

# 토지이용-교통 통합모형의 이론 및 적용사례의 고찰과 구축방안 논의

## Land-use Transportation Integrated Models : A Literature Review and Research Directions

조성진 Cho Sung-Jin\*, 유건화 You GeonHwa\*\*

### Abstract

Meanwhile the keyword for sustainable cities, the inclusive cities, and urban generation is expected to become an important paradigm for the development and management of urban development and management in Korea, the emphasis is on the importance of a land-use and transportation integrated model (LUTI) as a scientific method to comprehensively evaluate and analyse the policies and urban activities to realize these paradigms. While various case studies of development and application of LUTI are reported in the developed countries, there are only a few studies on introducing model theory and the developed countries' experiences or a preliminary test for LUTI's applicability in Korea. Under the circumstance, this study propose the conceptual design and system framework of LUTI best suits the actual urban condition in South Korea, based on a literature review on the related research trend in South Korea, theories of LUTI models, and case studies on the practical use of LUTI in the developed countries (U.S. and EU). As seen from the literature review, the effective development and application of LUTI require consistent interest and support from the central government and local governments as well as the multidisciplinary efforts of experts in relevant fields.

Keywords: Urban Planning, Land-Use Transportation Integrated Model(LUTI), Literature Review, Policy Support System

### I. 서론

향후 지속가능도시, 포용도시, 도시재생의 세 키워드는 우리나라 도시개발 및 관리의 중요한 패러다임이 될 것으로 전망된다. 최근 미세먼지로 인한 심각한 환경 문제 및 이와 관련된 도시의 지속가능성(Urban Sustainability) 문제, 사회적 약자에 대한 차별과 배제

없이 모든 시민이 혜택을 고루 나누는 포용도시(The Inclusive City) 개념의 중요성이 부각되었다. 이와 함께 도시재생을 핵심 부동산 공약으로 내세웠던 문재인 대통령의 당선으로 쇠락한 구도심의 삶의 질을 제고하고 경쟁력을 회복시키고자 도시재생사업이 활발히 진행될 것으로 예상된다.

도시개발·관리의 새로운 패러다임은 도시의 특정

\* 아주대학교 교통연구센터 연구원(제1저자) | Researcher, Transportation Research Center, Ajou Univ. | Primary Author | island.jin@gmail.com

\*\* 경희대학교 지리학과 석사과정 | M.S. Candidate, Dept. of Geography, Kyung Hee Univ. | gh\_y@khu.ac.kr

부문에 한정되지 않고 도시체계를 구성하는 여러 부문들과 상호 연관되어 있다. 도시의 지속가능성은 핵심적인 에너지 소비, 환경오염 주체로서 토지이용 및 교통 부문과 관련되며, 포용도시는 시민의 삶의 터전인 토지와 이동수단인 교통시설에 대한 차별 문제에서 시작된다. 또한 도시재생사업은 직접적으로 지역의 토지이용을 변화시킬 뿐만 아니라 간접적으로 주변 지역의 교통체계를 변화시킨다(김혜천 2013).

도시 부문 간 상호 영향을 고려하여 「국토기본법」(제7조 국토계획의 상호 관계 참조)의 제정과 함께 토지이용-교통 상호 연계의 원칙을 법적으로 명문화하고 있지만 도시계획·정책의 실무에서는 객관적·실증적 방법론 및 시스템의 부재로 인해 실질적으로 두 체계 간의 상호 의존성을 반영하지 못하고 있다. 따라서 도시계획·정책을 효과적으로 수행하기 위해서는 도시를 구성하는 핵심 부문인 토지이용과 교통 부문을 통합적으로 운용할 수 있는 정책과 도시활동체계를 종합적으로 평가·분석할 수 있는 과학적 방법론이 요구된다.

본 논문은 토지이용-교통 통합모형의 여러 이론을 고찰하고, 국내 연구동향과 해외 도시정책 실무에의 활용사례를 차례로 살펴, 향후 도시계획의 패러다임을 구현할 중요한 방법론으로서 통합모형의 개념구조와 시스템구조, 그리고 개발 및 운영을 위한 방안을 제시한다.

## II. 토지이용-교통 통합모형의 발전

### 1. 공간상호작용모형

토지이용-교통 통합모형의 시초인 공간상호작용모형(Spatial Interaction Models: SIM)은 뉴턴 제1법칙의 중력모형에 기초하여 두 지역 간 상호작용( $T_{ij}$ )의 정

도를 인구수( $P$ )와 거리( $d$ )를 이용해 <식 1>과 같이 정의하고 있다.

$$T_{ij} = G^* \left( \frac{P_i P_j}{d_{ij}^2} \right) \quad \text{<식 1>}$$

기존 교통모형이 도시의 교통네트워크상에 나타나는 통행 자체, 즉 통행의 흐름과 배분에 관심을 둔 반면에, 중력모형에 기초한 SIM은 통행을 존 단위의 집합적 수준에서 정의하고 토지이용 변화의 영향을 더욱 강조하였다(Foot 1981).

모형의 구조가 단순하고 계산과정이 간단하며, 다양한 활동들(거주, 노동, 쇼핑 등)의 입지 문제에 적용할 수 있어 정책 실무에서의 활용성이 높다. 그러나 범용성에도 불구하고 모형 내에서 입지 개별특성, 개인 의사결정과정, 가격메커니즘 등 중요한 개념들이 결여되어 이론적 한계점으로 지적되고 있다(Berechman and Small 1988).

### 2. 수리계획모형

SIM에 이어서 개발된 수리계획모형(Mathematical Programming Models: MPM)은 주어진 제약 조건하에서 비용 최소화와 이윤 극대화 과정을 모델링하여 효율적인 도시구조를 탐색하려는 목적으로 도시 의사결정자의 최적 배분을 도출하는 모형이다. MPM의 대표적인 사례인 Herbert-Stevens(1960)의 결정균형모형을 통해 부연하자면, 수요 측면에서 각 가구는 특정 수준의 효용(Utility)을 만족하는 주거입지에 대한 입찰지대함수(Bid-Rent Function)를 가지고 있으며, 공급 측면에서 각 토지는 가장 높은 가격을 제한한 입찰자에게 임대된다. 따라서 균형상태(Equilibrium Statement)는 각 유형별 모든 가구가 동일한 수준의 효용으로

토지를 차지하는 상태로 정의된다.

SIM과 비교해 이론적 완성도에도 불구하고 실무 적용에 있어 여러 어려움이 있다. 구체적으로 MPM의 각 입지는 가격을 제외한 다양한 속성을 고려하지 못하며, 개인의 개별 의사결정과정을 모의할 수 없다. 또한 각 입지별 매력도가 상수로 고정되고, 모델링 초기에 교통 요소에만 의존하여 토지이용-교통 상호작용 메커니즘이 결여되었다. 마지막으로 SIM에 비해 입력 자료의 요구조건이 까다로워 모형 실행이 어렵다는 단점이 있다.

### 3. 확률효용모형

1970년대 후반 도시공간구조를 결정하는 개인의 의사결정과정을 제한된 합리성의 가정하에 개인의 효용을 구체화하도록 기존의 SIM에 미시경제이론(비용, 효용, 탄력성 등)을 도입하고자 하였다. 이러한 배경에서 탄생한 확률효용모형(Random Utility Models: RUM)은 도시공간구조의 형성에 가격메커니즘을 적용하였다. 이 모형은 개인은 특정 대안에 대한 입지속성과 의사결정자의 특성과 관련된 변수에 의한 효용함수를 가진다는 전제하에 입지특성과 소비자 행태 사이의 연관성을 분석하므로 주로 주거매력도에 대한 가구의 지불의사를 추정하기 위해 활용되어 왔다(Morisugi and Yoshida 1986).

RUM은 효용함수에 입지속성을 포함시켜 입지특성을 반영하고 있으며, 개인의 의사결정과정을 모델링함으로써 결과에 대한 검증이 가능하도록 하였다. 또한 비집계적 특성(Disaggregative)으로 인해 개인의 차별적 선택에 대한 특이성을 잘 반영할 뿐만 아니라, 사회경제적 특성에 따른 소비자를 집단별로 나누어 유연한 시장 세분화를 구현하고 있다. 그러나 교통 부문에서 통행비용이 여전히 고정상수로 취급되어 단

방향(교통→토지이용)의 상호 관계를 구현하고 있으며, 모형의 비집계적 특성으로 인해 모델링 결과의 집계과정에서 편차를 발생시키는 한계점을 내포하고 있다.

### 4. 입찰지대모형

도시 부문 간 상호 작용을 토지를 점유하고 있는 의사결정자의 경매과정으로 정의하는 입찰지대모형(Bid-Rent Models: BRM)은, 의사결정자의 행태(Bid)와 지불 의사금액(Rent)을 결합한 Alonso(1974)의 입찰지대(Bid-Rent) 개념을 적용한 통합모형이다.

BRM은 크게 결정론적 모형과 확률론적 모형으로 구분한다. 전자는 경매과정에 의해 결정되는 토지시장에서 가격 형성에 결정적 역할을 하는 가구에 의해 지가가 내생적으로 결정되는 반면에, 후자는 토지이용에 있어서 확률적 변동을 가정하여 헤도닉 요소에 대한 입찰지대 추정과 확률요소를 적용하여 소비자의 의사결정과정을 나타내고 토지이용과 지가의 상관성을 반영한다(Ellickson 1981).

### 5. 동적모형

이전까지의 통합모형은 사회체계가 안정적 균형상태에 도달하는 정적 (또는 상대적) 균형상태를 전제로 모든 처리과정의 즉시적 조정을 가정하여 연속된 시간을 정의할 수 없기에 시스템 내부의 타성이나 외부 효과에 의한 경로의존성(Path Dependency) 등 사회체계의 역동성을 반영할 수 없었다(Simmonds, Waddell and Wegener 2013). 이러한 배경에서 시간에 따른 사회체계의 점진적 변화에 의한 역동성에 관심을 가진 경제학자들은 통합모형 개발에 있어서 여러 도시현상을 연속된 시간 차원에서 고려할 수 있는 동적모형

(Dynamic Models: DM)을 개발하였다.

동적모형의 시초인 Forrester(1961)의 산업동태모형(Industrial Dynamics Model) 이후에, Allen and Sanglier(1978)는 자기조직화(Self-Organization)의 개념을 적용한 비선형 동적성장모형(Non-Linear Growth Dynamics Model)을 제안하여, 특정 지역에서 발생하는 활동에 의해 정의되는 도시공간패턴의 형성에 있어서 확률적 특성을 고려하였다.

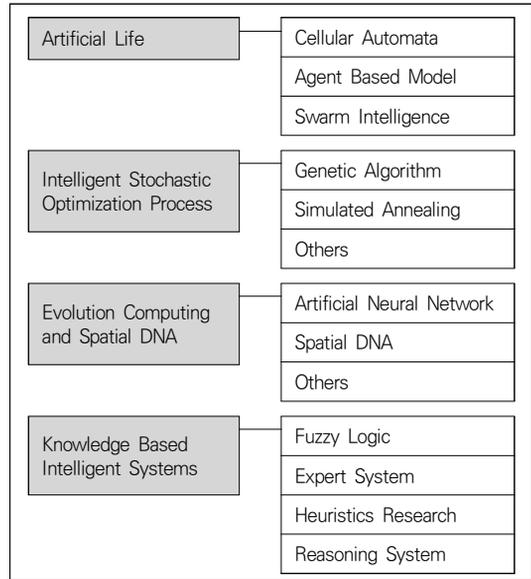
이 외에 한 시점의 결과가 다음 시점의 예측과정에 입력 자료로 활용되는 순환추정모형의 유사동적모형(Quasi-Dynamic Models)은, 하위 모형 간에 연쇄적으로 입출력 자료를 처리하는 방식을 적용하여 기존의 정적모형에서 다룰 수 없었던 다양한 정책 평가에 활용될 수 있었다. 또한 통합모형에 행태적 이론을 적용하여 이론적 완성도를 높였고, 모형들의 유연한 구조에 의해 도시활동과 관련된 다양한 요소들을 포함할 수 있다.

## 6. 마이크로시뮬레이션

1990년대 이후 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 개발된 마이크로시뮬레이션(Microsimulation) 기법은 초창기에 일부 동적경제모형에 의해 채택되었으며, 최근에는 Artificial Life(CA, ABM 등), Intelligent Stochastic Optimization Process(GA, Simulated Annealing), Evolution Computing and Spatial DNA(ANN, Spatial DNA 등), Knowledge Based Intelligent Systems(Fuzzy Logic, Expert System, Heuristics Research, Reasoning System) 등 자연·인문과학의 이론과 컴퓨터공학의 첨단기술을 접목시킨 새로운 방법들이 연구되고 있다(<Figure 1> 참조).

대표적으로 CA와 행위자기반모형을 이용한 마이크로시뮬레이션 연구사례가 많이 보고되고 있다. 1940년대 미국 Los Alamos National Laboratory의

Figure 1\_ Overview of Microsimulation Approaches



Source: Reconstituted from the work of <Figure 1> in Wu and Silva 2010.

Stainslaw Ulman과 John von Neumann의 연구에 뿌리를 둔 CA(Cellular Automata)는, 격자로 표현되는 도시의 구성요소와 기능의 단순한 상호 작용 방식 및 복잡한 집합적 활동을 통해 도시의 성장과정을 모델링한다(Wu 1998). 복잡계 이론(Complexity Theory)에 뿌리를 둔 행위자기반모형(Agent-Based Model: ABM)은, 경제학자 Schelling(1971)의 주거지분화현상(Segregation)에 대한 연구 이후에 인문사회과학 분야에서 활발하게 이용되고 있다(김동한, 서태성, 구형수, 강민규 외 2014).

ABM을 이용한 통합모형은 가구나 기업 등 도시를 구성하는 각 행위자(Agents) 사이의 사회·경제적 행위를 중심으로 도시현상에 대한 미시적·동태적 해석을 목적으로 한다. 이들 행위자는 각자의 입지 선호에 따라 주거 및 기업의 입지를 결정하며 이러한 개별 행위의 결과는 집합적 형태로 미래의 토지이용 패턴에 영향을 미치게 된다.

마이크로시뮬레이션은 도시개발뿐만 아니라 삶의 질, 사회평등 등 최근 도시정책의 대상이 되고 있는 사회적 이슈들에 대한 통찰력을 제공하는 반면, 다른 통합모형에 비해 자료의 요구조건이 까다롭고 개발 및 운영비용이 많이 소요되기 때문에 실무 적용에 있어서 풀어야 할 숙제가 많다.

## 7. 활동기반모형

1990년대까지 실무 현장에서 활용되던 대부분의 통합모형은 SIM의 중력모형에 기초해 존 간 통행량을 추정하는 4단계 교통모형(Four Step Model: FSM)과 결합하여 토지이용-교통 간 피드백 관계를 가지는 모형 형태를 취하고 있었다. 하지만 최근 FSM의 기저 이론에 내재된 제약과 교통수요 예측의 정확도에 대한 비판으로 인해 개별 통행자의 선호도 및 행동 특성이 반영되는 활동기반모형(Activity-Based Model: ABM)이 대안으로 떠오르고 있다.

도시계획학자 Chapin과 시간지리학자 Hägerstrand의 도시 서비스에 대한 수요와 공급이론에서 기원한 ABM은, 통행을 활동에서 파생된 수요로 정의하며, 주어진 제약 요소하에서 활동-통행 요소에 대한 개인

의 의사결정과정을 모의함으로써 가구 및 개인의 일상 활동 전체를 추정한다. ABM은 크게 개인의 의사결정과정을 정의하는 기저 이론과 모의 방식에 따라 효용극대화모형(Utility-maximization Model), 규칙기반모형(Rule-based Model), 컴퓨터처리모형(Computer Process Model)으로 구분한다.

가장 최근에 개발된 ABM은 향후 통합모형의 활용에 있어서 가족 구성원 내에서의 활동 및 통행수단 배분, 개인 간 협상 및 이타주의적 행태, 자녀 및 부양자 영향, 사회망의 영향 등 중요한 사회현상에 대한 정책의 수립 및 평가과정에 적용될 전망이다(Rasouli and Timmermans 2014).

## 8. 소결

향후 통합모형 개발을 위한 준비과정으로 선진국에서 개발한 기존 통합모형의 이론 및 시스템에 대해 학습하는 것은 국내 실정에 맞는 통합모형의 이론을 선별하고, 모형 시스템의 사양을 결정하는 데 중요한 단서를 제공한다.

앞서 살펴본 여러 통합모형의 이론들은 그 변천과정에서 모형에 대한 시대적 요구사항과 개발 및 운영

Table 1\_ Comparison of LUTI Models

Model type	SIM	MPM	RUM	BRM	DM	Micro-	ABM
Individual Decision Making Process	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Equilibrium Statement	Static	Static	Static	Static	Dynamic	Static/ Dynamic	Static/ Dynamic
Interaction between Land-use and Transportation	One Way	One Way	One Way	Two Way	Two Way	Two Way	One/ Two Way
Temporal and Spatial Resolution	Low	Low	Low	Medium	Medium	High	High
Data Requirement	Low	Medium	Medium	Medium	High	High	High
Development Resources	Low	Low	Low	Medium	Medium	High	High

당시의 여건을 잘 반영하고 있다(<Table 1> 참조). 일반적으로 높은 사양의 모형은 자료 요건뿐만 아니라 개발 및 운영을 위한 많은 비용이 소모된다. 따라서 통합모형의 이론과 사양을 결정할 때에는 평가하고자 하는 대상 정책 실무의 특성과 가용자원을 신중히 고려해야 한다.

### III. 통합모형의 해외 활용사례

#### 1. 미국

1990년대 초반 미국에서는 교통과 토지이용의 상관성을 고려하여 교통문제에 대한 실효성 있는 해결방안으로서 토지이용 규제가 필요하다는 인식이 강해졌다. 이러한 배경에서 연방정부는 1990년 CAAA(Clean Air Act Amendments)와 1991년 ISTEA(Intermodal Surface Transportation Efficiency Act)를 제정하여 교통이 토지이용과 환경에 미치는 영향을 인식하고, 주요 도시의 MPO(Metropolitan Planning Organization)가 토지이용 계획과 교통계획의 통합을 의무화하도록 하였다(김태경, 박현수, 권대한 2008). 이 외에도 각 주에서 TMIP(Travel Model Improvement Project)를 시행하여 이론적 통합에 대한 논의를 지속하고 있다.

미국 내 설문조사에 따르면, 2009년 조사 당시 전체 MPO/TMA 중 60% 가량은 통합모형을 개발 또는 운영 중이거나 향후에 적용하는 방안을 고려하고 있는 것으로 보고되었다(Lee 2009).

#### 2. 영국

영국은 1994년 PPG 13(Planning Policy Guidance 13)을 제정하여 토지이용 부문과 교통 부문의 상관관계를 정립하여 도시계획에 반영하도록 유도하였다. 구체적

으로 지방정부가 교통정책이나 관련 사업계획을 수립할 때 중앙정부의 보조금 지급 조건으로 토지이용과 교통 요소의 통합 방안을 제시할 것을 명문화하였다. 1997년에는 DETR(Department of the Environment, Transport, and the Regions)을 통합·개편하면서 토지이용, 교통, 환경에 대한 정책 및 계획을 통합적으로 운영하기 시작하였다.

1995년 영국 케임브리지의 David Simmonds Consultancy(DSC)에서 개발한 DELTA는, 실시간 도시정보의 변화과정을 분석하고 특정 시점의 교통 운영을 위한 토지이용 자료를 제공하며, 토지이용과 교통체계의 상호 관계에 따른 접근성의 변화 및 결과를 도출하기 위한 목적으로 현재까지 활용되고 있다. 스코틀랜드 에든버러시에 적용된 이후 영국을 포함한 전 세계 많은 도시에서 다양한 목적으로 활용되고 있는 대표적인 도시통합모형 중 하나이다.

#### 3. EU

1996년부터 1998년까지 시행된 EU(핀란드, 영국, 스페인, 독일 간 파트너십)의 SPARTACUS는 핀란드 헬싱키(Helsinki), 스페인 빌바오(Bilbao), 이탈리아 나폴리(Napoli)시의 지역 당국 및 공동체의 협의하에 진행되었던 프로젝트이다. 이 프로젝트를 통해서 토지이용과 교통, 경제, 환경 그리고 도시의 구성요소들 간의 상호 작용을 분석하고 도시의 환경·사회·경제적 측면의 지속가능성을 구현하기 위한 실효성 있는 정책 대안들을 제공하였다(Wegener 2000).

또한 PROPOLIS는 핀란드, 독일, 영국, 스페인, 벨기에의 동참하에 장기적인 지속가능도시 전략방안을 수립하고 토지 통합운영의 실효성을 홍보하기 위해 통합적 토지이용-교통에 관한 정책, 기술, 과학적인 평가도구들을 개발하였다. 핀란드 헬싱키, 이탈리아

나폴리와 비첸차(Vicenza), 스페인 빌바오, 스코틀랜드 인버네스(Inverness), 벨기에 브뤼셀(Brussels), 독일 도르트문트(Dortmund) 지역을 대상으로 통합모형의 적용가능성을 평가하였다(Wegener 2000).

#### 4. 시사점

해외 사례에서 보듯이, 중앙정부는 각 도시에서 성장관리모형의 개발 및 활용에 필요한 법률적인 의무사항을 제정하고 있으며, 각 지방정부는 모형을 개발하는 데 필요한 예산을 지원함과 동시에 전문가를 발굴하여 적극적으로 지역 고유의 도시통합모형 개발에 힘을 쏟고 있다.

반면 우리나라는 도시의 성장관리에 대한 필요성이 대두되고 도시통합모형에 대한 연구들이 진행되고 있지만 중앙정부와 지자체의 적극적인 지원이 없어 걸음마 수준에 머물고 있다(김태경, 박헌수, 권대환 2008). 우리나라는 국토계획에 있어서 교통계획의 위상이 상대적으로 낮고, 토지이용계획과의 연계성이 부족하여 두 계획을 연계하여 통합 구축하는 데 있어서 어려움이 존재한다(김광식 2011).

이러한 배경에서 「국토기본법」(제7조 국토계획의 상호 관계)과 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」이 제정되어 도시계획 수립과정에서 토지이용체계와 교통체계의 상관성을 고려하도록 의무화하고 있지만 두 체계 간 영향관계를 실증적으로 판단할 적절한 방법론의 부재로 인해 실효성을 거두지 못하고 있다(고주연, 이승일 2010). 따라서 도시계획 및 개발사업의 집행과 계획의 실행에 앞서서 통합모형의 적용이 의무화되도록 관련 법을 개정하는 등 법적·제도적 지원을 강화해야 하며, 그뿐만 아니라 사후에도 지속적으로 정책효과를 검증하기 위해서 통합모형에 반영되도록 운영하여야 한다(이승일, 이주일, 고주연, 이창효 2011).

## IV. 국내 연구 동향

### 1. 모형 이론 및 적용사례 고찰

비교적 초창기에 통합모형을 다룬 연구사례로, 통합모형의 이론과 실무 적용사례를 고찰하는 연구 부류가 있다.

김익기(1994)는 통합모형의 변천과정에 대한 고찰과 함께, 기저 이론에 따라 통합모형을 Lowry-Type, Mills-Type, Kim's Model로 분류하고 가상도시에 대한 시뮬레이션 분석에 이를 각각 적용하여 그 결과를 비교하였다. 필자는 결론에서 통합모형의 요구조건에 대해 모형기법, 이론적 배경, 자료수집, 분석의 용이성, 정책 결정에의 효용성 측면에서 논의하였다.

이희연, 김동완(2006)은 지속가능한 도시발전을 달성하기 위한 방안으로 토지이용정책과 교통정책의 통합을 지적하며 이를 종합적으로 평가할 수 있는 통합 분석틀로서 계획지원시스템을 제안하였다. 또한 기존 모형을 공간상호작용모형, 공간미시경제모형, 공간선택모형으로 분류하고, 각각의 이론적 토대와 운영메커니즘을 분석하였다. 구체적인 사례로 TRANUS (Barra, Pérez and Vera 1984)의 작동메커니즘을 분석하여 모형통합의 운용원리와 적용가능성을 평가하였다.

배범준, 김성수, 최현주(2009)는 교통정책과 토지이용정책에 지속가능한 평가방법으로 TRESIS와 TRANUS를 비교·분석하였다. 비교 결과, 환경영향평가의 측면에서 환경 관련 지표 및 분석모듈이 내장된 TRESIS가 활용 측면에서 상대적으로 적합하다고 결론내렸다.

이승일(2010)은 저탄소에너지 절약도시의 구현을 위해 다양한 도시 부문에 대한 종합적인 평가도구로 통합모형을 제안하였다. 국내 도시의 활용가능성을 평가하기 위해 대표적인 모형인 PECAS, DELTA,

UrbanSim을 시스템 목적, 이론, 메커니즘, 역동성, 구조, 공간 단위, 적용 규모, 교통, 자료 요건 등의 측면에서 비교하였으며, 통합모형의 개발방안에 대해 논의하였다.

이승재, 손지언(2010)은 다양한 도시정책 평가를 위한 준거를 마련하기 위한 단계로서 통합모형의 목적에 따라 예측모형과 최적화모형으로 구분해서 살펴보고 이를 토대로 계획 간 연계체계와 교통수요 추정 정확도를 개선하기 위한 방안을 모색하였다.

마지막으로 이승일, 이주일, 고주연, 이창효(2011)는 '저탄소녹색성장을 실현하기 위한 목적으로 토지이용, 교통, 환경의 상호 연관성을 장기적으로 추정할 수 있는 방안으로 통합모형 구축의 필요성을 강조하였다. 이에 기존 통합모형 이론의 발전과정을 살펴보고, 영국과 미국의 활용사례를 검토하여 국내 모형개발에 있어서 시사점을 도출하였다.

이상 문헌에서 살펴본 바, 통합모형의 분류체계와 국내 적용을 위한 평가대상모형은 다르지만, 기존 통합모형의 이론 및 적용사례에 대한 비교·검토를 통해서 향후 국내 실정에 맞는 통합모형의 개발을 위한 요구사항 및 개발방안에 관한 시사점을 도출하고자 하는 목적에서는 공통점을 보인다.

## 2. 사례 연구를 통한 모형 정합성 평가

다음은 선진국에서 개발된 모형 및 시스템에 대한 국내 도시의 정합성을 평가하는 연구사례이다.

이희연(2007)은 지속가능한 도시개발정책의 효과와 영향을 평가할 수 있는 과학적 수단으로 TRANUS를 제안하였다. 제안한 모형의 활용성을 평가하기 위해 용인시를 대상으로 정책대안에 따른 시나리오를 구축하고, 각 시나리오별 시뮬레이션 결과를 비교·평가하였다. 실험 결과, 시계열 차원에서 토지이용과 교

통 부문 간 상호작용에 대한 비교적 구체적인 정보를 제공하는 이점에도 불구하고, 존 내부의 미시적 효과를 파악할 수 없고 인구 및 경제예측을 위한 별도의 정보를 포함한 입력 자료의 요구 조건이 까다롭다는 한계점을 나타내었다.

김태경, 박헌수, 권대한(2008)은 선진국에서 개발한 통합모형(G-LUM)을 수도권 지역의 주거와 고용, 토지이용 밀도 분석에 적용하여 통합모형의 실효성을 국내 실정에서 검증하였다. 필자는 검증을 통해 G-LUM과 같은 중력기반배분모형이 가지는 사용상 장점(단순한 모형구조, 자료 가용성 등)과 더불어, 특정 정책(토지세, 보조금, 용도지역제 등)에의 적용 한계와 세분화된 지역이나 저개발지역에 대한 적합도 문제를 한계로 지적하였다. 따라서 향후 연구에서 GIS의 활용과 자료의 보안을 통해 미시적 통합에 대한 필요성을 제기하였다.

구형수, 이희연(2009)은 서울시 도시공간구조에 따른 에너지 소비 변화를 분석하기 위해 시스템다이나믹스를 이용한 시나리오 연구를 수행하였다. 연구 결과를 토대로 도시공간구조에 영향을 미치는 도시개발 정책에 따른 에너지 소비패턴을 파악할 수 있는 유의한 정보를 제공함으로써 관련 정책 수립에 있어서 연구방법의 활용성을 주장하였다.

김규일, 이창효, 이승일(2010)은 국내 자료 획득의 한계로 네덜란드 델프트(Delft)시를 대상으로 교통에너지 소비와 탄소배출량 변화를 추정하기 위해 DELTA 모형을 이용하였다. 실험을 통해 에너지 소비와 탄소배출량의 개략적 변화를 추정하는 데 유용하지만, 비용 측면의 고려, 국내 자료 수집의 한계, 실험 결과에 대한 검증과정 등 향후 연구에서 해결해야 할 한계점을 지적하였다.

유선철, 조규영, 왕광익(2011)은 도시계획 과정의 현안을 해결할 방법론으로 통합모형을 제안하고, 연

구지역의 수도권광역도시계획 목표와의 정합성을 검증하고자 G-LUM을 이용해 통합모형을 구축하고 대안별로 실험하였다. 필자는 결론에서 통합모형 변수에 대한 자료 구축과 함께 계획 요소별 지표 개발의 필요성을 주장하였다.

김주영, 이승재(2012)는 향후 서울시 토지이용-교통 통합모델 구축을 위한 기반을 마련하고자 대표적인 통합모형 사례(PECAS, DELTA, UrbanSim)에 대한 고찰과 함께, 미국 Citilabs사에서 개발한 CUBE-LAND의 기저 이론과 작동원리에 대해 파악하고 실제 연구 지역 정책 평가에의 활용가능성을 가늠하였다. 필자는 통합모형의 활용가능성이 높다고 주장하면서도 통합모형 운영을 위한 예산 및 기술적 어려움과 자료 수집 등의 선결 과제에 대한 방안을 마련해야 함을 강조하였다.

김동한, 서태성, 구형수, 강민규 외(2014)는 국토 및 도시공간구조의 변화를 파악하고 정책의 수립·집행과정을 지원할 도구로 행위자 기반의 통합모형을 구축하였다. 모형 검증을 위해 사례지역인 부산권역(부산, 김해, 양산)에서 현 추세 연장 시나리오와 압축개발 정책시나리오를 각각 적용하여 그에 따른 공간구조 변화를 분석하였다. 필자는 외생변수를 고려한 추가 모듈과 모형결과 해석을 위한 평가지표의 개발, 그리고 계획지원시스템으로의 확장 등을 제안하였다.

이승일, 이창효(2015)는 국내 도시에 대한 통합모형 활용을 위한 첫 단계로서, 외국에서 개발된 모델(DELTA, OmniTRANS)을 선정하고, 사례지역인 수도권 주거입지모델의 모수를 산출, 외국 도시와 비교하여 모델의 적합성을 검증하였다. 필자는 연구결과가 도시 및 교통정책의 효율적인 의사결정 지원에 유용하며, 또한 통합모델을 이용한 도시 간 동태적 비교연구의 새로운 분야를 개척하였음을 강조하였다. 더불어

어 미래 추세 시나리오와 토지이용·교통정책 시나리오를 적용한 장기 예측 결과에 대한 비교·평가 연구의 필요성을 제기하였다.

기 개발된 통합모형을 국내 도시에 적용한 사례를 종합해 보면, 연구대상(도시)의 복잡성, 정합성 평가의 기준, 자료 여건에 따라 각기 다른 결과를 도출하였다. 하지만 국내에의 활용가능성에 대해서는 대체로 긍정적으로 평가하고 있으며, 향후 모형의 정교화, 자료 수집, 구축 재원 확보 등을 선결 과제로 지적하였다.

### 3. 국내 모형이론 및 시스템 개발 연구

마지막으로 살펴본 연구는 그동안 축적한 지식과 경험을 토대로 통합모형의 이론 및 시스템을 개발한 사례이다.

먼저 김익기(1991)는 이산선택모형과 로짓모형을 이용해 Alonso(1974)의 모형을 발전시켜 각 가정의 거주지 및 직장지 선택을 위한 이질적 행태를 모델링할 수 있는 다핵심 일반균형모형(Non-Monocentric General Equilibrium Model)을 최초로 개발하였다. 주거-직장 입지선택모형과 산업 입지선택모형으로 구성된 모형은, 각 가구로 하여금 가용자산 내에서 토지, 여가활동, 상품으로 정의되는 <식 2>의 비선형 효용함수를 통해서 효용을 극대화하도록 한다( $a, \beta, \gamma$ 은 효용계수,  $\epsilon$ 은 변수와 무관하게 취향의 이질성을 나타내는 무작위 효용). 반면 기업은 <식 3>의 Cobb-Douglas Production Function에 의해 이윤을 극대화하도록 모형 내부에서 정의한다( $M_{rj}$ 와  $Q_{rj}$ 는 존  $j$ 에서 상품  $r$ 을 생산하는 데 소요한 노동력과 토지,  $Y_{rj}^{si}$ 는 존  $j$ 에서 상품  $r$ 을 생산하기 위해 존  $i$ 에서 구입한 상품  $S$ 의 양).

$$\max U_{ij} = \sum_r \sum_k a_{ik}^r \log Z_{ij}^{rk} + \beta \log q_{ij} + \gamma \log L_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

$Z_{ij}^{rk}$ : 상품의 양  
 $q_{ij}$ : 주거지의 질  
 $L_{ij}$ : 가구의 여가 시간 <식 2>

$$\max \pi_{rj} = p_{rj} X_{rj} - M_{rj} W_j - Q_{rj} R_j - \sum_s \sum_r Y_{rf}^{si} (P_{si} + m_s C_{ij})$$

$m_s$ : 승객차량  
 $C_{ij}$ : 혼잡통행료  
 $X_{rj}$ : 생산품 양 <식 3>

이 모델에서 완전경쟁하의 일반 균형상태에서 주택임대료, 노동임금, 상품가격이 내생적으로 산출되며, 동시에 존에서 도로에 사용된 토지 임대료가 교통체증비용의 통행량의 합과 동일한 상태를 가리키는 효율적인 교통체계하에서 일반 균형상태의 생산량, 생산부지, 주거수와 주거부지가 어떻게 분배되는지를 내생적으로 결정한다.

노정현, 류재영(1995)은 국토종합개발계획을 포함한 다양한 공간계획의 평가에 활용할 수 있는 국토이용 및 기반시설의 최적 투자방안을 모색하기 위해 도시공간에서 발생하는 여러 경제활동의 공간입지와 유통, 생산기술 유통의 일반 균형상태를 종합적으로 분석하는 계량분석모형을 개발하였다. 이 모형은 지역별 제약 조건하에서 도시활동에 수반되는 관련 비용(수송비, 상품 수출비, 생산활동에 투입되는 자본 및 토지이용, 그리고 토지개발비용)의 합을 최소화하는 <식 4>의 비선형계획모형으로 정의한다.

$$\text{Min. [총 수송비] + [총 상품 수출비] + [생산활동에 사용된 총자본 및 토지비용] + [토지개발비용] <식 4>$$

모형 검증을 위해 전국 8개 지역과 서비스, 판매업, 제조업, 가구로 구성된 생산활동 부문을 가정한 프로토타입 체계를 상대로 개발된 모형을 신규 고속도로와 대규모 공업단지 조성에 관한 시나리오에 각각 적용하여 평가를 시도하였다.

이상호(1996)는 교통네트워크 구축이 도시 및 지역 개발에 미치는 영향을 평가하기 위해 네트워크 영향평가모형과 지역투입 산출모형으로 구성된 통합모형을 개발하였다. 네트워크 영향평가모형은 Cobb-Douglas Production Function과 네트워크의 접근 시간이 자본과 노동에 미치는 효과를 추정하는 지역 간 투입산출모형을 <식 5>의 연립방정식으로 구축하였다.

$$V_{ir} = f(L_{ir}, K_{ir}; IA_r, \dots, IN_r)$$

$V_{ir}$ : r 지역 i 부문의 부가가치  
 $L_{ir}$ : r 지역 i 부문의 고용자수  
 $K_{ir}$ : r 지역 i 부문의 사적자본  
 $IA_r, \dots, IN_r$ : r 지역의 하부구조 유형 <식 5>

필자는 도시 및 지역개발의 효과와 공간구조의 변화를 종합적으로 분석하기 위해 비용함수의 추가를 포함한 모형 확장의 필요성을 주장하였다.

이승일(1999)은 도시공간구조와 환경의 상관성을 분석하여 이론을 정립하고, 이를 토대로 공간구조가 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법론을 개발하였다. 이 모형은 정책대안 시나리오를 구성하는 모듈과 교통행태를 추정하는 교통시물레이션(IRPUD-Model), 그리고 GIS을 이용하여 도시공간구조의 변화에 따른 환경영향을 평가하는 모듈로 구성되었다. 환경평가를 위해 교통 소음, 배기가스 오염, 교통 연료 소모의 교통 관련 인자와 열섬효과, 비오톱 손실, 토지 포장률 등 토지인자를 선별하여 환경평가모형에 적용하였다. 사례연구를 통해 환경친화적 도시공간구

조에 대한 이론을 검증하였다.

고주연, 이승일(2010)은 토지이용계획·교통계획 간 상관관계를 분석하는 통합모형을 개발, 사례지역인 남양주시에 적용하여 효율적·합리적 도시공간의 형성을 위한 정책대안을 모색하였다. 실험 결과, 정책입안자의 정책목표에 따라 다양한 시나리오를 구성하여 그 효과를 검증할 수 있지만, 토지이용의 변화를 외생적으로 결정해야 하는 한계점을 나타냈다.

유상균, 이혁주, 김호기(2010)는 확률균형모형(김익기 1991)을 토대로 가구의 교통 의사결정이 시간·소득 제약 조건하에서 가구 구성원 간 의사결정과정을 모델링하였다. 기존 통합모형의 교통모형을 개선하기 위해 통행경로, 통행수단, 통행시간 선택과정을 내생화하여 가구가 효용 극대화를 달성하는 최적 통행대안을 선택하도록 구현하였다.

안흥기, 임은선, 김대중, 배유진 외(2010)는 지역경제 부문, 지역 간 이동 부문, 토지이용 변화 부문의 3개 핵심 부문으로 구성된 국토정책시뮬레이터(K-Sim)를 개발하여 향후 국토정책의 분석 틀로 활용될 수 있도록 하였다. 모형 검증을 위해 2020년 이후 서울-세종 고속도로 개통을 전제로 예비타당성조사 시점의 계획을 대상으로 실험하였다. 필자는 국토정책의 영향 분석, 정책 대안의 결정 등 다양한 정책 결정을 지원할 수 있을 것으로 기대하였다. 향후 과제로서 부문 간 완전한 피드백의 구현과, 연구 목적에 따른 부문별 상세 정보를 제공할 것을 언급하였다.

유상균, 이혁주(2013)는 시장가격 결정구조를 포함한 통합모형의 토지이용과 교통체계 간 이론적 연계성을 강화하고자 기존 통합모형의 논리적 완성도를 높였다. 혼잡통행료 등 정책변수가 통행패턴에 미치는 영향을 공간경제효과와 가격효과로 구분하고 이들 효과별로 후생기여도를 평가할 수 있도록 새로운 방법론을 제안하였다. 이 모형은 토지이용이 교통 부문

에 미치는 영향(일반균형효과)을 일정 부분 반영하는데 성공했으며, 토지시장과 교통수요의 변화가 후생변화량에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 이는 토지이용-교통 통합모형 연구들이 다양한 정책대안에 따른 사회적 후생변화를 다양한 이론적 차원에서 평가할 수 있는 방법 틀을 제공하였다는 점에서 의미가 있다.

국내 통합모형 개발사례에서 보듯이, 모형 운영을 위한 자료 문제와 더불어, 실무를 위한 모형의 활용성은 좀 더 다양한 환경에서 검증되어야 하며, 향후 연구에서는 도시 부문 간 쌍방향 영향관계와 지속가능 측면에서 다양한 효과를 분석할 수 있도록 기존 모형을 확장·개선해야 할 것이다. 모형의 이론 및 시스템의 완성도나 활용성 측면에서 국내 통합모형의 수준이 해외 사례에 비해 아직 저조하지만, 향후 우리나라 국토관리정책에 적합한 토지이용-교통 통합모형을 개발하는 데 중요한 이론적·시스템적 기반을 제공하고 있다는 점에서 큰 의미가 있다.

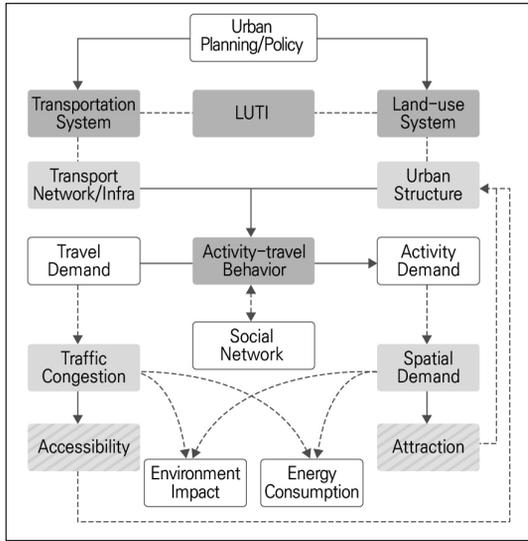
## V. 통합모형 구축방안

앞서 해외 사례의 고찰과 국내 관련 연구의 경험을 토대로 본 논문은 다음과 같이 통합모형의 개념구조와 시스템 구조를 소개하고, 통합모형의 효율적인 개발 및 운영을 위한 방안을 제시한다.

### 1. 통합모형의 개념 구조 및 시스템 구조

먼저 통합모형의 개념 구조를 살펴보면(<Figure 2> 참조), 도시계획 및 정책의 효과를 분석하기 위한 토지이용-교통 통합모형은 주요 구성요소인 교통체계와 토지이용체계를 변화시키는 새로운 도시계획 및 정책의 적용에서 시작된다. 계획·정책의 적용은 교통 부문과 토지이용부문에서 각각 교통서비스(네트워크

Figure 2\_Conceptual Design of LUTI



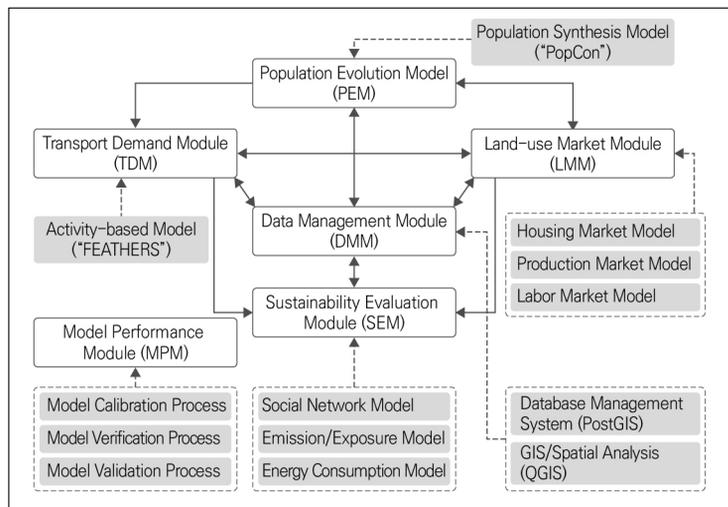
및 인프라)와 도시공간구조의 변화를 야기하며, 이어서 개인의 일상 활동 및 통행에 대한 의사결정과정에서 제약 요소(Constraints)의 형태로 영향을 미친다. 개인(또는 가구)은 주어진 제약 요소하에서 특정 목적을 달성하기 위한 활동과 통행수요를 발생시키며, 이러한 수요의 집계적 현상으로 도시공간에서 교통체증과 공간수요로 나타난다. 이때 사회망(Social Network)은 개인의 활동·통행 행태에 있어서 타인과의 관계를 통해 영향을 주고받는다. 교통체증은 화석연료 등 에너지를 소비하는 동시에 배출가스로 인한 환경에 영향을 미치며, 마찬가지로 특정 도시공간에서 발생하는 여러 활동은 다양한 에너지를 소비함과 동시에 어느 정도의 환경오염을 유발한다. 직접적으로 통행수요로 인한 교통체증은 특정 장소로의 접근성(통행 시간 등에 영향을 주며, 공간수요는

특정 도시공간에 대한 매력도(지가)를 변화시킨다. 따라서 개인의 활동 및 통행 행태에 의해 발생하는 교통 혼잡과 공간수요는 특정 도시공간에 대한 접근성과 매력도를 변화시켜 토지이용, 즉 도시공간구조에 영향을 미친다. 궁극적으로 통합모형을 통해 국토계획에 의한 토지이용 및 교통서비스의 변화에 따른 활동-통행 수요의 적응과정과, 특정 도시공간에 대한 활동 수요, 교통체계에 의한 접근성과 매력도로 정의되는 토지이용체계의 변화과정에 관한 양방향 상호작용을 구현하고자 한다.

다음으로 통합모형의 시스템 구조를 살펴보면 (<Figure 3> 참조), 모형 성능을 결정하는 모듈 간 데이터 전송속도와 모형의 확장성을 동시에 고려하여 여러 하위 모델(모듈)로 구성된 복합형(Composite) 통합모형 구조를 적용하였음을 알 수 있다. 이는 우리나라와 같이 급변하는 사회체계에 대한 다양한 도시정책 평가에 적합한 통합방식이다.

구체적으로 통합모형의 교통체계와 토지이용체계를 정의하는 교통수요모듈(TDM)과 토지시장모듈(LMM)은 시장의 균형상태에 대한 기존 이론(정적균형이론,

Figure 3\_System Framework of LUTI



동적균형이론)을 보완한 유사 동적이론(Quasi-Dynamic Theory)을 적용하였다. 이 모형은 한 시점(t)에서의 불균형 상태를 순환적·반복적 과정을 통해 다음 시점(t+1)의 입력자료로 활용함으로써 시간 차원에서 외부효과에 의한 변화를 잘 반영하고, 행태적 이론을 결합하여 이론적 완성도를 높임과 동시에 유연한 구조로 인해 다양한 정책 평가에 활용할 수 있다. 본 논문에서는 유사동적이론에 기초해 비교적 최근에 개발되었으며 도시공간구조에 따른 제약 요소하에서 개별 통행자의 활동-통행 특성을 추정하는 활동기반모형을 이용한 교통수요모듈과, 효용최대화이론에 기초한 주택시장, 상품시장, 노동시장으로 구성된 토지이용시장모듈을 적용하였다. 교통수요모듈과 토지이용시장모듈의 입력자료로 개인 및 가구의 인구·사회·경제적 정보와 토지이용정보(산업분류별 사업체, 종사자수 등)를 제공하기 위해 인구성장모듈(PEM)을 인구전수화기법(Population Synthesis Method)을 이용해 구축한다.

통합모형의 활용성 측면에서 단계적으로 도시계획 및 정책의 효과를 사전 평가하며, 장기적으로 국토계획을 상시 지원할 수 있도록 계획지원시스템으로 발전시킨다. 또한 도시재생, 포용도시 등 도시의 지속가능성을 향상시키기 위한 환경영향평가, 에너지소비, 사회망 등 다양한 효과를 평가할 수 있도록 별도의 평가모듈(SEM)을 추가하여 모형의 확장성을 개선한다. 다만 통합모형의 사양에 따른 자료 요건과 비용을 감안하여 모형 구축 및 운영에 있어서 활용성과 효율성을 동시에 고려해야 한다.

모듈 간 데이터 전송이 잦은 경우 연산 속도가 저하되는 복합형 구조의 단점을 보완함과 동시에, 모형의 산출물에 대한 분석 및 가시화를 위해 자료의 입력, 갱신, 모형 산출물에 대한 다양한 분석기능을 제공할 수 있도록 데이터베이스시스템(DBMS)과 GIS/공간분석 기능을 포함한 자료관리모듈(DMM)을 추가한다.

마지막으로 향후 개발된 통합모형의 결과에 대한 신뢰도를 향상시키고 정책실무 적용에 따른 위험을 최소화하기 위해 별도의 검증모듈(MPM)을 추가한다. 이 모듈은 첫째, 모형 정산(Model Calibration), 둘째, 모형 검사(Model Verification), 셋째, 모형 검증(Model Validation)의 세 가지 기능을 제공한다. 더불어 문헌 연구를 통해 채택한 다양한 평가지표(투명성, 정확성, 용이성, 적용가능성 등)를 이용하여 통합모형의 여러 측면을 종합적으로 평가한다.

## 2. 통합모형 개발 및 운영을 위한 방안

통합모형을 구축하기 위해서는 기본적으로 시스템 개발 능력을 갖춘 전문 프로그래머와 통합모형의 이론적 지식을 갖춘 분야의 전문가를 확보해야 한다. 또한 모형을 구축하기 위해서는 방대한 양의 데이터 수집 과정과 그 데이터를 처리·관리하기 위한 자원을 소비하므로 통합시스템의 개발·유지에 필요한 인력과 재원이 확충되어야 한다. 나아가 통합모형을 구축할 때 데이터 확보가 중요한 문제이므로, 데이터 수집이 용이하도록 자료 생산기관과의 유기적인 협조체계 및 법적 근거가 마련되어야 한다. 이에 지자체별로 지역의 통합모형 개발을 지원하고 전담하는 부서를 설치하는 노력과 외부 기관이나 대학을 지속적으로 지원하고 지역 내에서 전문 인력을 확보하여 지속적으로 모형을 관리 및 보완할 수 있도록 해야 한다. 지역 정책 현안에 부합하는 통합모형의 개발방안을 마련하고 개발된 모형에 대한 전문적인 자문을 구할 수 있도록 지역 내에 전문가그룹을 지속적으로 조직·운영할 필요가 있다. 일찍부터 통합모형 분야를 개척하고 오랜 실무 경험을 쌓아 온 북미와 EU 선진국의 사례에서 보듯이, 통합모형의 개발과 운영과정에 있어서 모형 이론 및 시스템 개발을 위한 학계의 노력과 더불어,

통합모형 개발을 위한 지속적인 관심과 지원, 그리고 정책 수립과정에서 통합모형을 적극 활용하려는 중앙 정부와 지자체의 강한 의지가 필요하다.

## VI. 결론 및 논의

지속가능도시, 포용도시, 도시재생의 향후 도시개발·관리의 새로운 패러다임을 구현하기 위한 관련 정책 대안의 평가도구로 토지이용-교통 통합모형의 중요성이 강조되는 실정에서, 본 논문은 관련 통합모형의 이론과 해외 활용사례, 국내 연구동향을 차례로 고찰하여 국내 실정에 맞는 통합모형 구축을 위한 논의를 진행하였다.

구체적으로 선진국에서 개발된 다양한 모형의 이론 및 시스템에 대한 고찰을 통해 통합모형 개발을 위한 모형이론 및 시스템 사양의 선택과정에서 목표정책의 특성과 가용자원에 대한 고려가 필요함을 인지하였다. 또한 미국, 영국, EU의 통합모형 운영사례에서 보듯이, 도시계획 및 개발사업 과정에서 통합모형이 활용되도록 중앙정부의 법적·제도적 지원이 필요하며, 사후에도 지자체의 정책효과 검증과정에 반영되도록 지속적으로 운영되어야 한다. 통합모형과 관련된 국내 동향을 살펴봄으로써 향후 국내 도시의 활용가능성과 실제 모형개발 과정에서 해결해야 할 과제를 도출하였다.

마지막으로 문헌연구를 토대로, 향후 통합모형 개발을 위한 개념 구조와 시스템 구조를 소개하고, 통합모형의 효율적인 개발·운영을 위한 구체적인 방안을 제시하였다.

토지이용-교통 통합모형 개발·운영에 관한 선진국 사례와 국내 경험을 통해 실효성 있는 통합모형의 개발을 위한 학계 전문가들의 노력과 더불어 실무 활용을 위한 중앙정부 및 지자체의 지속적인 관심과 지

원의 중요성을 확인할 수 있다.

## 참고문헌 •••••

- 고주연, 이승일. 2010. 도시개발-교통시설 연동 개발. 국토계획 45권, 5호: 163-179.  
Go Jooyeon and Lee Seungil. 2010. Developing an urban development and transport infrastructure linking model: The case of Namyangju city. *Journal of Korea Planning Association* 45, no.5: 163-179.
- 구형수, 이희연. 2009. 시스템다이나믹스를 활용한 도시공간 구조에 따른 에너지 소비모형 구축에 관한 연구. 국토연구 61권: 211-233.  
Koo Hyeongsu and Lee Heeyeon. 2009. Construction of the energy consumption model according to urban spatial structure using system dynamics. *The Korea Spatial Planning Review* 61: 211-233.
- 김광식. 2001. 교통계획과 토지이용계획 간의 연계체계 구축에 관한 연구. 대한교통학회지 19권, 1호: 29-52.  
Kim Kwangsik. 2001. A study on the establishment of linkage system between transportation plan and land use plan. *Journal of Korean Society of Transportation* 19, no.1: 29-52.
- 김규일, 이창호, 이승일. 2010. DELTA 모델을 이용한 교통에너지 및 탄소배출 시나리오 분석. 국토계획 45권, 6호: 117-135.  
Kim Kyuil, Yi Changhyo and Lee Seungil. 2010. A scenario analysis on transport energy consumption and carbon emission using DELTA. *Journal of Korea Planning Association* 45, no.6: 117-135.
- 김동한, 서태성, 구형수, 강민규, 성해정, 김은빈. 2014. 행위자 기반의 공간변화 시뮬레이션 모형구축과 국토도시정책 활용방안 연구. 안양: 국토연구원.  
Kim Donghan, Seo Taesung, Koo Hyungsoo, Kang Mingyu, Sung Hyejung and Kim Eunbin. 2014. *Development and Application of an Agent Based Spatial Change Simulation Model to Urban Planning*. Anyang: Korea Research Institute for Human Settlements.
- 김익기. 1991. 행태의 다양성을 고려한 토지이용-교통모형의 개발. 대한교통학회지 9권, 2호: 87-100.  
Kim Ikki. 1991. The land use-transportation model with taste heterogeneity. *Journal of Korean Society of Transportation* 9, no.2:

- 87-100.
7. \_\_\_\_\_. 1994. 토지이용-교통모형의 이론적 비교분석. 국토계획 29권, 4호: 135-155.  
\_\_\_\_\_. 1994. Theoretical comparison of land-use/transportation models. *Journal of Korea Planning Association* 29, no.4: 135-155.
  8. 김주영, 이승재. 2012. 통합토지이용 교통모형의 운용 방안에 관한 연구. 서울도시연구 13권, 1호: 99-120.  
Kim Jooyoung and Lee Seungjae. 2012. A study of operation mechanisms of the integrated land-use-transportation. *Seoul Studies* 13, no.1: 99-120.
  9. 김태경, 박헌수, 권대한. 2008. 도시성장관리모형 구축을 위한 기초연구. 수원: 경기개발연구원.  
Kim Taekyung, Park Heonsoo and Gwan Daehan. 2008. *A Preliminary Study for Building Urban Growth Management Models*. Suwon: Gyeonggi Research Institute.
  10. 김혜천. 2013. 한국적 도시재생의 개념과 유형, 정책방향에 관한 연구. 도시행정학보 26권, 3호: 1-22.  
Kim Hyecheon. 2013. A critical review on the conceptual scope and policy institution process in the Korean context of urban regeneration. *Journal of the Korean Urban Management Association* 26, no.3: 1-22.
  11. 노정현, 류재영. 1995. 토지이용-교통 통합모형을 이용한 공간계획 평가기법의 개발. 국토계획 30권, 2호: 205-222.  
Rho Jeonghyun and Ryu Jaeyoung. 1995. Development of a combined land use and transportation optimization model for evaluating the spatial plan. *Journal of Korea Planning Association* 30, no.2: 205-222.
  12. 배범준, 김성수, 최현주. 2009. 교통 및 토지이용정책의 지속가능성 평가방법론 고찰. 한국철도학회 학술발표대회논문집: 2435-2446.  
Bae Bumjoon, Kim Sungsoo and Choi Hyunju. 2009. A review on methodologies to evaluate the sustainability of transportation and land use policies. *Journal of the Korean Society for Railway*: 2435-2446.
  13. 성현곤. 2012. 주거환경과 통행행태 선호요인이 도시형생활주택의 주거만족도에 미치는 영향에 관한 연구. 국토계획 47권, 2호: 145-158.  
Sung Hyungun. 2012. A study on impacts of the preference factors for residential environment and travel behavior on the residential satisfaction of urban-living housing. *Journal of Korea Planning Association* 47, no.2: 145-158.
  14. 안홍기, 임은선, 김대중, 배유진, 최명섭, 박종덕, 정운영. 2010. 국토정책 시뮬레이션 모형의 구축 연구(I). 안양: 국토연구원.  
Ahn Hongki, Im Eunsun, Kim Daejong, Bae Yujin, Choi Myungsub, Park Jongduk and Jung Yoonyoung. 2010. *Establishing the Simulation Model for National Territorial Policy (I)*. Anyang: Korea Research Institute for Human Settlements.
  15. 유상균, 이혁주. 2013. 수치해석적 토지이용-교통모형의 이론연구 도구화: 교통수요의 내생화를 중심으로. 대한교통학회지 31권, 2호: 33-44.  
Yu Sanggyun and Rhee Hyokjoo. 2013. A numerical analysis of land use-transportation model as a form of analytical tool. *Journal of Korean Society of Transportation* 31, no.2: 33-44.
  16. 유상균, 이혁주, 김호기. 2010. 경로선택을 고려한 토지이용-교통 모형의 개발. 국토계획 45권, 1호: 123-137.  
Yu Sanggyun, Rhee Hyokjoo and Kim Hokee. 2010. Development of land use-transportation model with route choice. *Journal of Korea Planning Association* 45, no.1: 123-137.
  17. 유선철, 조규영, 왕광익. 2011. 토지이용-교통 통합모형 구축 및 계획 간 정합성 평가에 관한 연구. 국토연구 69권: 19-43.  
Yu Seoncheol, Cho Kyuyoung and Wang Kwangoik. 2011. A study on development of a land use-transportation integrated model and evaluate the consistency among the established urban plans. *The Korea Spatial Planning Review* 69: 19-43.
  18. 이상호. 1996. 교통네트워크-도시 및 지역개발효과 통합모형의 구축. 국토계획 31권, 6호: 161-176.  
Lee Sangho. 1996. Modelling the impact of highway networks on the urban and regional development. *Journal of Korea Planning Association* 31, no.6: 161-176.
  19. 이승일. 1999. 환경친화적 도시공간구조 분석을 위한 방법론. 국토연구 28호: 45-60.  
Lee Seungil. 1999. Methodology for the analysis of sustainable urban form. *The Korea Spatial Planning Review* 28: 45-60.
  20. \_\_\_\_\_. 2010. 저탄소 에너지절약도시 구현을 위한 우리나라 대도시의 토지이용-교통 개발방향. 국토계획 45권, 1호: 265-281.  
\_\_\_\_\_. 2010. Development scheme of a land-use transport model for Korea's large cities toward a low-carbon-energy-saving city. *Journal of Korea Planning Association* 45, no.1: 265-281.
  21. 이승일, 이주일, 고주연, 이창효. 2011. 토지이용-교통 통합의 개발과 운영. 도시정보 356호: 3-17.

- Lee Seungil, Lee Jooil, Go Jooyeon and Yi Changhyo. 2011. Development and operation of land use-transportation model. *Urban Information* 356: 3-17
22. 이승일, 이창효. 2015. 토지이용-교통 통합의 수도권 적용을 위한 적합성 연구: DELTA의 입지 하위의 모수산출을 대상으로. 국토계획 50권, 3호: 39-54.  
Lee Seungil and Yi Changhyo. 2015. Fitting a land use-transport model for its application to the Seoul metropolitan area: Calibrating the location sub-model of DELTA. *Journal of Korea Planning Association* 50, no.3: 39-54.
23. 이승재, 손지연. 2010. 통합 토지이용 교통모형을 이용한 교통정책평가에 관한 연구 I: 기존사례연구를 중심으로. 한국 ITS 학회논문지 9권, 1호: 111-120.  
Lee Seungjae and Sohn Jhieon. 2010. Study on transport policy assessment using integrated land use transport model. *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems* 9, no.1: 111-120.
24. 이희연, 김동완. 2006. 토지이용-교통 통합의 이론적 토대와 운용 메커니즘에 관한 소고. 환경논총 44권: 47-76.  
Lee Heeyeon and Kim Donwan. 2006. A study on the theoretical foundation and operation mechanism of land use-transport integration. *Journal of Environmental Studies* 44: 47-76.
25. 이희연. 2007. 지속가능한 도시개발을 위한 계획지원시스템의 구축과 활용에 관한 연구. 대한지리학회지 42권, 1호: 133-155.  
Lee Heeyeon. 2007. The construction and application of planning support system for the sustainable urban development. *Journal of the Korea Geographical Society* 42, no.1: 133-155.
26. Allen, P. M. and Sanglier, M. 1978. Dynamic models of urban growth. *Journal of Social and Biological Structures* 1, no.3: 265-280.
27. Alonso, W. 1974. *Location and Land Use: Toward a general theory of land rent*. Cambridge: Harvard University Press.
28. Berechman, J. and Small, K. A. 1988. Modeling land use and transportation: An interpretive review for growth areas. *Environment and Planning A* 20, no.10: 1285-1309.
29. De la Barra, T., Pérez, B. and Vera, N. 1984. TRANUS-J: Putting Large Models into small computers. *Environment and Planning B: Planning and Design* 11: 87-101.
30. Ellickson, B. 1981. An alternative test of the hedonic theory of housing markets. *Journal of Urban Economics* 9, no.1: 56-79.
31. Foot, D. 1981. *Operational Urban Models: An introduction*. New York: Methuen.
32. Forrester, J. W. 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge: The MIT Press.
33. Herbert, J. D. and Stevens, B. H. 1960. A model for the distribution of residential activity in urban areas. *Journal of Regional Science* 2, no.2: 21-36.
34. Lee, D. 2009. *TMA/MPO Modeling Activity Survey*. Fredericksburg: Fredericksburg Area Metropolitan Planning Organization.
35. Morisugi, H. and Yoshida, T. 1986. Forms of utility function for residential behavior analysis and neighborhood benefits estimation. *Environment and Planning A* 18, no.1: 53-62.
36. Rasouli, S. and Timmermans, H. 2014. Activity-based models of travel demand: Promises, progress and prospects. *International Journal of Urban Sciences* 18, no.1: 31-60.
37. Schelling, T. C. 1971. Dynamic models of segregation. *Journal of mathematical sociology* 1, no.2: 143-186.
38. Simmonds, D. Waddell, P. and Wegener, M. 2013. Equilibrium versus dynamics in urban modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design* 40, no.6: 1051-1070.
39. Wegener, M. A. 2000. New ISGLUTI, The SPARTACUS and PROPOLIS Projects. [https://www.researchgate.net/profile/Michael\\_Wegener3/publication/264878755\\_A\\_new\\_ISGLUTI\\_the\\_SPARTACUS\\_and\\_PROPOLIS\\_Projects/links/545b4f700cf2f1dbcbc80703/A-new-ISGLUTI-the-SPARTACUS-and-PROPOLIS-Projects.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Michael_Wegener3/publication/264878755_A_new_ISGLUTI_the_SPARTACUS_and_PROPOLIS_Projects/links/545b4f700cf2f1dbcbc80703/A-new-ISGLUTI-the-SPARTACUS-and-PROPOLIS-Projects.pdf?origin=publication_detail) (accessed September 14, 2017)
40. Wu, F. 1998. Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system. *Journal of Environmental Management* 53, no.4: 293-308.
41. Wu, N. and Silva, E. A. 2010. Artificial intelligence solutions for urban land dynamics: A review. *CPL bibliography* 24, no.3: 246-265.

- 논문 접수일: 2017. 7. 10.
- 심사 시작일: 2017. 7. 27.
- 심사 완료일: 2017. 9. 4.

---

## 요약

주제어: 도시계획, 토지이용-교통 통합모형, 문헌연구, 정책지원시스템

지속가능도시, 포용도시, 도시재생의 키워드가 우리나라 도시개발 및 관리의 중요한 패러다임이 될 것으로 전망되는 가운데, 이를 실현하기 위한 정책과 도시활동체계를 종합적으로 평가·분석할 수 있는 과학적 방법론으로서 토지이용-교통 통합모형의 중요성이 강조되고 있다. 이에 선진국을 중심으로 통합모형의 개발 및 적용에 대한 다양한 사례가 보고되고 있는 반면, 국내에서는 모형이론 및 선진 사례의 소개, 해외 모형의 적용 등에 그치고 있어 아직 실질적으로 현장에 적용된 사례가 전무하다. 이러한 배경에서 본 논문은 관련 국내 연구동향과 통합모형의 이론, 해외 실무 적용사례를 차례로 고찰하여 국내 실정에 맞는 통합모형의 구축을 위한 방안에 대해 논의하였다. 구

체적으로 향후 토지이용-교통 부문에 대한 관련 정책의 미래 효과를 실효성 있게 평가하기 위한 통합모형의 요구조건을 모형이론, 모형구조 및 통합방식, 자료 관리체계, 모형 검증, 정책 평가 활용성의 측면에서 살펴보고, 마지막으로 통합모형의 개념 및 시스템 구조와 함께 개발 및 운영을 위한 방안을 제시하였다. 지난 반세기 동안 미국, 유럽 등 선진국을 중심으로 진행되어 온 토지이용-교통 통합모형의 개발 및 활용사례에서 보듯이, 실효성 있는 통합모형의 개발을 위한 관련 학계 전문가들의 노력과 더불어 실무 활용을 위한 중앙정부와 지자체의 꾸준한 관심과 지원이 중요하다.

