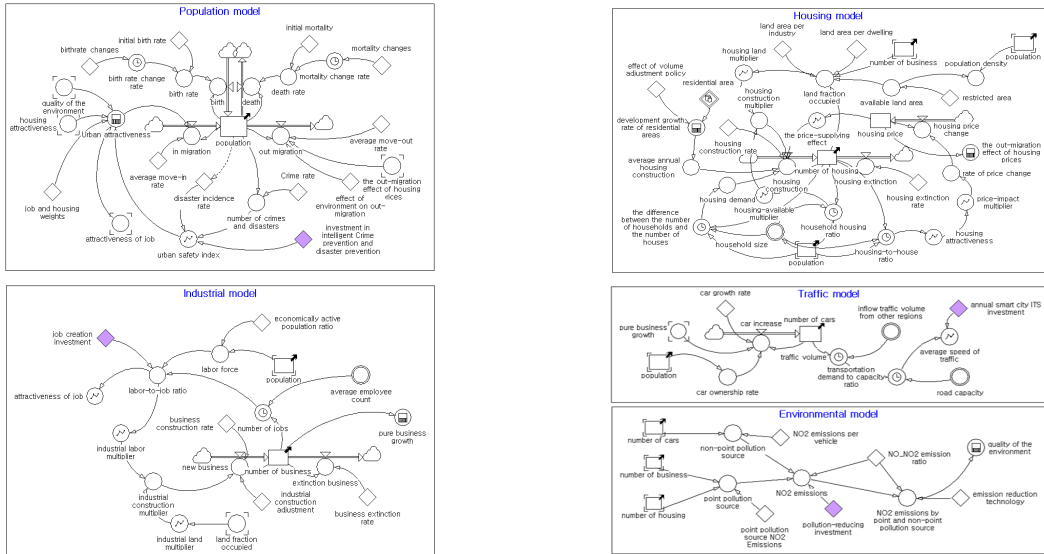


Fig. 3. Stock-flow diagrams of urban dynamics model

Table 1. The equations of population model and industrial model

Model name	Equations
Population model	$\text{birth} = \text{population} * \text{birth rate}$ $\text{birth rate} = 0.0120$ $\text{death} = \text{population} * \text{death rate}$ $\text{death rate} = 0.0035$ $\text{in migration} = (((0.5+1.5*\text{environmental quality})/2)*(\text{INIT}(\text{population})*\text{average move-in rate})*3 + \text{population}*(\text{urban attractiveness} - \text{DELAYPPL}(\text{urban attractiveness}, 1))/\text{urban attractiveness}*0.1))$ $\text{number of crimes and disasters} = \text{population} * \text{crime rate}$ $\text{out migration} = ((\text{population}) * (\text{average move-out rate} + \text{out migration effect of housing price} + \text{effect of Environment on Out migration})*1.53) * ((\text{TIME}-1000)/(2010-1000))$ $\text{population} = 617940$ $\text{urban attractiveness} = ((\text{workplace and housing weights} * (\text{job attractiveness} * \text{housing attractiveness}) / \text{INIT}(\text{job attractiveness} * \text{housing attractiveness})) + (1-\text{workplace and housing weights}) * (\text{environmental quality} + \text{INIT}(\text{urban safety index}) / \text{urban safety index}) / 2)$ $\text{urban safety index} = \text{GRAPHSTEP} ((\text{number of crimes and disasters} + \text{disaster incidence rate}*(300/1863)) / 2, 0, 50, \{1, 1, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 5\}) + (\text{investment in intelligent methods and disaster prevention})$
Industrial model	$\text{a new business} = (\text{number of business} * \text{business construction rate} + \text{number of business} * \text{industrial construction multiplier} * \text{industrial construction adjustment})$ $\text{extinction business} = \text{number of business} * \text{business extinction rate} * ((2010-1000)/(\text{TIME}-1000))$ $\text{growth rate of business land development} = \text{TREND}(\text{industrial area} + \text{commercial area}, 1) * 0.001$ $\text{industrial construction multiplier} = \text{industrial labor multiplier} * \text{industrial land multiplier}$ $\text{industrial labor multiplier} = \text{GRAPH} (\text{labor-to-job ratio}, 0, 0.2, \{0.2, 0.25, 0.35, 0.5, 0.7, 1, 1.35, 1.6, 1.8, 1.95, 2\})$ $\text{industrial land multiplier} = \text{GRAPH} (\text{land fraction occupied}, 0, 0.1, \{1, 1.15, 1.3, 1.4, 1.45, 1.4, 1.3, 0.9, 0.5, 0.25, 0\})$ $\text{job attractiveness} = \text{GRAPH} (\text{labor-to-job ratio}, 0, 0.2, \{2, 1.95, 1.8, 1.6, 1.35, 1, 0.5, 0.3, 0.2, 0.15, 0.1\})$ $\text{labor force} = \text{population} * \text{economically active population ratio}$ $\text{labor-to-job ratio} = \text{labor force} / (\text{number of jobs} * (\text{job creation investment}))$ $\text{number of jobs} = \text{number of business} * \text{average employee count}[\text{INDEX}(\text{INTEGER}(\text{NUMBER}(\text{TIME})))]$ $\text{pure business growth} = \text{TREND}(\text{number of business}, 1) + \text{IF}(\text{TIME} = \text{STARTTIME}, 0.1, 0)$

Table 2. The equations of housing model, environment model, and traffic model

Model name	Equations
Housing model	available land area = 88620000 - restricted area development growth rate of residential areas = TREND(residential area[INDEX(INTEGER(NUMBER (TIME)-2009)),1) +effect of volume adjustment policy household housing ratio = population / (number of housing * household size) housing attractiveness = GRAPH (housing-to-house ratio,0.5,0.05, {0.515,0.578,0.66, 0.748,0.808,0.865 ,0.91,0.94,0.968,0.992,1}) housing construction = ((housing demand* (average annual housing construction+the price-supplying effect)) +number of housing*housing construction rate*housing construction multiplier) housing construction multiplier = housing-available multiplier*housing land multiplier housing land multiplier = GRAPH(land fraction occupied, 0, 0.1, {0.4, 0.7, 1, 1.25, 1.45, 1.5, 1.5, 1.4, 1, 0.5,0}) housing price = 95.1 housing price change = housing price*(rate of price change*0.5) housing-available multiplier = GRAPH (household housing ratio, 0, 0.2, {0.1,0.2,0.35,0.5, 0.7,1,1.35,1.6, 1.8,1.95,2}) housing-to-house ratio = number of housing/(population/ (IF(TIME>2019, 2.568685005, household size))) land area per dwelling = 16750000 / 193258 land fraction occupied = (number of business * land area per industry + Number of housing * land area per dwelling) / available land area restricted area = 30160000 the out migration effect of housing prices = TREND(housing price, 1)*0.5
Environment model	environmental quality = START_TIME/TIME * INIT(NO2 emissions by point and non-point pollution source) /NO2 emissions by point and non-point pollution source NO_NO2 emission ratio = 0.456 NO2 emissions by point and non-point pollution source = NOX emissions * NO_NO2 emission ratio / emission reduction technology non-point pollution source =number of cars * NO2 emissions per vehicle NOX emissions = (point pollution source + non-point pollution source) / NO_NO2 emission ratio * (pollution-reducing investment) point pollution source NO2 emissions = 19.3542 point pollution source = (number of business+number of housing) * point pollution source NO2 emissions
Traffic model	average driving speed = GRAPH (transportation demand to capacity ratio ,1,0.15,{24.8,23,21.2,19.3, 17.6,16,14.6,13.8,13.4,13.2,13}) * (200+annual smart city ITC investment_billion won)/200 car growth rate = 1.05 car increase = (number of cars*pure business growth*(car growth rate)+number of cars*car ownership rate) number of cars = 194086 road capacity = {5482449, 5503615, 5578568, 5687944, 5752968, 5834524, 5864680, 5871066, 5863557, 5913022.078, 5962904.037, 6013206.798, 6063933.91, 6115088.954, 6166675.539, 6218697.306, 6271157.926, 6324061.102, 6377410.565, 6431210.083, 6485463.45, 6540174.496, 6595347.082, 6650985.1, 6707092.479, 6763673.176, 6820731.186, 6878270.533, 6936295.28, 6994809.521, 7053817.385} traffic volume = (number of cars * 2) + inflow traffic volume from other regions transportation demand to capacity ratio = traffic volume/road capacity

3.2.2 안양시 도시동태성 모형의 시물레이션 결과

안양시라는 전체 시스템을 구성하는 하위 시스템들의 장기적인 행태와 변화 패턴을 분석하기 위하여 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 Fig. 3과 같이 시물레이션 모형을 구축하였다. 본 모형의 시물레이션 결과는 스마트도시계획 관련 예산을 투입하지 않은 경우의 안양시의 장기적인 변화 행태를 나타낸다. Fig. 4는 2010년부터 2040년까지 안양시의 장기적인 도시동태성의 변화행태를 인구, 주택수, 사업체수, 자동차수 중심으로 살펴본 결과이다.

시물레이션 결과를 보면, 안양시의 인구는 2010년 617,940명에서 점차적으로 감소하여 2030년에는 553,260명으로 감소하고 2040년에는 54만명 수준으로 감소하는 패턴을 보이고 있다. 이러한 결과는 안양시가 도시 생애주기에서 성숙단계를 지나 안정단계에 해당한다는 의미로 해석할 수 있다. 실제로 「안양시 2030 도시기본계획(2017)」을 보면 안양시는 도시성장패턴에서 성숙-안정형으로 분류하고 있으며, 과거추세 연장법에 의한 인구추정 결과 2030년 인구는 59만명으로 추계되어 있다. 본 시물레이션 결과는 과거추세연장방식인 등차급수, 등비급수, 최소자승, 지수함수, 로지스틱곡선법에 의한 추정 결과보다 인구가 4만명 정도 더 감소할 것이라는 결과가 나왔지만 인구가 점차적으로 감소할 것이라는 변화행태를 예측하였다는데 의미가 있다.

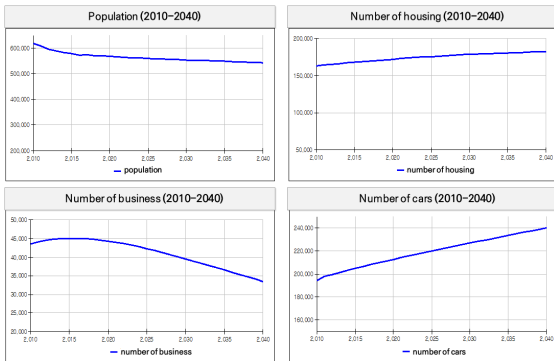


Fig. 4. Simulation results of Anyang-city model

안양시 주택수의 경우에는 안양시의 주택수요와 공급의 증가로 2010년 163,084호에서 2030년 17만8천호로 증가하고 2040년 18만2천호 수준까지 지속적으로 증가하는 패턴을 보이고 있다(Fig. 4). 안양시 사업체수는 2015년 이후로는 지속적으로 감소하는 행태를 보이며, 이는 인구감소로 인한 노동력 감소와 노동력 공급여건 악화로 신규 사업체 증가가 둔화되었기 때문으로 해석할 수 있다. 자동차수는 지속적으로 증

가하여 2040년까지 24만대 수준으로 증가할 것으로 예측되었으며, 이는 자동차보유율 증가로 인해서 나타난 결과로 판단된다.

3.2.3 타당성 검사

모형의 타당성 검사는 모형의 시물레이션 결과가 현실 시스템의 행태와 동일한 특성을 나타내는지 알아보기 위해 절대평균오차비율(MAPE: Mean Absolute Percentage Error)을 적용하였다(Lewis, 1982; Oh and Byun, 2016). MAPE 값을 구하기 위한 수식은 Eq. (1)과 같다.

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

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

Lewis(1982)의 해석기준에 의하면, MAPE가 10 미만이면 매우 정확한 예측, 10이상 20 미만이면 우수한 예측, 20이상 50미만이면 합리적 예측, 50 이상이면 부정확한 예측으로 본다. 본 연구에서는 2010년부터 2018년까지의 실제값과 시물레이션 결과값을 비교하여 MAPE를 도출하였다. 검증 결과, 인구규모의 오차율은 2.8%, 주택수의 오차율은 2.2%, 기업체수의 오차율은 0.8%, 자동차수의 오차율은 1.5%로 나타나 MAPE가 10 미만이므로 모형의 타당성이 높은 것으로 판단된다.

Fig. 5는 2010년부터 2018년까지 주요변수의 실제값과 시물레이션 결과값을 비교하여 제시한 그래프이다. 인구규모, 주택수, 기업체수, 자동차수 모두 실제 통계데이터와 유사한 결과가 나타나는 것을 알 수 있다.

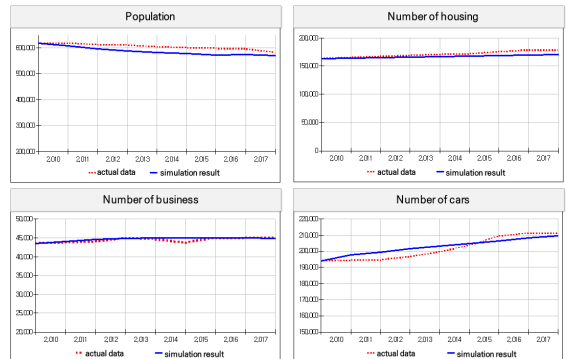


Fig. 5. Actual data and simulation results of key variables

4. 스마트도시계획을 반영한 도시동태성 분석결과

4.1 안양시 스마트도시계획의 정책실험 개요

안양시 스마트도시 기본계획(안)의 내용을 보면, 안양시는 2020년부터 2024년까지 5년간 총 비용 약 376억원을 투입하여 스마트도시 서비스를 추진할 예정이다. 계획내용에 포함된 33개 서비스 중 안양시 도시 동태성에 영향을 미치는 스마트도시 서비스 예산은 전체의 87%에 해당되는 약 328 억원이다.

본 연구에서는 산업 부문, 교통 부문, 안전 부문, 환경 부문으로 투입되는 예산을 구분하여 기본모형에 예산투입시 안양시 도시동태성에 어떠한 변화가 발생하는지 예산 투입의 효과를 분석하였다. 산업 부문의 스마트도시 서비스는 주로 일자리 정책으로 창의교육 프로그램, 청년 공유 오피스, 일자리 스튜디오, 생생 체험서비스 등이며 25억원이 투입될 예정이다. 교통 부문은 대중교통 지능형 안내 지원 서비스, 도로 신호 및 교통 정보제공서비스, 자율주행차 운행, 5G기반 도로상태 정보 관리 서비스 등으로 107억원 정도의 예산을 투입할 계획이다. 안전 부문의 예산 투입이 가장 높으며 스마트 가로등, 지능형 횡단보도, 지능형 무인 택배함, 여성안심 비상벨 알림 서비스, 위급상황 대응 서비스, 재난 재해 드론 출동 서비스 등에 188억원의 예산을 투입할 예정이다. 환경 부문은 미세먼지 모니터링 서비스에 8억원의 예산을 투입할 계획이다.

이러한 스마트도시 예산 투입 효과를 정책 실험하기 위하여 Fig. 3의 시뮬레이션 모형에서 일자리 창출 투자, 스마트시티 ITS (Intelligent Transport Systems) 투자, 지능형 방법·방재 투자, 오염저감 투자라는 네가지 변수값을 Table 3과 같이 입력하였다. 즉, 정책 시행 이후에는 일자리 창출 투자 연간 5 억원, 스마트시티 ITS 투자 연간 21억원, 지능형 방법·방재 투자 연간 38억원, 오염저감 투자 연간 2억원으로 입력값을 변경하여 예산 투입 이전과 비교·분석하였다.

4.2 안양시 스마트도시계획의 정책효과 분석결과

스마트시티 정책 관련 예산을 투입하기 이전의 안양시 도시동태성 모형의 분석결과와 Table 3과 같이 연간 예산을 투입할 경우의 분석결과를 비교하여 살펴보면, Figs. 6 and 7과 같이 예산 투입 이전과 이후의 시뮬레이션 결과가 다르게 나타난다.

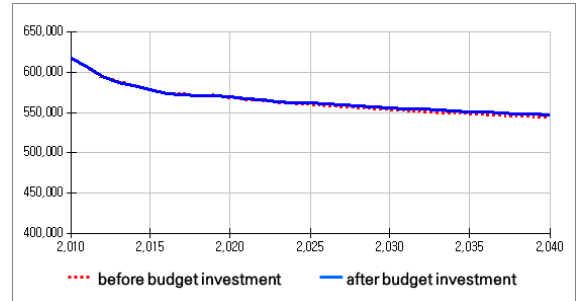


Fig. 6. The effect of smart city planning on population sector

Table 4. Population change in Anyang

Year	Before	After
2010	617,940	617,940
2015	577,740	578,539
2020	568,630	569,520
2025	559,718	561,558
2030	553,260	558,129
2035	548,193	551,469
2040	543,419	547,034

Table 3. Comparison before and after budget investment

Model	Variable	Before budget investment	After budget investment
Industrial model	job creation investment	-	500 million won/year
Traffic model	annual smart city ITS investment	-	2.1 billion won/year
Population model (safety sector)	investment in intelligent Crime prevention and disaster prevention	-	3.8 billion won/year
Environmental model	pollution-reducing investment	-	200 million won/year

인구 부문에서는 스마트도시계획에 따른 예산 투입시 인구 감소가 소폭 완화되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6). 정책 시행 이전에는 2030년 인구가 55만3천명 수준인데 반해서, 정책 시행 이후에는 55만8천명으로 5천명 정도 인구수에 차이가 있었다(Table 4). 2040년에도 약 4천명 정도 차이가 나타나는데 이는 스마트도시 예산투입으로 인해 도시동태성의 핵심 변수인 도시 매력도가 상승하여 안양시로의 전입이 일부 증가한 결과로 해석할 수 있다.

산업 부문에서는 예산 투입 이전에 비해서 사업체수 감소가 완화되는 효과가 있었다. 2030년 기준으로 기존 시뮬레이션 결과값 39,540개에서 예산 투입 후 결과값이 40,301개로 761개 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이는 스마트도시 서비스의 일환으로 일자리 창출 예산을 투입하여 일자리가 늘어나서 나타난 결과라고 할 수 있다.

안전 부문에서는 지능형 방법 및 방재에 예산을 투입하여 도시안전지수가 기존에 비해서 향상된 것으로 나타났다. 도시안전지수는 숫자가 작을수록 높은 등급이므로 스마트도시 서비스 예산을 투입하기 이전에 비해 등급이 소폭 상승하였음을 알 수 있다(Fig. 7).

행속도 향상 등의 효과가 나타나는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 안양시를 대상으로 도시 하위 구성요소인 인구, 산업, 안전, 환경, 도시, 교통, 주택 부문의 인과관계를 파악하고, 도시의 인과순환적 피드백루프에 의해서 도시동태성이 장기적으로 어떠한 행태로 나타나는가를 분석하였다. 또한 안양시 도시동태성 모형을 구축하고 정책실험을 수행하여 안양시의 스마트도시계획 등 관련 사업예산 투자가 안양시의 도시동태성에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하였다.

분석결과, 안양시는 성숙·안정형 도시에 해당되며 2040년까지 인구가 54만명 수준으로 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 기업체수는 2015년 이후 지속적으로 감소하고, 주택수는 2020년에 비해 2040년까지 1만호 정도 증가하는 것으로 예측되었다. 안양시 스마트도시계획(안)에 따라 스마트도시 사업예산을 투입하면 투자하지 않을 경우에 비해서 인구감소 완화, 사업체수 증가, 도시안전지수 개선, 평균 주행속도 향상 등의 효과가 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 향후 연구모형의 예산투입 금액을 추가하거나 감소시킴으로써 장기적인 관점에서 스마트도시 관련 정책의 효과를 파악하고 예측하는데 활용될 수 있다.

본 연구는 안양시의 도시동태성을 파악하기 위한 인과지도를 작성하고 이를 기반으로 시뮬레이션 모형을 구축하여 안양시의 스마트도시 정책효과를 분석하여 제시하였는데 연구의 의의가 있다. 그러나, 도시는 다양한 구성요소들이 상호 작용하는 매우 복잡한 시스템 구조를 갖고 있기 때문에 본 연구모형에 반영되지 않은 주요 변수들이 존재할 수 있다. 후속 연구에서는 여기에서 고려하지 못한 다양한 변수들이 도시동태성 모형에 추가되어야 할 것이다. 특히 환경 부문에서 도시 환경의 질을 반영하기 위해 보다 구체적인 변수가 추가되어 모형의 완성도가 제고되기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2019S1A5A2A03045479)

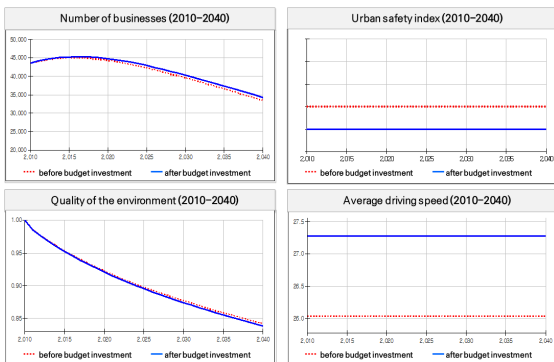


Fig. 7. The effect of smart city planning on key variables

환경 부문에서는 환경질이 예산 투입 이전과 별다른 차이를 보이지 않고 있는데, 이는 환경 분야의 스마트도시 서비스 예산이 8억원에 불과하기 때문인 것으로 판단된다. 환경질의 개선을 위해서는 보다 많은 예산을 투입하여 관리할 필요가 있다. 교통 부문에서는 스마트도시 서비스 예산을 투입할 경우에는 자동차의 평균주행속도가 소폭 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

이러한 결과를 종합해 볼 때, 안양시가 스마트도시계획(안)을 수립하고 지속적으로 관련 예산을 투입하면 안양시의 인구감소 완화, 기업체수 감소 완화, 도시안전지수 향상, 평균주

References

- Alfeld, L.E. and Graham, A.K. (1976), *Introduction to Urban Dynamics*, Wright-Allen Press, Incorporated, Cambridge, U.K.
- Anyang-city. (2017), 2030 Anyang City Master Plan, Anyang City Planning Division, Anyang, Korea.
- Bertuglia, C.S., Leonaridi, G., and Wilson, A.G. (1987), *Urban Dynamics : Designing an Integrated Model*, Routledge, London, U.K.
- Choi, N.H. (2003), A system dynamics approach in analyzing the dynamics of Seoul metropolitan and finding policy leverages, *Korean Public Administration Review*, Vol. 37, No. 4, pp. 1-30. (in Korean with English abstract)
- Forrester, J.W. (1969), *Urban Dynamics*, M.I.T. Press, Boston, M.A.
- Jeon, Y.S. (2003), *A Study on the Development Density Control for Urban Growth Management*, Doctoral dissertation, Chung-Ang University, Seoul, Korea, 262p.
- Kim, D.H. (2004), *Systems Thinking*, Sunhaksa Co., Seoul.
- Kim, D.H., Moon, T.H., and Kim, D.H. (1999), *System Dynamics*, Dae Young Co., Seoul.
- Kim, H.G. and Yi, M.S. (2018), A study on the connectivity between smart city planning and smart city planning using social network analysis, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 6, pp. 601-609. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.Y. and Han, S.H. (2019), An investigation of a smart city policy change and local government response, *Journal of the Korean Urban Geographical Society*, Vol. 22, No. 2, pp. 1-11. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.H. and Kim, S.R. (2019), Policy and legislative studies on smart city construction, *Law Review*, Vol. 19, No. 4, pp. 163-202. (in Korean with English abstract)
- Lewis, C.D. (1982), *Industrial and Business Forecasting Methods*, Butterworth Scientific, Boston, M.A.
- Moon, T.H. (2002a), 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. (2002b), Evaluation of urban growth management policy using urban dynamics model, *Korean System Dynamics Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 5-27. (in Korean with English abstract)
- Moon, T.H. (2007), *Sustainable City from a System Thinking*, Jipmoondang Co., Seoul, Korea.
- Oh, S.U. and Byeon, B.S. (2016), Dynamics analysis of urban functions of the old downtown of Incheon by using system dynamics, *The Geographical Journal of Korea*, Vol. 50, No. 2, pp. 227-238. (in Korean with English abstract)
- Park, E.A. (2010), *Evaluation of Urban Growth Management Measures Using Urban Dynamics Model-Focused on the case of Namyangju*, Master's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, 109p.
- Park, Y.J. (2008), *Study on Application of Urban Dynamics Model to Daejeon Metropolitan City*, Master's thesis, Han-nam University, Seoul, Korea, 89p.
- Richardson, G.P. and Pugh, A.L. (1981), *Introduction to System Dynamics Modeling with Dynamo*, The MIT Press, Cambridge, M.A.
- Saeed, K. (1998), *Towards Sustainable Development: Essays on System Analysis of National Policy*, Ashgate Publishing, Burlington, V.T.
- Sancar, F. and Onaran, K.S. (1997), Modeling the dynamics of informalization in land use controls: using system dynamics to formulate research in land use planning, *University of Colorado Proceedings for the 15th International System Dynamics Conference*, 19-22 August, Istanbul, Turkey, pp. 219-222.
- Yi, M.S. (2018), A structural analysis between overseas opening of geospatial information and the promotion of geospatial information industry using the systems thinking, *Journal of The Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 213-221. (in Korean with English abstract)